



دو فصلنامه علمی پژوهشی
علم و فناوری در مهندسی مکانیک

دوره ۴ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

بسم الله الرحمن الرحيم

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

دو فصلنامه علمی-پژوهشی

دانشگاه ملی مهارت

دوره ۴ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک با صاحب امتیازی دانشگاه ملی مهارت براساس آیین نامه نشریات علمی مصوب ۱۳۹۸/۰۲/۰۹ در ارزیابی سال ۱۴۰۳ موفق به کسب مجدد رتبه «ب» شده است.

آدرس: تهران، میدان ونک، خیابان بزرگ شرقی، پلاک ۴، سازمان مرکزی دانشگاه ملی مهارت

پست الکترونیکی: amej@tvu.ac.ir

وبسایت: <http://stmechanics.bmtc.ac.ir>



نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

سردبیر: دکتر محمود شریعتی
صاحب امتیاز: دانشگاه ملی مهارت

مدیر مسئول: دکتر غلامرضا زمانی

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر محسن حداد سبزواری	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک
دکتر اکبر آفاقی خطیب	دانشیار، دانشگاه RMIT استرالیا
دکتر ناصر لشکریان آزاد	دانشیار، دانشگاه واترلو (UW)، کانادا
دکتر امید ماهیان	استاد، دانشگاه شیآن جیائوتونگ چین
دکتر اصغر برادران رحیمی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک
دکتر محمد جواد مغربی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی
دکتر اکبر جعفری	دانشیار، دانشگاه ملی مهارت، گروه مهندسی مکانیک
دکتر اسماعیل لگزian	دانشیار، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده مهندسی مکانیک
دکتر علیرضا فتحی	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک
دکتر کریم علی اکبری	دانشیار، دانشگاه ملی مهارت، گروه مهندسی مکانیک
دکتر مجتبی معصوم نژاد	دانشیار، دانشگاه ملی مهارت، گروه مهندسی مکانیک

مدیر داخلی نشریه: دکتر طیبہ جلالی

کارشناس نشریه: مهندس حمیده سادات سیدحسینی

ویراستار و صفحه آرایی: ملیحه دهقان پور

نشانی دبیرخانه: مشهد- بلوار پیروزی - چهارراه شهید کاوه - دانشکده فنی شهید منتظری - دفتر نشریه

صندوق پستی: ۹۱۷۶۹-۹۴۵۹۴

دورنگار: ۰۵۱-۳۸۷۸۴۰۴۶

تلفن: ۰۵۱-۳۸۷۰۹۴۳۳

وب سایت: <http://stmechanics.bmtc.ac.ir>

پست الکترونیکی: amej@tvu.ac.ir

اساتید محترمی که در داوری و ارزیابی مقالات این شماره همکاری داشته‌اند:

عطاالله ابراهیم زاده - محمد امیدپناه - بهنام آخوندی - مهدی آخوندی زاده کرانی - حمید باصری - علی محمد باغستانی - غلامحسین برادران - مهدی بقراتی - مرتضی بهبهانی نژاد - وحید بهلوری - حسن بیک محمدلو - محمدتقی ثابت - جعفر ثنائی مقدم - سید محمد جسمانی - رمضانعلی جعفری تلوکلائی - محمدعلی جعفری تلوکلائی - حسن حیرانی - محمدرضا دشت بیاضی - احمد رحمتی علائی - صدرا رستمی ارنسا - حدیث ژرفی - علی محمد شافعی - مجتبی شیخی ازغندی - حسین صالحی وزیری - سعید صرامی - مجید صفراآبادی فراهانی - مسعود طهانی - علی اکبر عبدوس - نعمت اله عسکری - علیرضا فتحی - افسانه فخار - محمدعلی کاظمی - شهاب کامل عباس نیا - ناصر کردانی - عباس کرمی - جعفر لنگری - حسین مجدی عبدالله آباد - سیدسعید محتسبی - محمدرضا مدبرنیا - علیرضا مشرقی - محمدحسین مظفری - سید نادر نبوی - مهدی نصرآبادی - میترا یادگاری دهکردی - عبدالمجید یوسف ثانی

فهرست مطالب

۷	 بررسی اثر درصد افزودنی الماس بر خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت برنز- الماس
۲۷	 طراحی و ساخت رتینواتور چندمنظوره زراعی با بازوهای متحرک
۴۷	 ارزیابی خواص مکانیکی تیتانیم خالص فوق ریزدانه تولیدشده توسط فرآیند ایکپ گرم با به کارگیری همزمان غلاف و فشار پستی
۶۵	 تشخیص داده محور و بدون نظارت آسیب در سازه های قابی شکل، با به کارگیری مدل های شبکه عصبی عمیق
۸۳	 مدل سازی یک آب شیرین کن حرارتی نوع چندمرحله ای (MED) برای مصارف صنعتی
۹۹	 بهینه سازی ابعاد ریل راه آهن با استفاده از تحلیل مودال به منظور بهبود پاسخ ارتعاشی-تنشی
۱۱۳	کنترل کننده تحمل پذیر عیب بلادرنگ موتورهای القایی با استفاده از شبکه عصبی عمیق CNN-LSTM بهینه شده مبتنی بر داده های ارتعاش-آکوستیک و الگوریتم کنترل پیشنهادی
۱۳۹	 بررسی تجربی رفتار اتصال چسبی کامپوزیت-کامپوزیت تحت شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از نمونه U شکل آرکان
۱۵۳	 حل صفحات میندلین به روش رهایی پویا
۱۷۵	ارائه یک مدل تجربی جدید برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول بر اساس دما، اندازه و غلظت نانوذرات
۱۹۱	 طراحی کنترلر مود لغزشی بهینه برای مدل سازی و تحلیل دینامیکی حرکت دست در پرتاب بیسبال
۲۰۵	 تحلیل کمانش و پس کمانش لوله کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه دار تحت فشار داخلی
۲۱۹	مدل سازی و تخمین کشیدگی طیفی در سیگنال های تابع پاسخ فرکانسی تیر آلومینیومی با بهره گیری از آنالیز مودال تجربی و پردازش سیگنال تطبیقی
۲۴۱	 تأثیر تقویت کنندگی نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه های آرد چوب کاج و پلی پروپیلن بازیافتی
۲۵۷	 مطالعه عددی رشد ترک زیرسطحی در پدیده اسپالینگ دندانچه چرخ دنده ساده



Investigation of the Effect of Diamond Additive Percentage on the Mechanical and Wear Properties of Bronze-Diamond Composite for Use in Industries

Ali Alizadeh^{*1} , Majid Jafari Mafard² , Mohsen Heydari Bani³ , Jafar Eskandari Jam¹ ,
Majid Eskandari Shahraki⁴

1. Professor, Materials and Manufacturing Technologies University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2. MSc in Mechanical Engineering, Materials and Manufacturing Technologies University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

3. PhD in Mechanical Engineering, Materials and Manufacturing Technologies University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

4. PhD Candidate in Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract

Particle-reinforced metal matrix composites are among the latest engineering materials, and their rapid development in recent years can be attributed to their exceptional properties, including high specific strength, wear resistance, corrosion resistance, high elastic modulus, and wide-ranging applications. These materials are used in various industries such as aerospace, telecommunications, electronics, automotive, defense, and many other commercial and consumer products. In this study, the effect of the percentage of diamond particles with a size of 100 micrometers on the mechanical and wear properties of bronze-diamond composites is investigated. Composite powders with varying diamond percentages in a bronze matrix are prepared using a ball mill to mix the bronze and diamond powders, and the resulting composite powders are consolidated through hot pressing. Using scanning electron microscopy, the effect of diamond content on their uniform distribution, the microstructure of the bronze matrix, and the mechanical and wear properties are examined. This study investigates the effect of different weight percentages of diamond particles (8%, 10%, 12%) on the properties of bronze-diamond composites. The results indicate that adding diamond to the metal matrix reduces flexural strength. Furthermore, as the weight percentage of diamond increases, flexural strength decreases, while wear resistance improves with higher diamond content.

Keywords

Diamond
Composite
Mechanical Properties
Wear Properties
Bronze

Received: 19.03.2025

Revised: 27.05.2025

Accepted: 31.05.2025

*Corresponding Author

Ali Alizadeh

Email

a_alizadeh@mut.ac.ir

1- Introduction

Metal matrix composites (MMCs) are generally produced using either melting methods or powder metallurgy. Melting methods can include various techniques such as vortex casting, centrifugal casting, composite casting, squeeze casting, melt infiltration, in-situ processes, and spray co-deposition. However, for tools incorporating

diamond in their structure, melting methods are not viable because diamond, a form of carbon, transforms into graphite at 700°C in air. To prevent oxidation and graphitization, high sintering temperatures must be avoided. Particle-reinforced metal matrix composites are widely used as drilling

How to Cite this Article:

[1] A. Alizadeh, M. Jafari Mafard, M. Heydari Bani, J. Eskandari Jam, and M. Eskandari Shahraki, "Investigation of the Effect of Diamond Additive Percentage on the Mechanical and Wear Properties of Bronze-Diamond Composite for Use in Industries," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 7–25, 2026, <https://doi.org/10.22034/stme.2025.513227.1111>. (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

bits, saw blades, grinding discs, and honing stones [1-3].

Tools produced by hot pressing typically contain diamonds embedded in a metal powder matrix, sintered in graphite molds. The resulting diamond/matrix composite is attached to a steel core via brazing or laser welding [4]. In brazed tools, diamonds form a single layer using a filler phase, typically composed of copper, nickel, or silver alloys, which is brazed to the steel core [5]. Generally, metal matrix composites are manufactured through various methods, with hot pressing being the method of choice in this study, involving parameters such as pressure, temperature, and atmosphere. Key factors influencing the production of diamond-containing metal matrix composites include the matrix material, added metals, powder size, alloying status, and the mechanical, physical, and chemical properties of the matrix. Additionally, the matrix's ability to bond with diamond is highly significant. Similarly, diamonds with varying sizes and metallic or non-metallic coatings play a crucial role in improving the matrix-diamond interface. To evaluate the performance and effective properties of these composites, various mechanical property tests, including wear, hardness, and flexural strength tests, must be conducted.

2- Research Materials

2-1- Bronze Powder

Bronze powder with a composition of Cu-20wt.%Sn, manufactured in China with 98% purity, atomized using inert gas, and having an average particle size of 45 microns, was used. The bronze powder particles used are elliptical in shape. The morphology of the bronze powder particles used in this study is shown in Figure 1.

2-2- Cobalt Powder

Pure cobalt powder, manufactured in Germany with 99.99% purity, atomized using inert gas, and having an average particle size of 1 micron, was used. The cobalt powder particles used are fine and amorphous in shape.

2-3- Diamond Powder

Diamond powder, manufactured in China with 99% purity and an average particle size of 100 microns,

was used. The diamond powder particles used are angular in shape.

2-4- Diamond Powder with 15 Micron Size

Diamond powder, manufactured in China with 99% purity and an average particle size of 15 microns, was used.

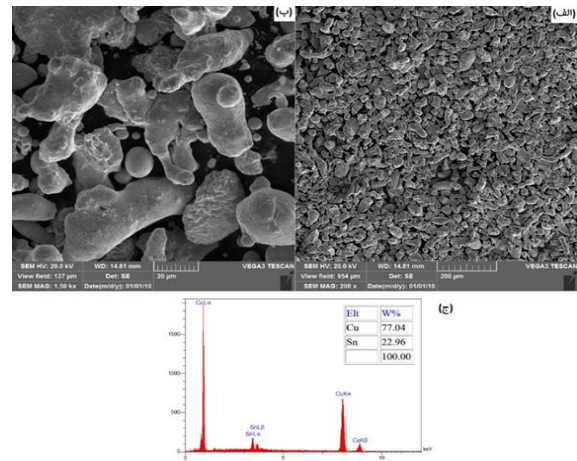


Figure 1: (a) and (b) Morphology of bronze particles with the composition Cu-20wt.%Sn, along with (c) EDS elemental analysis

3- Equipment

3-1- High-Energy Mill

For the mechanical alloying process of Bronze-Co-Diamond, a high-energy ball mill equipped with a water-cooling system and a controlled atmosphere was used.

3-2- Balance

For weighing the powders, a KIA Electronic BL2 balance with an accuracy of 0.01 grams was used.

3-3- Glovebox

To prevent oxidation of the milled powders during the unloading of the mill chamber, all steps of opening the mill chamber and unloading were performed in a glovebox under an inert argon gas atmosphere.

3-4- Hydraulic Press

For compacting samples for combustion and mechanical tests, a hydraulic press with a capacity of 100 tons, equipped with a pressure regulation and maintenance sensor, was used.

3-5- Furnace and Press under Inert Atmosphere

For hot pressing and sintering of Bronze-Co-Diamond samples, a chamber with a controlled

atmosphere and a working temperature of 1000°C was used.

3-6- Mold

For cold pressing, hot pressing, and sintering of samples, a hot-work mold with a diameter of 4 cm and a height of 10 cm, made of H13 hot-work steel, was used.

4- Project Methodology

The sample preparation process in this study involves the production of composite powders and their sintering through hot pressing. The density of the prepared composite samples is presented in Table 1. The composite mixture consists of cobalt with a specific gravity of 8.9 g/cm³, bronze (Cu-15Sn) with a specific gravity of 8.68 g/cm³, and diamond (D100 and D15) with a specific gravity of 3.5 g/cm³. The theoretical density was calculated using the rule of mixtures, and the sample densities was determined using the Archimedes method. Analysis of the results in Table 1 shows that the relative density of the samples ranges between 96% and 99%.

Table 1: Density of the prepared composite samples

Sample	Sample Density (g/cm ³)	Theoretical Density (g/cm ³)	Relative Density (%)
1	8.61	8.680	99.1
2	8.59	8.702	98.7
3	7.95	8.184	97.1
4	8.07	8.287	97.3
5	7.93	8.184	96.8
6	7.76	8.080	96.0

4-1- Preparation of Composite Powders

4-2- Determination of Metal Element

Percentages and Diamond Reinforcement Type

To investigate the effect of diamond content on the properties of bronze-diamond composites, diamond particles were added to the bronze matrix at 8%, 10%, and 12% by weight. Additionally, to study the effect of cobalt addition on composite properties, 10% by weight of cobalt was added to some samples. Initially, bronze powder with a composition of 85Cu-15Sn was prepared, and in subsequent samples, 9% by weight of cobalt was added to the mixture. It should be noted that copper

and tin powders were used as pre-prepared bronze powder in separate samples.

4-3- High-Energy Milling

To prepare the composite powders, the bronze matrix powder, along with diamond (and cobalt powder in some samples), was placed in the milling chamber. A 2% by weight stearic acid was added as a process control agent (PCA) to prevent powder adhesion to the milling balls. The ball-to-powder weight ratio was set at 30:1, using 900 grams of 5 mm diameter 304 stainless steel balls. The milling process was conducted at a speed of 430 rpm for three durations of 4 hours in a water-cooled chamber for the respective samples.

4-4- Sintering of Composite Samples

The powders produced through high-energy milling, weighing 30 grams, were poured into a mold and cold-pressed at a pressure of 200 bar. After cold pressing, the mold was transferred to a hot-pressing chamber. To ensure an inert atmosphere, argon gas was injected into the hot-pressing chamber throughout the process. After heating to 600°C, the mold and powders were held for one hour to achieve uniform temperature, followed by the application of a pressure of 200 MPa. After one hour, the pressure was released, and the furnace was turned off. Once the furnace cooled, the composite part was removed from the mold.

5- Conclusion

In this study, the hardness, wear resistance, and the effect of varying weight percentages of diamond particles on the properties of bronze-diamond composites were investigated. The results showed that samples without diamond exhibited higher density compared to those containing diamond. Additionally, the addition of diamond to the metal matrix reduced flexural strength, likely due to the presence of ceramic diamond particles in the bronze matrix. As the weight percentage of diamond increased, the flexural strength decreased. However, with an increase in diamond content, the wear resistance of the composites improved.

6- References

- [1] C. Artini, M. L. Muolo, and A. Passerone, "Diamond-metal interfaces in cutting tools: a review," *Journal of Materials Science*, Vol. 47, No. 7, pp. 3252–3264, 2012, doi: [10.1007/s10853-011-6164-6](https://doi.org/10.1007/s10853-011-6164-6).

-
- [2] L. J. de Oliveira, R. P. da R. Paranhos, R. d. S. Guimarães, G. S. Bobrovitchii, ɔ M. Filgueira, “Use of PM Fe–Cu–SiC composites as bonding matrix for diamond tools,” *Powder Metallurgy*, Vol. 50, No. 2, pp. 148–152, 2007. [Online]. Available: doi: [10.1179/174329007X161982](https://doi.org/10.1179/174329007X161982)
- [3] Y.-Z. Hsieh ɔ S.-T. Lin, “Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices,” *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 72, No. 2, pp. 121–125, 2001. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0254-0584\(01\)00419-9](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00419-9)
- [4] H. Tönshoff, H. Hillmann-Apmann, ɔ J. Asche, “Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications,” *Diamond and Related Materials*, Vol. 11, No. 3-6, pp. 736–741, 2002. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0925-9635\(01\)00526-2](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00526-2)
- [5] J. C. Sung ɔ M. Sung, “The brazing of diamond,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 27, No. 2, pp. 382–393, 2009. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijrmhm.2008.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.09.006)



بررسی اثر درصد افزودنی الماس بر خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت برنز- الماس

علی علیزاده^{۱*}، مجید جعفری مفرد^۲، محسن حیدری بنی^۳، جعفر اسکندری جم^۱، مجید اسکندری شهرکی^۴

۱- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دکتری، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

الماس

کامپوزیت

خواص مکانیکی

خواص سایشی

برنز

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

*نویسنده مسئول

علی علیزاده

ایمیل

a.alizadeh@mut.ac.ir

کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با ذرات، یکی از جدیدترین مواد مهندسی بوده و توسعه سریع آن‌ها در سال‌های اخیر را می‌توان به دلیل خواص بسیار عالی از جمله استحکام ویژه، مقاومت سایشی، مقاومت به خوردگی، مدول الاستیک بالا و کاربردهای گسترده آن دانست. این مواد در صنایع مختلف از جمله هوافضا، ارتباطات، الکترونیک، خودروسازی، صنایع دفاعی و بسیاری دیگر از محصولات تجاری و مصرفی کاربرد دارند. در این تحقیق اثر درصد افزودنی ذرات الماس با اندازه ذرات ۱۰۰ میکرومتر بر خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت برنز- الماس بررسی می‌گردد. پودرهای کامپوزیتی با درصد‌های مختلف الماس در زمینه برنز با استفاده از آسیاب سایشی جهت مخلوط کردن پودرهای برنز و الماس آسیاب می‌شوند و در انتها پودرهای کامپوزیتی به روش پرس داغ تف‌جوش می‌شوند. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، اثر مقدار الماس بر توزیع یکنواخت آن‌ها و ریزساختار زمینه برنزی و همچنین خواص مکانیکی و سایشی نیز بررسی می‌شود. در این تحقیق اثر حضور درصد‌های وزنی مختلف ذرات الماس (۱۲٪-۱۰٪-۸٪) بر خواص کامپوزیت برنز الماس مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد با اضافه کردن الماس به زمینه فلزی، استحکام خمشی کاهش می‌یابد. ضمن اینکه هرچه درصد وزنی الماس افزایش می‌یابد، استحکام خمشی کاهش و با افزایش درصد الماس، مقاومت به سایش نیز افزایش پیدا می‌کند.

۱- مقدمه

اکسیداسیون و گرافیت شدن آن باید از دمای پخت بالا اجتناب کرد. کامپوزیت‌های زمینه فلزی- ذره ساینده به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان مته‌های حفاری، تیغه‌های اره و دیسک‌های سنگ‌زنی و سنگ هونینگ استفاده می‌شود [۱-۳].

اکثر ابزارهای الماس به شکل ساختاری کامپوزیتی با ذرات الماس هستند که در یک زمینه فلزی قرار داده شده‌اند. متداول‌ترین ابزارهای الماسی را می‌توان به سه دسته فلزی، شیشه‌ای و رزینی با توجه به عامل اتصال استفاده‌شده تقسیم‌بندی کرد [۴]. در میان این سه دسته،

به‌طور کلی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دو روش ذوبی یا متالورژی پودر ساخته می‌شوند. روش ذوبی می‌تواند شامل انواع مختلفی اعم از ریخته‌گری گردابی، ریخته‌گری گریز از مرکز، ریخته‌گری ترکیبی، ریخته‌گری کوبشی، رخنه‌دهی مذاب، فرآیندهای درجا و فرآیند هم‌نشست پاششی باشد. برای تولید ابزارهایی که در ساختار آن‌ها از الماس استفاده شده است نمی‌توان از روش‌های ذوبی استفاده کرد، زیرا الماس حالتی از کربن است که در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در هوا تبدیل به گرافیت می‌شود، بنابراین برای جلوگیری از

How to Cite this Article:

[1] A. Alizadeh, M. Jafari Mafard, M. Heydari Bani, J. Eskandari Jam, and M. Eskandari Shahraki, "Investigation of the Effect of Diamond Additive Percentage on the Mechanical and Wear Properties of Bronze-Diamond Composite for Use in Industries," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 7-25, 2026, <https://doi.org/10.22034/stme.2025.513227.1111>. (in Persian)



©2026 the authors. Published by National University of Skills, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیک: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

• به حداقل رساندن مقدار فلزات کاتالیزوری برای محافظت از الماس در برابر گرافیت شدن

• انجام عملیات پخت در کمترین دماهای ممکن

به همین دلیل، تلاش‌های اصلی به سمت جستجوی آلیاژهایی است که دارای نقطه ذوب پایین یا دمای پخت پایین و خواص مکانیکی مناسب مشخص می‌شوند.

ظرفیت نگهداری الماس، متشکل از نیروی جذب فیزیکی^۱، نیروی لایه‌گذاری مکانیکی^۲ و نیروی پیوند شیمیایی^۳ است. تکنیک‌های بهبودیافته در این خصوص به سه نوع اصلی خلاصه می‌شوند: (۱) عملیات سطحی الماس: پوشش‌دهی فلزی و زبر کردن سطح الماس، (۲) اصلاح زمینه فلزی: افزودن عناصر تشکیل‌دهنده کاربید قوی، عناصر خاکی کمیاب و برخی عناصر غیرفلزی و پیش‌آلیاژی یا تصفیه پودرهای زمینه و (۳) تغییر در فن‌آوری فرآیند آماده‌سازی: تنظیم فرآیند تف‌جوشی و استفاده از فن‌آوری‌های جدید.

علاوه بر این، روش‌های مورد استفاده در ارزیابی استحکام نگهداری الماس شامل سه دسته می‌شوند: (۱) روش‌های مبتنی بر ابزارهای تشخیص: میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش پرتو ایکس، طیف‌سنجی پراکنده انرژی (EDS) و طیف‌سنجی رامان، (۲) روش‌های آزمون مکانیکی: روش تحلیلی استحکام خمشی، روش آزمون حلقه کششی^۴ و سایر روش‌های آزمون برای استحکام پیوند شیمیایی و (۳) روش‌های محاسبه تحلیلی و عددی [۱۱].

کلید افزایش ظرفیت نگهداری الماس، بهبود وضعیت پیوند سطحی بین زمینه و الماس است.

به‌عنوان یک نتیجه از واکنش شیمیایی کامپوزیت‌های زمینه فلزی، سه رفتار پیوندی مختلف بین الماس و فلز در تحقیقات مشاهده می‌شود: (۱) تخریب الماس و تشکیل گرافیت: عناصر با اثر کاتالیزوری بر کربن منجر به گرافیت شدن و تخریب الماس می‌شوند. ظرفیت نگهداری الماس به دلیل لایه گرافیت روی سطح الماس ضعیف است. (۲) تشکیل کاربید: یک کاربید تولیدشده به‌صورت اپیتاکسی^۵ روی سطوح الماس رشد می‌کند و باعث ایجاد پیوند قوی بین کربن و فلز می‌شود. (۳) رفتار بی اثر: هنگامی که هیچ واکنش شیمیایی یا فرآیند نفوذ رخ نمی‌دهد، رفتار بی اثر رخ می‌دهد و الماس‌ها فقط به‌صورت

ابزارهای الماس با پیوند فلزی به دلیل استحکام چسبندگی بالا، شکل‌پذیری خوب و عمر طولانی، به‌ویژه در پردازش مواد سخت و شکننده، بیشترین کاربرد را دارند [۵]. ابزارهای کامپوزیت فلز-الماس که خود تیز شونده هستند، نزدیک به شکل نهایی تولید می‌شوند و راندمان تولید بالایی دارند، به‌طور گسترده برای پرداخت سطوح، اره کردن و آسیاب کردن مواد شکننده سخت مانند سرامیک، سنگ و بتن استفاده می‌شوند. کبالت (Co) به دلیل شکل‌پذیری خوب، سازگاری شیمیایی با الماس و مطابقت نرخ سایش با الماس، کامپوزیت زمینه فلزی^۱ رایج برای ابزارهای هونینگ است. با این حال، در حال حاضر، تحقیقات در جهت کاهش یا حتی حذف کبالت به دلیل سمیت آن [۶]، مضرات زیست‌محیطی [۷] و هزینه بالای آن و بی‌ثباتی اقتصادی که نوسانات عرضه را ایجاد می‌کند، انجام می‌شود [۸]. امیدوارکننده‌ترین کاندیداهایی که می‌توانند جایگزین زمینه کبالت شوند، آلیاژهای مبتنی بر Cu، Fe یا Ti هستند. زمینه‌های مبتنی بر Cu، Fe-Cu-Co و Mn-Cu-Sn نیز برای تهیه ابزار الماس استفاده می‌شوند [۹]. ابزارهای الماسی مبتنی بر مس دارای خواص عالی و هزینه آماده‌سازی کم بوده و توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۱۰]. زمینه باید سازگاری شیمیایی و پیوند مکانیکی خوبی با الماس داشته باشد، یعنی باید بتواند با الماس بدون آسیب رساندن به آن واکنش دهد و در حین سرویس آن را نگه دارد. برای تناسب با قطعه کار، سختی زمینه باید با سختی قطعه کار مرتبط باشد. به‌عنوان مثال، برنز برای برش سنگ مرمر یا تخته سنگ مناسب است، درحالی‌که کامپوزیت Co+WC (بسیار سخت‌تر از برنز) می‌تواند برای برش بتن استفاده شود. زمینه‌های Co، Co+WC، Bronze + Co و W مجموعه‌ای از زمینه‌های ممکن با سختی بالا هستند. در نتیجه، مهم‌ترین پارامترهایی که در طراحی یک زمینه فلزی باید در نظر گرفته شوند عبارت‌اند از: [۱]

- ترکیب و اندازه پودرها
- دما و زمان عملیات پخت،
- چگالی قطعه به‌دست‌آمده
- امکان تشکیل لایه سطحی بین الماس و زمینه

^۱ اپیتاکسی (Epitaxy) به‌نوعی رشد کریستال یا رسوب مواد اشاره دارد که در آن لایه‌های کریستالی جدید با یک یا چند جهت کاملاً مشخص نسبت به لایه بذر کریستالی تشکیل می‌شوند.

^۱ Metal Matrix Composites

^۲ Physical Adsorption Force

^۳ Mechanical Inlaying Force

^۴ Chemical Bonding Force

^۵ Tension Ring Test Method

مکانیکی در زمینه فلزی به هم متصل می‌شوند؛ بنابراین انتظار می‌رود که نگهداری الماس از طریق اعمال فلز روی سطح الماس با پوشش عناصر تشکیل‌دهنده کاربید قوی (Cr, W, V, Ti, Mo) و غیره) قبل از مخلوط شدن با پودرهای زمینه فلزی تقویت شود. پوشش الماس با فلز کاربیدساز یکی از مؤثرترین و گسترده‌ترین روش‌های محافظت از الماس در برابر گرافیت شدن و بهبود چسبندگی بین زمینه و الماس است. به همین دلیل، حفاظت از الماس به ویژه برای زمینه‌های مبتنی بر آهن، کبالت و نیکل مناسب است، درحالی‌که برای زمینه‌های مبتنی بر مس ضروری نیست، زیرا مس هیچ تمایلی به گرافیت شدن الماس نشان نمی‌دهد.

عموماً، سایش منجر به متلاشی شدن و از بین رفتن ماده در مجاورت سطح می‌شود [۱۲]. این از دست رفتن ماده از اهمیت اقتصادی بسیاری برخوردار می‌باشد، لذا شناخت و بررسی رفتار تریبولوژیکی مواد در راستای کنترل پدیده سایش و توسعه مواد جدید اهمیت بسیار زیادی دارد. به همین علت تاکنون تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است [۱۳].

سایش خراشان، زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات نوک تیز یا خشن بر یک سطح نرم‌تر فرو روند و سطح را خط بیاندازند یا تکه‌هایی از آن جدا کنند. این سایش به دو مکانیزم دو جسمه و سه جسمه تقسیم می‌شود. در سایش دو جسمه، یک جسم سخت بر روی جسم مقابل که نرم است، سایش ایجاد می‌کند و در سایش سه جسمه، ذرات سخت ساییده، بین دو سطح سایشی گیرکرده و باعث ایجاد سایش می‌شوند [۱۴].

در سایش چسبان، با افزایش بار اعمالی، فشار زیاد ناشی از بار باعث می‌شود تا زبری‌هایی که در تماس با یکدیگر هستند تغییر شکل پلاستیک دهند و این حالت تا زمانی ادامه می‌یابد که سطح تماس به قدر کافی بزرگ شود تا بار را تحمل نماید. نیروهای برشی بزرگ در مناطق موضعی جمع شده و باعث می‌گردد تا یکی از آن‌ها دچار شکست شود. سپس، ماده از قسمت شکسته شده جدا می‌شود و به سطح مقابل انتقال می‌یابد.

پرس گرم (HP)، پرس گرم ایزواستاتیک (HIP) و لحیم‌کاری فرآیندهای مرسوم می‌باشند که برای تهیه ابزارهای الماس بسیار نازک استفاده می‌شوند. با این حال، معایبی برای این روش‌ها وجود دارد، از جمله ضخامت زیاد، درجه آلیاژی پایین و دقت محدود برش به دلیل نسبت ابعاد بزرگ [۱۵].

ابزارهای تولیدشده به روش پرس گرم، دارای الماس‌هایی هستند که معمولاً با تفجوشی در قالب‌های گرافیتی در یک پودر فلز قرار داده می‌شوند. کامپوزیت الماس/زمینه تولیدشده به این روش، با استفاده از لحیم‌کاری یا جوش لیزری به هسته فولادی متصل می‌شود [۱۶]. در ابزارهای لحیم‌کاری شده، الماس‌ها با استفاده از یک فاز پرکننده که عموماً از آلیاژ مس، نیکل یا نقره تشکیل شده است، یک لایه منفرد را تشکیل می‌دهند که به هسته فولادی لحیم می‌شود [۸]. اگر فاز پرکننده به درستی انتخاب شود، الماس در ابزارهای لحیم‌کاری محکم‌تر از الماس‌های پرس داغ نگه داشته می‌شود. در نتیجه ارتفاع بیرون‌زدگی و سرعت برش آن‌ها بیشتر و عمر ابزار بیشتر می‌شود. علاوه بر این، در ابزارهای لحیم‌کاری شده، می‌توان با استفاده از یک الگو، دانه‌ها را به طور منظم توزیع کرد. این فرآیند از اتلاف و جدایش الماس از زمینه جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر، آلیاژ باید به اندازه کافی الماس را تر کند و نقطه ذوب فاز پرکننده باید تا حد امکان پایین باشد تا آسیب به حداقل برسد. در دسته سوم ابزارها، یک زمینه نیکل با آبکاری الکتریکی به زیرلایه ابزار متصل می‌شود و الماس‌ها به طور مکانیکی در لایه نیکل به دام می‌افتند. ابزارهایی با یک لایه سنگ ساییده عمدتاً با آبکاری الکتریکی تولید می‌شوند. برآمدگی ذره کمتر از ۵۰-۴۰ درصد اندازه متوسط ذره است.

فرآیند پرس گرم در قالب صلب با استفاده از بارگذاری در امتداد محور عمودی همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است انجام می‌شود. برای جلوگیری از آسیب قالب، قالب گرافیتی در یک اتمسفر محافظ یا محفظه خلاء محصور می‌شود. بارگذاری در امتداد محور عمودی تحت فشار یک سیستم هیدرولیک خارجی است. اگرچه فشار در امتداد محور عمودی اعمال می‌شود، اما فشار شعاعی نیز روی دیواره قالب وجود دارد. اختلاف تنش عمودی و شعاعی باعث ایجاد تنش برشی می‌شود که در اتصال ذرات به یکدیگر مؤثر است. این تنش برشی متناسب با تنش اعمال شده است. چگالش اولیه شامل بازآرایی ذرات و جریان پلاستیک است. با پیشرفت تراکم، خزش توسط نفوذ مرز دانه و نفوذ حجمی کنترل می‌شود [۱۷].

برای حالت پرس داغ با گرمایش القایی، قالب از گرافیت ساخته می‌شود، اما از گرمایش مقاومتی نیز استفاده می‌شود. سایر مواد قالب شامل فلزات نسوز و آلیاژهای آن‌ها و گاهی سرامیک‌هایی مانند آلومینا یا کاربید سیلیکون در تنش‌های کم استفاده می‌شود. سازگاری انبساط حرارتی بین پودر فشرده و ابزار برای جلوگیری از ترک خوردن، یکی

کنترل کننده فرآیند، نسبت وزنی گلوله به پودر، اتمسفر آسیاب کاری، درجه حرارت آسیاب کاری.

موریگوچی و همکاران [۲۱] رفتار تفجوشی و خواص کاربیده‌های الماس/سیمان را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند، حضور الماس در زمینه‌هایی مانند کاربیده‌های سماتنه، چقرمگی ابزارهای برش و پرداخت را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

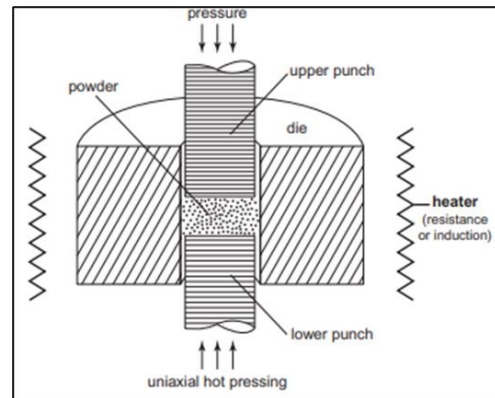
نایدیچ [۲۲] ترشوندگی مواد جامد توسط فلزات مایع را بررسی کرد. او دریافت درجه تر شدن یک بستر توسط یک فلز مایع عمدتاً به شدت فعل و انفعالات سطحی بستگی دارد. با توجه به تفاوت کم انرژی بین الماس و گرافیت، رفتار مشابهی از نظر ترشوندگی برای هر دو ماده قابل انتظار است.

کلوتز و همکاران [۲۳] تأثیر پارامترهای لحیم کاری و ترکیب آلیاژ بر مورفولوژی سطح مشترک الماس لحیم شده را بررسی کردند. برای محافظت از الماس در برابر گرافیت شدن، گاهی اوقات مقادیر کمی از عناصر فعال مانند کروم، تیتانیوم یا وانادیوم به زمینه اضافه می‌شود، زیرا آن‌ها به عنوان سازنده کاربید عمل می‌کنند. یک راه حل جایگزین استفاده از الماس‌های با پوشش تیتانیوم است. آن‌ها دریافتند در هر دو مورد، یک لایه نازک کاربید روی سطح الماس شکل می‌گیرد و از گرافیت شدن جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، لایه نازک کاربید انسجام بهتر بین الماس و زمینه را تضمین می‌کند، زیرا با استفاده از برهم‌کنش شیمیایی به الماس می‌چسبد.

ژائو و دوآن [۲۴] ظرفیت نگهداری الماس در ماتریس‌های پیوند فلزی را مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند مورفولوژی سطحی اطراف الماس با پوشش تنگستن مطلوب‌تر است زیرا ترک‌های کمتری را نشان می‌دهد.

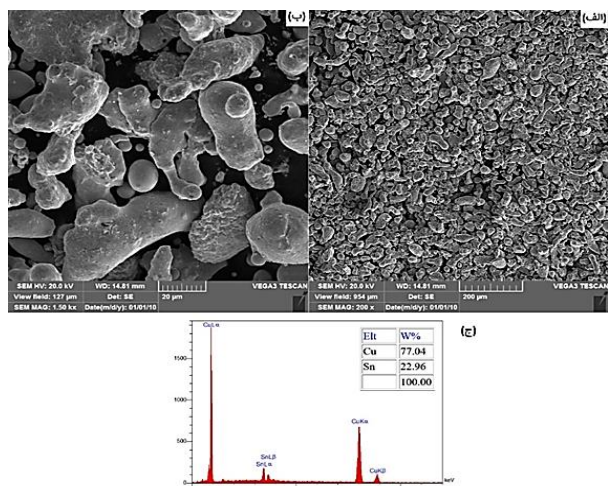
ژو و همکاران [۲۵] لحیم کاری الماس توسط آلیاژ Ag-Cu-Zn با پودر کروم و رابط‌های ریزساختار را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌های انجام شده روی یک زمینه فلزی Cu-Sn-Fe-Ni-misch نشان داد که استفاده از الماس‌های پوشش داده شده با Ti، استحکام گسیختگی عرضی را تا ۲۱ درصد نسبت به الماس‌های بدون پوشش افزایش می‌دهد و برهم‌کنش الماس/زمینه را محکم‌تر می‌کند و میزان استهلاک قدرت سنگ‌زنی را کاهش می‌دهد. همه این شواهد به چسبندگی بهتر بین الماس و زمینه و اثر محافظتی پوشش در برابر گرافیت شدن و اکسیداسیون الماس اشاره دارد. پراش پرتو ایکس زاویه

دیگر از نکاتی است که باید در حین خنک شدن مورد نیاز قرار گیرد. یک راه حل این است که پودر در دمای محیط فشرده شود [۱۷].



شکل ۱: شماتیکی از پرس داغ تک‌محوری که در آن فشار در امتداد محور عمودی توسط پانچ‌های گرافیتی اعمال می‌شود و پودر در یک قالب گرم شده، قرار می‌گیرد [۱۷]

استفانسکو [۱۸] و بلوچر [۱۹] فرآیند نفوذ فشار فلز مایع برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی را بررسی کردند. نتایج نشان داد اجزاء متالورژی پودر که توسط پرس سرد تک‌محور تولید شده‌اند درجه‌ای از آنیزوتروپی خواص را به دلیل گرادیان دانسیته از خود نشان می‌دهند. مک کالو و همکاران [۸] پاسخ مکانیکی کامپوزیت‌های Al_2O_3-Al تقویت شده با الیاف پیوسته تولید شده توسط ریخته‌گری نفوذی تحت فشار را مورد بررسی قرار دادند. برای تولید کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذرات سرامیکی از فرآیند آلیاژسازی مکانیکی استفاده شده است. در این عملیات، پودرهای نرم (پودر فلزی) لایه‌ای شده و پودرهای ترد (پودر سرامیکی) شکسته می‌شود و بین لایه‌های پودر فلزی محبوس می‌شود. اگر زمان آسیاب بالا باشد می‌تواند باعث شود که اندازه پودرهای سرامیکی به محدوده نانومتری برسد؛ بنابراین پودری به دست می‌آید که در اطراف آن لایه‌ای از پودر نرم فلزی قرار گرفته و در داخل آن پودر ترد سرامیکی در ابعاد نانومتری وجود خواهد داشت و با فرآیندهای بعدی مانند پرس، زینتر و اکستروژن می‌توان نمونه‌های نانو کامپوزیتی با توزیع فاز ترد نانومتری در یک زمینه فلزی نرم به دست آورد. فلمینگ [۲۰] فرآیند و مسیر پیش رو شکل‌دهی نیمه جامد را مورد بررسی قرار داد. عواملی که در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی روی نوع و ساختار محصول نهایی بدون در نظر گرفتن طبقه و ترکیب پودر تأثیر می‌گذارند عبارت‌اند از: انرژی آسیاب، محفظه آسیاب کاری، زمان آسیاب کاری، سرعت آسیاب کاری، جنس، ابعاد و توزیع اندازه گلوله‌های آسیاب، میزان پر شدن محفظه آسیاب، عامل



شکل ۲: الف) و ب) مورفولوژی ذرات برنز با ترکیب Cu-20wt.%Sn به همراه ج) آنالیز عنصری EDS

۲-۲- پودر کبالت

پودر کبالت خالص ساخت کشور آلمان با درصد خلوص ۹۹/۹۹٪ امتیاز شده به وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۱ میکرون استفاده شده است. ذرات پودر کبالت مورد استفاده به صورت ریز و بی شکل هستند. مورفولوژی ذرات پودر کبالت خالص مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۳- پودر الماس

پودر الماس ساخت کشور چین با درصد خلوص ۹۹٪ با متوسط اندازه ذره ۱۰۰ میکرون استفاده شده است. ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت گوشه دار است. مورفولوژی ذرات پودر الماس مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است.

کم^۱ انجام شده بر روی لایه نازک پوشش تیتانیوم روی الماس، نشان دهنده وجود کاربید Ti در فصل مشترک پوشش الماس/ تیتانیوم است. ژو و همکاران [۲۶] اثرات پوشش Ti بر عملکرد کامپوزیت‌های الماس با پیوند فلزی حاوی خاک کمیاب را بررسی کردند. نتایج آزمایشات نشان داد که چرخ سنگ‌زنی رزین تولید شده با الماس دارای روکش Ti و Ni دارای طول عمر ۱ تا ۱/۲ برابر بیشتر از پیوند ساینده الماس معمولی در هنگام استفاده است. نه تنها وضوح چرخ سنگ‌زنی به خوبی تضمین شده است، بلکه هزینه افزایش یافته نیز نسبتاً ناچیز است. البته، نسبت ساینده‌های پوشش داده شده می‌تواند بدون نگرانی در مورد هزینه بیشتر باشد.

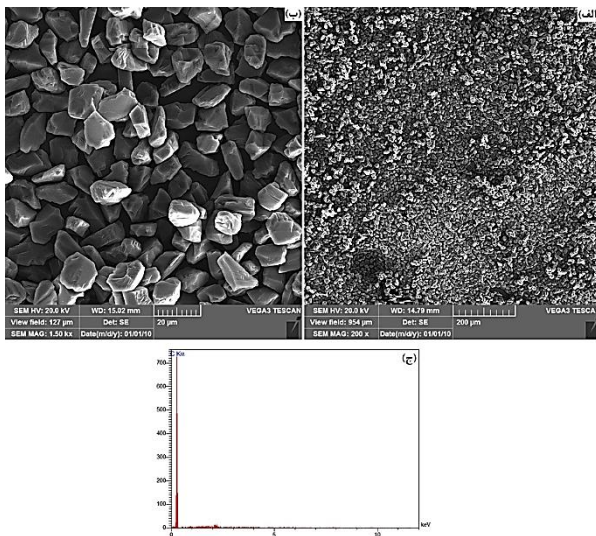
به‌طور کلی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به چندین روش مختلف تولید می‌شوند که روش مورد نظر و قابل استفاده در این تحقیق پرس داغ است که پارامترهای مختلفی مانند فشار، دما و اتمسفر را دارد. پارامترهای مؤثر برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی حاوی الماس؛ جنس زمینه و فلزات اضافه شده به آن، اندازه پودرها، آلیاژی بودن یا نبودن آن‌ها و خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی زمینه است. ضمن اینکه خواص ماتریس زمینه برای اتصال با الماس نیز بسیار تأثیرگذار است. همین‌طور الماس با اندازه‌های مختلف و پوشش‌ها فلزی و غیرفلزی برای بهبود فصل مشترک زمینه و الماس بسیار تأثیرگذار است. برای بررسی کارایی و خواص کارآمد این نوع کامپوزیت‌ها باید از روش‌های آزمایش خواص مکانیکی متعددی اعم از آزمون سایش، سختی و استحکام خمشی استفاده نمود.

۲- مواد اولیه و تحقیق

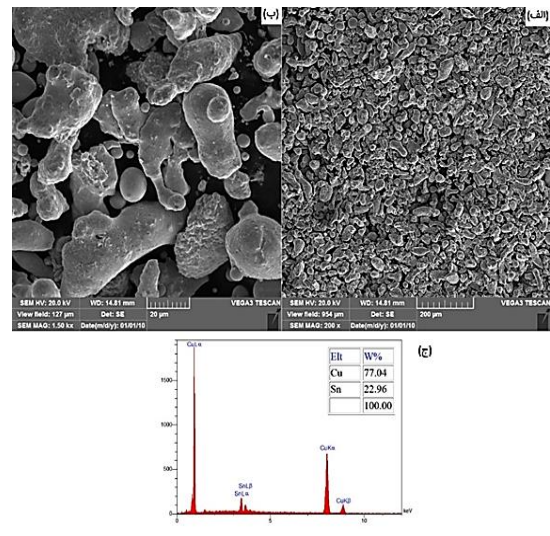
۲-۱- پودر برنز

پودر برنز با ترکیب Cu-20wt.%Sn ساخت کشور چین با درصد خلوص ۹۸٪ امتیاز شده به وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۴۵ میکرون استفاده شده است. ذرات پودر برنز مورد استفاده به صورت بیضی شکل هستند. مورفولوژی ذرات پودر برنز مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

^۱ Grazing Incidence X-ray



شکل ۵: الف) و ب) مورفولوژی ذرات الماس با اندازه‌ی ۱۵ میکرون به همراه
EDS آنالیز عنصری (ج)



شکل ۳: الف) و ب) مورفولوژی ذرات کبالت به همراه (ج) آنالیز عنصری
EDS

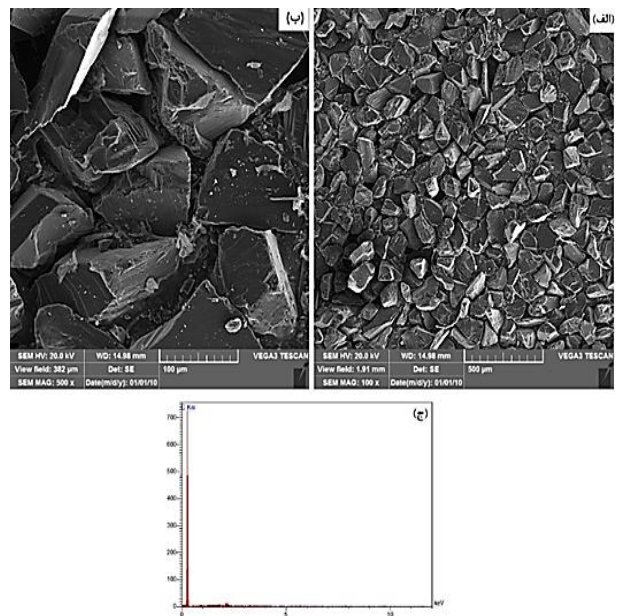
۳- تجهیزات

۳-۱- آسیاب پراورزی

برای انجام فرآیند آلیاژسازی مکانیکی Bronze-Co-Diamond از یک آسیاب گلوله‌ای از نوع سایشی مجهز به سیستم خنک‌کننده آبگرد و اتمسفر کنترل‌شده، استفاده شده است. تصویر دستگاه آسیاب سایشی مورد استفاده در این پروژه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: آسیاب سایشی



شکل ۴: الف) و ب) مورفولوژی ذرات الماس به همراه (ج) آنالیز عنصری
EDS

۲-۴- پودر الماس با اندازه ۱۵ میکرون

پودر الماس ساخت کشور چین با درصد خلوص ۹۹٪ با متوسط اندازه ذره ۱۵ میکرون استفاده شده است. ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت گوشه‌دار است (شکل ۵).



شکل ۸: سیستم پرس داغ تحت اتمسفر خنثی

۴- آزمون‌ها

۴-۱- بررسی ریزساختار

تغییر ریزساختار نمونه‌های زینتر شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به طیف‌سنج EDS مورد بررسی قرار گرفته است. برای مطالعه ریزساختار نمونه‌های زینتر شده، سطح قطعات با سمباده‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ سمباده‌زنی و پولیش شده‌اند.

۴-۲- استحکام خمشی و سختی سنجی

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های زینتر شده از آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای و سختی سنجی راکول B استفاده شده است. آزمون خمش سه نقطه‌ای تحت استاندارد ASTM D790 انجام شد. نمونه‌های خمش با مقطع مستطیل دارای طول ۳۰ میلی‌متر، ضخامت ۳ میلی‌متر و عرض ۵ میلی‌متر هستند. سرعت حرکت فک mm/min ۰/۶ و طول تکیه‌گاه ۲۳ میلی‌متر است. آزمون خمش، با دستگاه Santam STM 150، ساخت کشور ایران صورت پذیرفته است. استحکام خمشی توسط فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

$$\delta = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (1)$$

در رابطه فوق، σ استحکام خمشی، F نیروی وارد شده بر قطعه، L طول تکیه‌گاه، b عرض و d ضخامت نمونه خمش است.

۴-۳- چگالی سنجی

چگالی نمونه‌ها، به روش غوطه‌وری یا ارشمیدس طبق استاندارد ASTM B962 اندازه‌گیری شده است. چگالی تئوری توسط قانون مخلوط‌ها محاسبه شده است.

۳-۲- ترازو

برای توزین پودرها، از ترازو کیا الکترونیک مدل BL2 با دقت یک صدم گرم استفاده شده است.

۳-۳- گلاوباکس^۱

برای جلوگیری از اکسیداسیون پودرهای آسیاب شده در حین تخلیه محفظه آسیاب، کلیه مراحل باز کردن درب محفظه آسیاب و تخلیه آن، در گلاوباکس و تحت اتمسفر گاز خنثی آرگون انجام گرفته است.

۳-۴- پرس هیدرولیک

به منظور متراکم‌سازی نمونه‌ها برای آزمون احتراق و آزمون‌های مکانیکی از دستگاه پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰ تن مجهز به سنسور تنظیم و نگهداری فشار استفاده شده است. در شکل ۷ تصویر این دستگاه نشان داده شده است.



شکل ۷: پرس هیدرولیک ۱۰۰ تن مجهز به سنسور تنظیم و نگهداری فشار

۳-۵- کوره و پرس تحت اتمسفر خنثی

به منظور تفجوشی پرس داغ نمونه‌های Bronze-Co-Diamond از محفظه تحت اتمسفر با دمای کاری ۱۰۰۰°C استفاده شده است (شکل ۸).

۳-۶- قالب

برای پرس سرد و پرس گرم و تفجوشی نمونه‌ها از قالب گرم‌کار با قطر ۴ cm و ارتفاع ۱۰ cm از جنس فولاد گرم کار H13 استفاده شده است.

¹ Glove Box

پودرهای مس و قلع در نمونه‌های مجزا از قبل به‌صورت پودر از پیش آماده‌شده برنز استفاده‌شده‌اند.

۳-۵- آسیاب پرانرژی

برای تهیه پودرهای کامپوزیتی، پودر زمینه برنز به همراه الماس (و پودر کبالت در برخی از نمونه‌ها) داخل محفظه آسیاب ریخته شد. مقدار ۲ درصد وزنی اسید استتاریک به‌عنوان PCA به‌منظور جلوگیری از چسبیدن پودر به گلوله‌های آسیاب اضافه شده است. نسبت وزن گلوله به پودر در این آسیاب ۱:۳۰ انتخاب‌شده که به مقدار ۹۰۰ گرم گلوله فلزی از جنس استیل ۳۰۴ به قطر ۵mm استفاده گردید. فرآیند آسیاب با سرعت ۴۳۰rpm و با سه مدت زمان ۴ ساعت در یک محفظه‌ی آبگرد برای نمونه‌های مربوطه انجام گردید.

۴-۵- زینتر نمونه‌های کامپوزیتی

پودرهای تولید شده به روش آسیاب پر انرژی با وزن ۳۰ گرم به درون قالب ریخته شده سپس با فشار ۲۰۰bar پرس شدند. پس از پرس سرد قالب به درون محفظه‌ی پرس داغ منتقل شد. به‌منظور اطمینان از خنثی بودن اتمسفر محفظه، گاز آرگون در طول فرآیند به داخل محفظه پرس داغ تزریق شد. پس از افزایش دما تا ۶۰۰°C، به‌منظور هم‌دما شدن قالب و پودرها، پس از یک ساعت فشار ۲۰۰MPa اعمال شد. پس از یک ساعت فشار حذف و کوره خاموش شد. پس از سرد شدن کوره، قطعه کامپوزیتی از قالب خارج شد.

۶- نتایج

۱-۶- چگالی

چگالی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده در جدول ۱ آورده شده است. مخلوط کامپوزیتی نمونه‌ها شامل کبالت با وزن مخصوص $8/9 \text{ g/cm}^3$ ، برنز Cu-15Sn با وزن مخصوص $8/68 \text{ g/cm}^3$ ، الماس D15 و D100 با وزن مخصوص $3/5 \text{ g/cm}^3$ و چگالی تئوری با استفاده از قانون مخلوط و چگالی نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس محاسبه گردید. با بررسی نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود که چگالی نسبی نمونه‌ها بین ۹۶٪ تا ۹۹٪ هستند.

شکل ۱۰ نتایج به‌دست‌آمده از آزمون چگالی سنجی را نشان می‌دهد. در این شکل محور سمت چپ نشان‌دهنده چگالی ظاهری نمونه‌ها است و محور سمت راست بیان‌کننده‌ی میزان چگالی نسبی نمونه‌ها است.

$$\rho_c = (\rho_m X_m) + (\rho_f X_f) \quad (2)$$

در رابطه بالا ρ چگالی الیاف یا ماتریس و X درصد آن‌ها می‌باشد.

۴-۴- آزمون سایش

کلیه آزمایش‌های سایش در یک سرعت و مسافت لغزش ثابت و بار اعمالی 20N صورت پذیرفته است. آزمایش‌های انجام شده به روش پین روی دیسک فولادی سخت شده در دمای محیط و در مسافت ۱۰۰۰m انجام‌شده‌اند. در انتهای هر مرحله، ابتدا سطح نمونه‌ها توسط یک برس نرم تمیز و با الکل شسته شده و سطح آن‌ها موردبررسی قرار گرفته است. در شکل ۹ تصویر دستگاه آزمون سایش نشان داده شده است.



شکل ۹: دستگاه آزمون سایش به روش پین روی دیسک

۵- روش انجام پروژه

مراحل ساخت نمونه‌ها در این پژوهش شامل فراوری پودر کامپوزیتی، تفجوشی پودرها به روش پرس داغ است. در ادامه هر یک از این مراحل تشریح خواهد شد.

۱-۵- تهیه انواع پودر کامپوزیت

۲-۵- تعیین درصدهای عناصر فلزی مختلف و نوع

تقویت‌کننده‌ی الماس

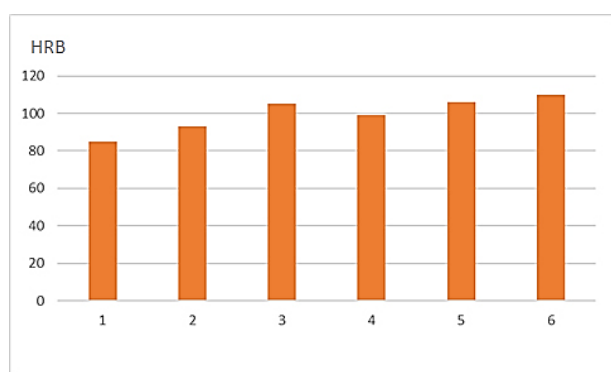
به‌منظور بررسی اثر مقدار الماس بر خواص کامپوزیت برنز-الماس، مقادیر ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد الماس به زمینه برنز اضافه شده است. همچنین برای بررسی اثر افزودن کبالت بر خواص کامپوزیت‌ها، مقدار ۱۰ درصد وزنی کبالت به برخی از نمونه‌ها اضافه گردید. ابتدا پودر برنز با نسبت ترکیب 85Cu-15Sn و سپس در نمونه‌های بعدی با اضافه کردن ۹ درصد وزنی کبالت به ترکیب، تهیه شدند. لازم به ذکر است

جدول ۱: چگالی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده

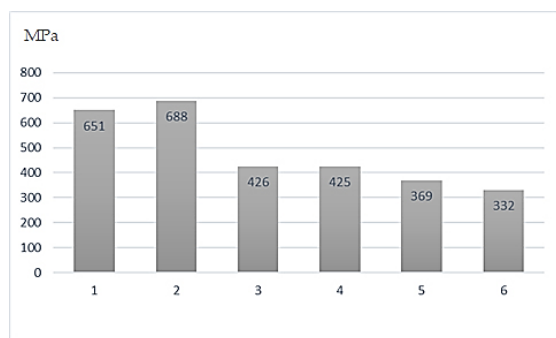
نمونه	چگالی نمونه	چگالی تئوری	چگالی نسبی
۱	۸/۶۱	۸/۶۸۰	۹۹/۱
۲	۸/۵۹	۸/۷۰۲	۹۸/۷
۳	۷/۹۵	۸/۱۸۴	۹۷/۱
۴	۸/۰۷	۸/۲۸۷	۹۷/۳
۵	۷/۹۳	۸/۱۸۴	۹۶/۸
۶	۷/۷۶	۸/۰۸۰	۹۶

۴-۳- استحکام خمشی

در شکل ۱۲ نتایج استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های ۱ تا ۶ آورده شده است. با مشاهده شکل ۱۲ می‌توان گفت حضور کبالت در زمینه برنز باعث ریزدانه شدن و توزیع یکنواخت فازهای بین فلزی زمینه می‌شود که در نتیجه استحکام خمشی نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ افزایش یافته است. همچنین با اضافه کردن الماس به زمینه فلزی، استحکام خمشی کاهش می‌یابد که احتمالاً این کاهش به دلیل حضور ذرات سرامیکی الماس در زمینه برنز است و هرچه درصد وزنی الماس افزایش می‌یابد، استحکام خمشی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۱: مقادیر سختی نمونه‌های ساخته شده با اندازه‌گیری به روش راکول B (HRB)



شکل ۱۲: نتایج استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی

۴-۴- بررسی سطوح شکست

شکل ۱۳ تا شکل ۱۸ به ترتیب تصاویر سطح شکست حاصل از آزمون خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های ۱ تا ۶ را نشان می‌دهند. شکل ۱۳ سطح شکست نمونه ۱ که حاوی پودر آلایژی آسیاب نشده برنز را نشان می‌دهد، با مشاهده دیپل‌ها و سطح برآمده که در شکل ۱۳-ب نشان داده شده، می‌توان گفت که در این نمونه شکست نرم اتفاق افتاده است. در شکل ۱۴ مربوط به نمونه ۲ به‌طور واضحی مشخص است که رشد ترک از میان دانه‌ها عبور کرده و شکست ترد اتفاق افتاده است و

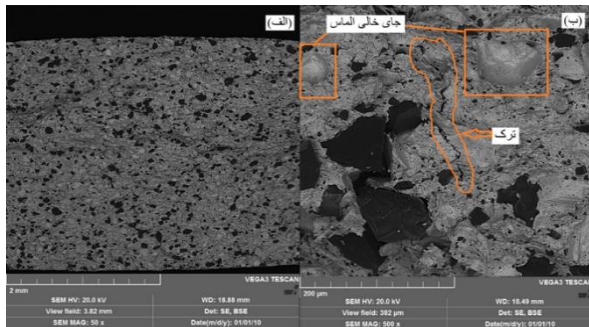


شکل ۱۰: نتایج به‌دست آمده از آزمون چگالی

با توجه به شکل ۱۰، نمونه‌های ۱ و ۲ که بدون الماس هستند چگالی بیشتری نسبت به نمونه‌های دارای الماس دارند و دلیل آن حضور الماس است؛ زیرا چگالی الماس بسیار کمتر از برنز است و با افزایش درصد وزنی آن، چگالی کامپوزیت کاهش می‌یابد. با مقایسه چگالی نسبی نمونه‌های ۴ تا ۶ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش الماس میزان شکل‌پذیری زمینه در حین تفجوشی پرس داغ کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه حفرات بسیار ریز در ساختار باقی می‌ماند و باعث می‌شود که چگالی نسبی کامپوزیت‌ها کمتر از نمونه‌های آلایژی باشند. همچنین، عدم اتصال مناسب زمینه و ذرات الماس در فصل مشترک با افزایش درصد الماس، افزایش می‌یابد و این امر نیز باعث کمتر شدن چگالی نسبی می‌شود.

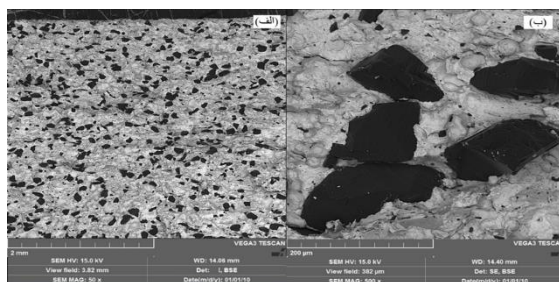
۴-۵- سختی سنجی

شکل ۱۱ مقادیر سختی نمونه ۱ تا ۶ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سختی نمونه ۲ بیشتر از سختی نمونه ۱ است که علت آن می‌تواند حضور کبالت در زمینه برنز و ریز شدن دانه‌ها و توزیع یکنواخت فازهای مس-قلع در زمینه باشد. همچنین افزودن الماس به زمینه برنز باعث افزایش سختی از HRB ۸۵ به HRB ۱۱۰ در نمونه حاوی ۱۲ درصد وزنی الماس (نمونه ۶) می‌شود.



شکل ۱۶: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۴ (الماس ۸ wt%)

شکل ۱۷ و شکل ۱۸ تصاویر SEM سطح شکست نمونه‌های ۵ و ۶ را نشان می‌دهد. در این دو نمونه توزیع الماس‌ها مناسب بوده و تخریب کمتری در سطح آن‌ها مشاهده می‌شود. در این دو نمونه برخلاف نمونه‌هایی که ۴ ساعت آسیاب شده بودند دیمپل‌هایی مشاهده می‌شود که اندازه‌های کوچکی دارند و با توجه به اندازه‌شان می‌توان گفت که مربوط به الماس‌ها نیستند و این دیمپل‌ها در زمینه کامپوزیت شکل گرفته‌اند و می‌توان گفت تقریباً در زمینه شکست نرم-تری نسبت به نمونه‌ها با آسیاب ۴ ساعت اتفاق افتاده است و نتایج استحکام خمشی (شکل ۱۲) این را تأیید می‌کند.

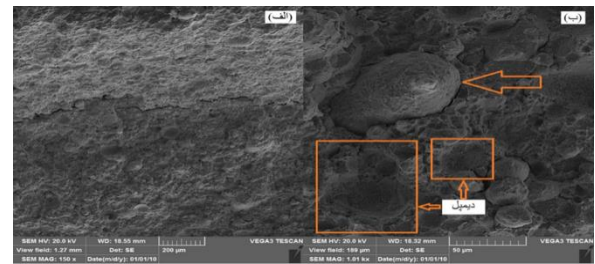


شکل ۱۷: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۵ (الماس ۱۰ wt%)

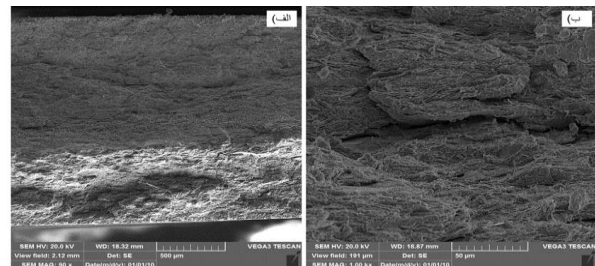
۴-۵- بررسی رفتار سایشی

یکی از راهکارهای مؤثر جهت مطالعه رفتار سایشی مواد، بررسی سطوح سایش از نظر مورفولوژی و ترکیب شیمیایی سطح، میزان و تغییرات ضریب اصطکاک، لایه‌های شکل گرفته روی سطح و براده‌های حاصل از سایش آن است. در ادامه با استفاده از تصاویر میکروسکوپی، سطح سایش، ذرات ناشی از سایش، نمودارهای اصطکاک و آنالیزهای عنصری نمونه‌های ۱ تا ۶ بررسی می‌شوند.

می‌توان گفت که این اتفاق به دلیل آسیاب شدن پودرها و ریزدانه شدن آن‌ها است.



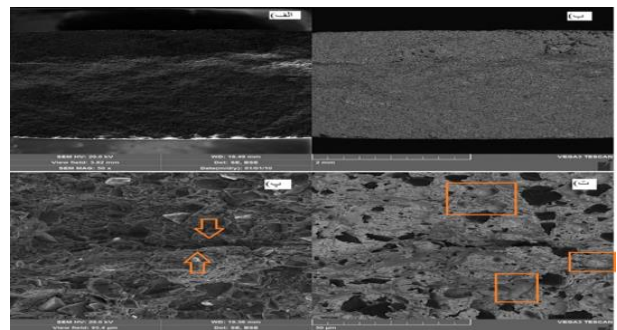
شکل ۱۳: تصویر SEM سطح شکست نمونه ۱ (برنز)



شکل ۱۴: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۲ (برنز-کبالت)

شکل ۱۵ تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۳ که حاوی الماس ۱۵ میکرون بود را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که الماس در نمونه به‌طور مناسبی توزیع شده و ساختاری همگن در کنار زمینه را تشکیل داده است. در این نمونه به علت ریز بودن اندازه الماس‌ها جدایش الماس در تصاویر دیده نمی‌شود و به نظر می‌رسد اتصال مناسبی بین ذرات الماس و زمینه برقرار باشد. در این شکل یک ترک دیده می‌شود که چندان عمیق نبوده و رفتار آن با الماس‌ها قابل‌رویت نیست.

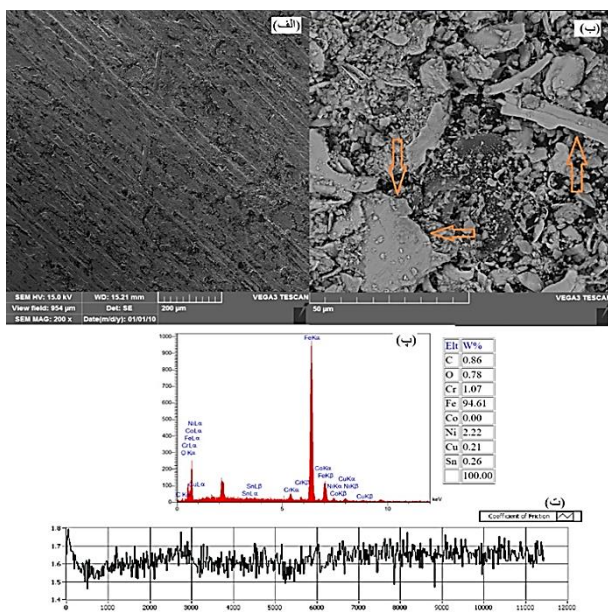
شکل ۱۶ تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۴ را نشان می‌دهد. در این نمونه توزیع الماس مناسب بوده است. در این نمونه جدایش سطحی الماس مشاهده می‌شود.



شکل ۱۵: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۳ (برنز- الماس با اندازه ۱۵ میکرون)

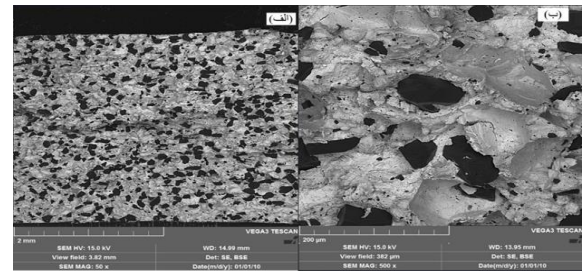
مقاومت به سایش بالاتری نسبت به نمونه ۱ دارد و می‌توان گفت این اتفاق به دلیل وجود کربالت در ترکیب نمونه ۲ است.

شکل ۲۱-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۳ را نشان می‌دهد در این شکل مشاهده می‌شود که خطوط سایش در سرتاسر نمونه به وجود آمده‌اند و هیچ‌گونه کنده‌شدگی از سطح نمونه مشاهده نمی‌شود. پس می‌توان گفت که این نمونه رفتار سایش خراشان بسیار مناسبی از خود نشان داده است. شکل ۲۱-ب براده‌های حاصل از سایش نمونه ۳ را نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود براده‌های به وجود آمده تماماً از نوع خراشان بوده است. به علت اندازه ۱۵ میکرونی الماس‌ها این براده‌های به وجود آمده ریز هستند. شکل ۲۱-پ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک نمونه ۳ را نشان می‌دهد.



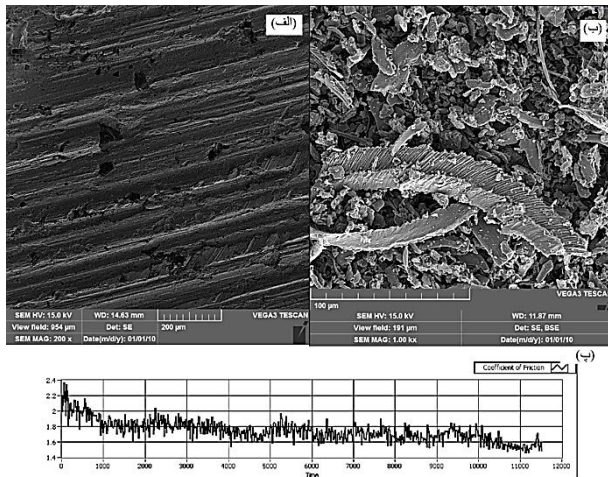
شکل ۱۹: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۱ (برنز)

شکل ۲۲-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۴ را نشان می‌دهد. در این نمونه توزیع الماس مناسب بوده و تخریب کمتری صورت گرفته است. در این نمونه شیارهای طولی منظمی با عمق بالا مشاهده می‌شود که بیانگر مکانیزم سایش خراشان در این نمونه است و در شکل ۲۲-ب مشاهده می‌شود که براده‌های حاصل از سایش نمونه ۴ نسبتاً درشت بوده و با توجه به مورفولوژی آن‌ها می‌توان گفت که از سطح دیسک براده‌های طولی جدا شده‌اند که این موضوع نیز بیانگر وجود سایش چسبان در نمونه است. به‌طور کلی هم سایش خراشان و هم سایش چسبان در این نمونه مشاهده می‌شود و می‌توان گفت که مقاومت به



شکل ۱۸: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۶ (الماس ۱۲ wt% با آسیاب ۳۰ دقیقه)

شکل ۱۹-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۱ را نشان می‌دهد، در این شکل مشاهده می‌شود که خطوط منظمی طی سایش در سطح به وجود آمده باین‌حال پستی و بلندی‌های کوچکی در نمونه مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد تغییر شکل پلاستیک در این نمونه وجود داشته ولی شدید نبوده است. شکل ۱۹-ب براده‌های حاصل از سایش نمونه ۱ را نشان می‌دهد و مشخص است که براده‌های به نسبت بزرگ با اشکال مختلف دیده می‌شود و با توجه به آنالیز EDS این ذرات که در شکل ۱۹-پ آورده شده است، می‌توان فهمید که اکثر این براده‌های تشکیل شده آهن بوده و از سطح دیسک سایش کنده شده است و شکل و ظاهر این براده‌ها نشان می‌دهد که نیروی اصطکاک بین دو نمونه بالا بوده که ذرات به این شکل از سطح دیسک کنده شده‌اند. همچنین می‌توان گفت که این نمونه مقاومت به سایش بالایی را دارا است. شکل ۱۹-ت نمودار ضریب اصطکاک نمونه ۱ برحسب زمان را نشان می‌دهد. شکل ۲۰-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۲ را نشان می‌دهد. در تصویر دیده می‌شود که مناطق مختلفی از سطح نمونه کنده شده و در مناطق دیگر تغییر شکل پلاستیک شدیدی دیده می‌شود. باین‌حال مناطقی هم کاملاً به‌صورت خطوط صاف وجود دارد که بیانگر سایش خراشان است. شکل ۲۰-ب براده‌های حاصل از سایش را نشان می‌دهد که اشکال بزرگ و متفاوتی دارند و با توجه به آنالیز EDS این براده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که اغلب این براده‌ها از سطح دیسک کنده شده‌اند و اصطکاک بین دیسک و نمونه بالا بوده و به همین دلیل هم در نمونه و هم در دیسک سایش چسبان اتفاق افتاده و براده‌هایی با اندازه‌های بزرگ کنده شده‌اند. شکل ۲۰-ت نمودار ضریب اصطکاک نمونه ۲ را نشان می‌دهد. در این نمونه ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه ۱ مشاهده می‌شود به‌طوری‌که در ابتدای آزمون ضریب اصطکاک به‌طور متوسط ۱/۸ و در انتهای آزمون ۱/۹ است و تقریباً روند ثابتی دارد. به‌خاطر بالاتر بودن ضریب اصطکاک براده‌های درشت‌تری نسبت به نمونه قبلی به وجود آمد و در کل بنابر دلایل ذکر شده این نمونه

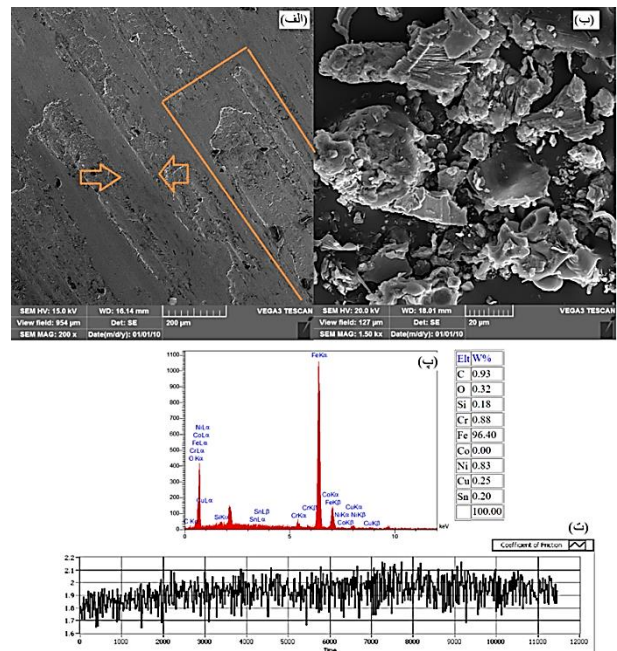


شکل ۲۲: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ای حاصل از سایش و پ) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۴ (برنز-آلماس) ۸٪ (wt)

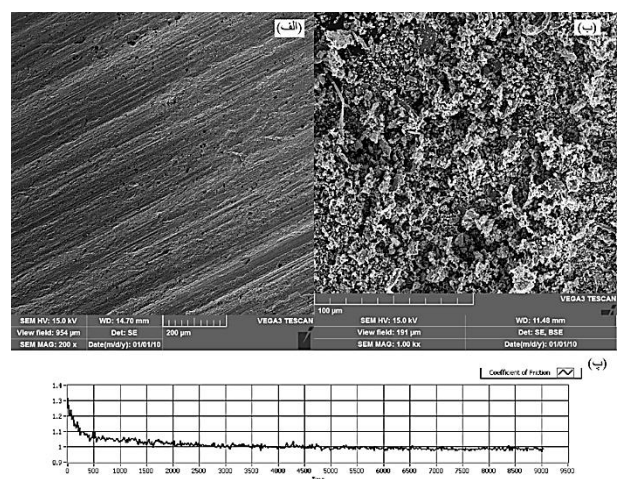
شکل ۲۳-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۵ را نشان می‌دهد در این نمونه مشاهده می‌شود که آلماس وضعیت ظاهری بهتری دارد و حداقل تخریب مشاهده می‌شود به شکلی که در طول فرآیند سایش زمینه‌ی کامپوزیت دچار سایش شدیدی نشده است. دلیل این اتفاق می‌تواند اتصال خوب آلماس و دیسک سایش باشد به نحوی که آلماس‌ها اجازه تماس دیسک به زمینه کامپوزیت را نمی‌دهند و سایش غالباً با آلماس انجام می‌شود. شکل ۲۳-ب براده‌های حاصل از سایش نمونه ۵ را نشان می‌دهد که در آن مشاهده می‌شود که براده‌های ریزتری نسبت به براده‌های نمونه ۴ به وجود آمده که این موضوع بیانگر این است که نمونه با مکانیزم سایش خراشان سطح دیسک سایش را تحت تأثیر قرار داده است. شکل ۲۳-پ تغییرات ضریب اصطکاک نمونه ۵ را نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک در این نمونه پایین تر از نمونه ۴ بوده و نحوه کاهش ضریب اصطکاک در این نمونه بسیار مناسب است و بیانگر مکانیزم سایش خراشان مناسبی است.

شکل ۲۴-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۶ را نشان می‌دهد. در این نمونه مشاهده می‌شود که دیسک سایش نتوانسته سطح این نمونه و یا زمینه‌ی آن را تخریب کند و هیچ‌گونه خطوط طولی و یا کنده‌شدگی در سطح نمونه مشاهده نمی‌شود و با توجه به شکل ۲۴-ب می‌توان گفت که نمونه کاملاً دیسک را خورده و در طی فرآیند سایش هیچ تخریبی در خود نمونه صورت نگرفته است همان‌طور که در شکل ۲۴-پ مشاهده می‌شود رفتار سایشی این نمونه همانند نمونه ۵ بوده و تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود ولی در این نمونه با توجه به

سایش مناسبی نسبت به نمونه‌های حاوی کبالت، ندارد. شکل ۲۲-پ ضریب اصطکاک نمونه ۴ را نشان می‌دهد که دارای یک منحنی نزولی است ولی همچنان ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه‌های دارای کبالت دارد.



شکل ۲۰: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ای حاصل از سایش و پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۲ (برنز-کبالت)



شکل ۲۱: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ای حاصل از سایش و پ) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۳ (برنز-آلماس) با اندازه ۱۵ میکرون

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سختی، سایش و اثر حضور درصدهای وزنی مختلف ذرات الماس بر خواص کامپوزیت برنز الماس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد نمونه‌هایی که بدون الماس هستند چگالی بیشتری نسبت به نمونه‌های دارای الماس دارند. همچنین با اضافه کردن الماس به زمینه فلزی، استحکام خمشی کاهش می‌یابد که احتمالاً این کاهش به دلیل حضور ذرات سرامیکی الماس در زمینه برنز است و هرچه درصد وزنی الماس افزایش می‌یابد، استحکام خمشی کاهش پیدا می‌کند. ضمن اینکه با افزایش درصد الماس، مقاومت به سایش نیز افزایش پیدا می‌کند.

۸- منابع

[1] C. Artini, M. L. Muolo, and A. Passerone, "Diamond-metal interfaces in cutting tools: a review," *Journal of Materials Science*, Vol. 47, No. 7, pp. 3252–3264, 2012, doi: [10.1007/s10853-011-6164-6](https://doi.org/10.1007/s10853-011-6164-6).

[2] L. J. de Oliveira, R. P. da R. Paranhos, R. d. S. Guimarães, G. S. Bobrovitchii, و M. Filgueira, "Use of PM Fe-Cu-SiC composites as bonding matrix for diamond tools," *Powder Metallurgy*, Vol. 50, No. 2, pp. 148–152, 2007. [Online]. Available: doi: [10.1179/174329007X161982](https://doi.org/10.1179/174329007X161982)

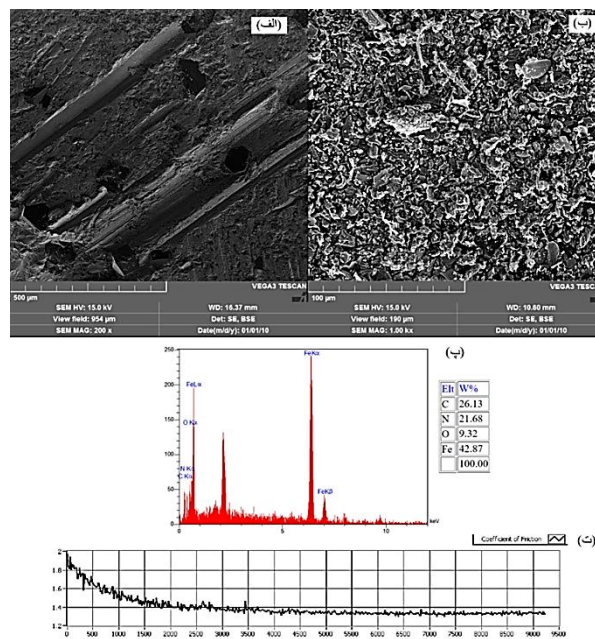
[3] Y.-Z. Hsieh و S.-T. Lin, "Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 72, No. 2, pp. 121–125, 2001. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0254-0584\(01\)00419-9](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00419-9)

[4] P. Han, F.-r. Xiao, W.-j. Zou, و B. Liao, "Effect of different oxides addition on the thermal expansion coefficients and residual stresses of Fe-based diamond composites," *Ceramics International*, Vol. 40, No. 3, pp. 5007–5013, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ceramint.2013.10.130](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.10.130)

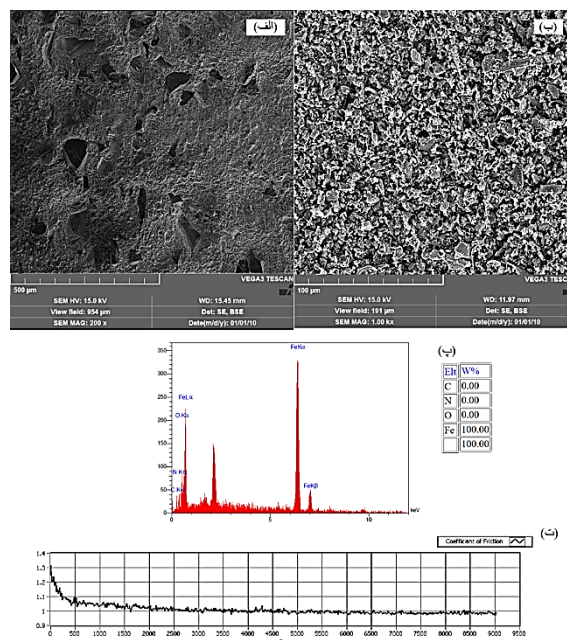
[5] Y.-Z. Hsieh, J.-F. Chen, و S.-T. Lin, "Pressureless sintering of metal-bonded diamond particle composite blocks," *Journal of Materials Science*, Vol. 35, pp. 5383–5387, 2000. [Online]. Available: doi: [10.1023/A:1004855130887](https://doi.org/10.1023/A:1004855130887)

[6] D. Lison, "Human toxicity of cobalt-containing dust and experimental studies on the mechanism of

تصویر سایش آن می‌توان گفت که مقاومت به سایش بسیار بالایی در آن مشاهده شد.



شکل ۲۳: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ای حاصل از سایش و پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۵ (برنز-کبالت-الماس ۱۰ wt% با آسیاب ۱ ساعت)



شکل ۲۴: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ای حاصل از سایش، پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۶ (برنز-کبالت-الماس ۱۲ wt% با آسیاب ۳۰ دقیقه)

- [15] H. Dong, "A study of mechanical properties and microstructure of Cu-based matrixes for diamond ultrathin sawing," *Results in Physics*, Vol. 12, pp. 748–753, 2019. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.rinp.2018.12.063](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.063)
- [16] H. Tönshoff, H. Hillmann-Apmann, و J. Asche, "Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications," *Diamond and Related Materials*, Vol. 11, No. 3-6, pp. 736–741, 2002. [Online]. Available: doi:[10.1016/S0925-9635\(01\)00526-2](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00526-2)
- [17] R. German, *Sintering: from empirical observations to scientific principles*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [18] D. M. Ştefănescu, "Issues in liquid processing of particulate metal matrix composites," in *Key Engineering Materials*, Vol. 79: Trans Tech Publ, pp. 75–90, 1993. [Online]. Available: doi:[10.4028/www.scientific.net/KEM.79-80.75](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.79-80.75)
- [19] J. T. Blucher, "Discussion of a liquid metal pressure infiltration process to produce metal matrix composites," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 30, No. 3, pp. 381–390, 1992. [Online]. Available: doi:[10.1016/0924-0136\(92\)90206-A](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90206-A)
- [20] M. Flemings, "Semi-solid forming: the process and the path forward," *Metallurgical Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, 2000.
- [21] H. Moriguchi, K. Tsuduki, A. Ikegaya, Y. Miyamoto, و Y. Morisada, "Sintering behavior and properties of diamond/cemented carbides," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 25, No. 3, pp. 237–243, 2007. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.ijrmhm.2006.08.007](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2006.08.007)
- [22] J. V. Naidich, "The wettability of solids by liquid metals," in *Progress in Surface and Membrane Science*, Vol. 14: Elsevier, pp. 353–484, 1981. [Online]. Available: doi: [10.1016/B978-0-12-571814-4.50012-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-571814-4.50012-1)
- [23] U. E. Klotz, C. Liu, F. A. Khalid, و H.-R. Elsener, "Influence of brazing parameters and alloy composition on interface morphology of brazed diamond," *Materials Science and Engineering: A*, interstitial lung disease (hard metal disease)," *Critical Reviews in Toxicology*, Vol. 26, No. 6, pp. 585–616, 1996. [Online]. Available: doi:[10.3109/10408449609089892](https://doi.org/10.3109/10408449609089892)
- [7] J. Gál, A. Hursthouse, P. Tatner, F. Stewart, و R. Welton, "Cobalt and secondary poisoning in the terrestrial food chain: data review and research gaps to support risk assessment," *Environment International*, Vol. 34, No. 6, pp. 821–838, 2008. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.envint.2007.12.004](https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.004)
- [8] J. C. Sung و M. Sung, "The brazing of diamond," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 27, No. 2, pp. 382–393, 2009. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.ijrmhm.2008.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.09.006)
- [9] L. Wang, Q. Xia, و Y. Li, "The effects of high pressure processing and slightly acidic electrolysed water on the structure of *Bacillus cereus* spores," *Food Control*, Vol. 79, pp. 94–100, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.foodcont.2017.03.025](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.03.025)
- [10] J. S. Konstanty, E. Baczek, A. Romanski, و D. Tyrła, "Wear-resistant iron-based Mn–Cu–Sn matrix for sintered diamond tools," *Powder Metallurgy*, Vol. 61, No. 1, pp. 43–49, 2018. [Online]. Available: doi:[10.1080/00325899.2017.1412356](https://doi.org/10.1080/00325899.2017.1412356)
- [11] X. Zhao و L. Duan, "A review of the diamond retention capacity of metal bond matrices," *Metals*, Vol. 8, No. 5, p. 307, 2018. [Online]. Available: doi:[10.3390/met8050307](https://doi.org/10.3390/met8050307)
- [12] R. Colaço و R. Vilar, "Abrasive wear of metallic matrix reinforced materials," *Wear*, Vol. 255, No. 1-6, pp. 643–650, 2003. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0043-1648\(03\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00081-8)
- [13] J. Kauzlarich و J. Williams, "Archard wear and component geometry," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 215, No. 4, pp. 387–403, 2001. [Online]. Available: doi:[10.1243/1350650011543286](https://doi.org/10.1243/1350650011543286)
- [14] J. Zhang, "Wear regimes and transitions in ceramic particulate-reinforced aluminum alloys," 1995.

Mechanical Engineering, Vol. 19, No. 3, p. 354, 2008.

[26] X. Xu, X. Tie, و H. Wu, "The effects of a Ti coating on the performance of metal-bonded diamond composites containing rare earth," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 25, No. 3, pp. 244–249, 2007. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.ijrmhm.2006.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2006.07.001)

Vol. 495, No. 1-2, pp. 265–270, 2008. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.msea.2007.10.118](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.118)

[24] X. Zhao و L. Duan, "A review of the diamond retention capacity of metal bond matrices," *Metals*, Vol. 8, No. 5, p. 307, 2018. [Online]. Available: doi:[10.3390/met8050307](https://doi.org/10.3390/met8050307)

[25] Y. Zhou, F. Zhang, C. Wang, "Brazing of Diamond by Ag-Cu-Zn Alloy with Cr Powder and the Microstructure of the Interfaces," *China*



Design and construction of a multi-purpose agricultural rotator with movable arms

Mohammad Reza Ebrahimian^{*1} , Farzad Rahmani² , Amirreza Barzegar Shokri³

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

3.M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

Abstract

Tillage operations are very important in various aspects, including improving the physical quality of the soil, maintaining moisture, increasing organic matter, and reducing erosion, and play a fundamental role in providing a suitable substrate for optimal plant growth... In this regard, the design and construction of a multi-purpose rotivator with the aim of simultaneously performing tillage and planting operations creates a revolution in increasing productivity, reducing fuel consumption, time, and total cost of production. This device, with its combined mechanisms, is capable of performing operations such as breaking up clods, aerating the soil, preparing the seedbed, and digging adjustable furrows simultaneously. The double-sided folding structure and design compatible with road transport conditions are other important features of this advanced tiller. In addition to the technical advantages, using this device with modern technologies will help automate agricultural operations, reduce resource losses (such as water, energy, and fertilizer), and adapt to the principles of sustainable agriculture. Due to the lack of a similar domestic model and its affordable price compared to foreign models, this device can play an effective role in the development of agricultural mechanization in the country. Thus, the multipurpose tiller, as an efficient, smart, and economical tool, will pave the way for increasing productivity, conserving resources, and achieving sustainable development goals in modern agriculture.

Keywords

Rotivator

Optimum tillage operations

Productivity

Product growth

Mechanization

Received: 17.05.2025

Revised: 11.07.2025

Accepted: 07.08.2025

*Corresponding Author

Mohammad Reza Ebrahimian

Email

m.ebrahimian@kar.ac.ir

1- Introduction

As one of the most important tillage equipment with the ability to adjust working depth and high crushing power, the rotavator plays an important role in preparing the seedbed and mixing plant residues. L and C type blades are suitable for use at different depths and, with their special design, increase soil quality and reduce soil compaction [1]. Figure 1 shows a view of a rotivator and L and C blades [2]. Control systems such as depth adjustment skids, a spring-loaded tailgate to adjust the amount of soil crushing, and front shock absorbers to correct the tractor wheel path help

improve the machine's performance in various operations [3]. The introduced rotavator, considering features such as optimal fuel consumption, diversity in working width, and applicability in different conditions, is known as a versatile, efficient tool that is compatible with modern agriculture [4].

How to Cite this Article:

[1] M. R. Ebrahimian, F. Rahmani, and A. Barzegar Shokri, "Design and construction of a multi-purpose agricultural rotator with movable arms," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 27–45, 2026, <https://doi.org/10.22034/stme.2025.524280.1131>. (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232



Figure 1: View of a rotavator and L and C blades

Arthur Clifford Howard invented the first electric rotary tiller in 1912 [5]. He used a steam tractor engine and rotating discs to create a new method of tillage that broke up the soil without compacting it. This innovation resulted in a more uniform soil breakup, making it ready for farming [6]. Howard designed various models including rotary shovels for the Fordson tractor and hand-operated machines, and he introduced a machine with an internal combustion engine and five rotary cultivators [7]. Howard's first rotavator was designed for a Fordson tractor and was powered by the tractor's pulley. In 1949, the lighter D-type model was introduced with smaller blades and a 20-inch rotor for Ferguson and Ford "Dearborn" tractors, which were connected to the tractor by four-point linkage arms [8]. The F-type model was introduced with a direct connection to the rear transmission and a 23-inch rotor, which was suitable for a variety of tractors. These machines enrich the soil for planting, remove unwanted roots and improve soil structure. Rotavators also contribute to sustainable agriculture with features such as cover crop planting and fertilizer mixing, improving crop yield and soil quality [9]. Early rotavators were prone to mechanical failure due to their heavy weight and high energy consumption. Repeated tillage with these machines can damage soil structure, causing compaction, erosion, and loss of organic matter [10]. These disadvantages, especially in wet soils, pose serious challenges for farmers, increasing energy and labor costs. Nordic research shows that soil compaction caused by heavy machinery can reduce crop yields by 5 to 15 percent [11]. Studies using CT scans show that structural damage to the soil remains even after 14 years. Climate change and increased rainfall make dry soils more vulnerable to compaction. Heavy machinery with a weight of up to 60 tons has intensified this problem,

and in deeper soil layers, the reduction in performance can be permanent. A rotavator consists of components such as a propeller shaft, slip clutch, gearbox, side drive, blades, soil guard, and gauge wheels. L-shaped blades made of high-carbon steel are ideal for shallow soil tillage, while C-shaped blades are more suitable for heavy soils. The device body is made of ST37 steel, offering high strength but low resistance to vibration. The gearbox housing is produced from gray cast iron or cast steel to withstand stresses. Universal joints are made of low-carbon steel, and wear strips are made of ST37 steel, which are flexible but susceptible to corrosion. These materials ensure the durability and performance of the equipment.

2- Research Methods

Unlike traditional plows that cause soil imbalance and compaction, the rotavator with its rotating blades prepares the soil uniformly. The physical, mechanical, and dynamic properties of the soil, such as strength and moisture content, directly influence the energy required for tillage. Understanding these properties is essential for designing blades and operational settings to improve efficiency and soil quality.

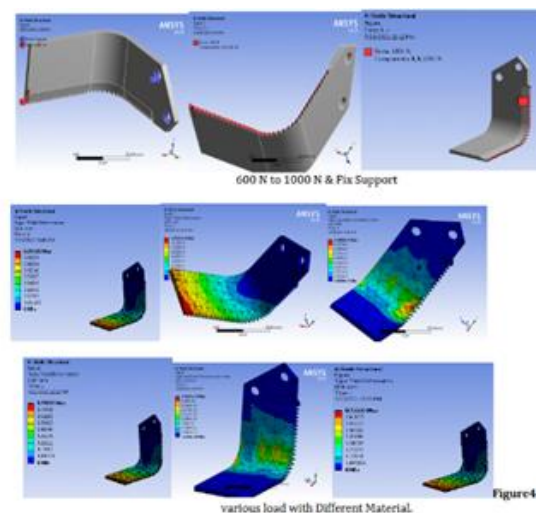


Figure 2: Blade analysis in ANSYS software

Gray cast iron versus structural steel were examined for blade material selection. Gray cast iron, with a permissible stress of 105 MPa, and structural steel, with 140 MPa, were analyzed. Under applied loads

of 600 and 1000 Newtons, the resulting stresses in both materials (42.832 and 74.283 MPa for gray cast iron; 42.505 and 73.234 MPa for structural steel) remained within safe limits, indicating design safety (Figure 2).

The deformation analysis of the blades showed that gray cast iron experienced a deformation of 1.4324 mm under a 1000 Newton load, while structural steel had a deformation of 0.79592 mm. Although gray cast iron is cheaper, it exhibits greater deformation, whereas structural steel, with higher efficiency, is a more suitable material for heavy-duty applications. Static analysis was conducted by varying the blade angles (85°, 90°, 95°, 100°, and 105°).

3- Results

The results indicated that the blade angle influences both stress and deformation. The optimal angle (95°, in the current design) provided a suitable balance between cutting efficiency and structural resistance. The results are presented in Figure 3.

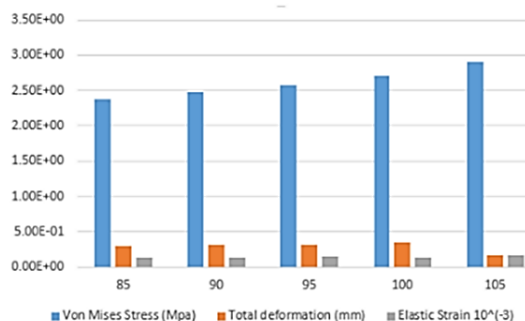


Figure 3: Static analysis diagram of blade angles

Soil Cutting Dynamics Simulation Soil cutting simulation was performed in Abaqus software (Figure 4) to investigate the behavior of the blades in interaction with the soil. The simulation showed that C-shaped blades with the appropriate cutting angle create less friction and introduce less reverse torque to the tractor.

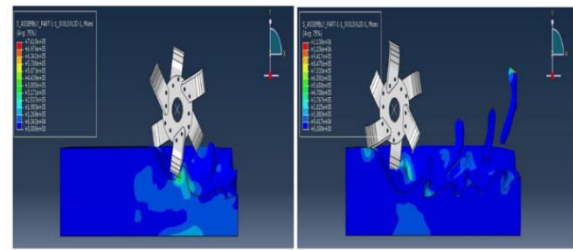


Figure 4: Soil shear dynamics simulator in Abaqus software

The three-point hitch system transfers tractor power from the PTO shaft to the rotor. The components of this system are made with a laser cutting machine, which offers high precision in cutting metals such as steel and aluminum. The system is precision-machined using laser cutting machines to produce high-quality flanges and covers. Rotavator performance is affected by factors such as blade configuration, direction of rotation, depth of tillage, ratio of peripheral speed to forward speed, and soil conditions. The rotavator is equipped with double-row ball bearings made of chrome steel (AISI 52100). The high resistance of these bearings to wear and corrosion ensures flexibility against impacts and long-term durability, which is essential for stable operation of the machine. The use of common parts not only reduced costs but also shortened production time. To reduce waste, sheets of similar thickness and dimensions were used as in other machines. The sheet cutting layout was designed to maximize material utilization and minimize waste. To increase durability, parts under static and bending stresses, such as the center hubs, were doubled. Increasing the diameter of the central gearbox shaft from 35 to 45 mm improved the rotavator's weight-bearing capacity and speed, and reduced maintenance costs. Material selection affects the performance, aesthetics, durability, and cost of the device. Materials such as ductile iron for the gearbox, chrome steel for the bearings, and ST57 steel for the chassis were selected. These materials have high resistance to abrasion, corrosion and impact. This study provides solutions for improving design and production, considering climatic conditions, crop type and tractor power. Needs assessment, a key process in rotavator design, involves identifying the needs of customers and the target market. Rotavator design involves

three main steps: 1) preliminary design to determine initial features, 2) supplementary design to address technical issues and improve specifications, and 3) product analysis to examine strengths and performance. These steps ensure that the final product meets quality and performance standards. The supplementary design focused on resolving technical and engineering issues. The material of the parts, construction, assembly, aesthetics, and compliance with environmental standards were also evaluated. This phase ensured that the rotavator met market requirements in terms of performance and durability. Materials such as ductile iron, chrome steel and ST57 steel were chosen for their strength and durability. Criteria such as strength, corrosion resistance, weight and environmental sustainability were considered. Materials that require less energy to produce or recycle were given priority. These choices not only improved the efficiency of the machine, but also reduced production and maintenance costs. For precise cutting of parts, the drawings were converted to DXF format for use in CNC laser cutting machines.

4- Conclusion

This study aimed to design and manufacture an advanced rotavator to improve agricultural productivity, reduce production costs, and increase the durability of the machine. Using experimental methods, software simulations (such as SolidWorks, ANSYS, and Abaqus), and mechanical analyses, the performance of the blades, power transmission systems, and structural components was investigated. Market need assessment and climate conditions helped in designing a product tailored to farmers' needs. The design process included preliminary, detailed, and analytical stages, ensuring device safety and efficiency. Analyses showed that selecting materials—such as unbreakable cast iron for gearboxes and chromium steel for bearings significantly impacted durability and performance. The C-shaped blades with optimal angles and serrated designs reduced friction and improved soil working. Folding mechanisms, hydraulic locks, and gearboxes enabled simultaneous soil cultivation and tillage. Simulations and final testing confirmed the

machine's satisfactory performance across different soil types and tractor capacities. The designed rotavator, equipped with features like a four-plate PTO, slip hubs, and multi-row bearings, reduced maintenance costs. Using CNC laser cutting and optimized component layout minimized manufacturing waste and increased precision. With a working width of 3.50 meters and foldable design, transportation became easier, and operator safety was ensured through safety guards. These innovations boosted agricultural productivity and made the product competitive in the global market.

This research not only contributed to developing an efficient rotavator but also provided a framework for designing agricultural machinery focusing on sustainability and cost-effectiveness. The findings can be used to improve other soil cultivation tools and advance smart agricultural technologies. Future research should focus on optimizing energy consumption, reducing environmental impacts, and integrating smart sensors for soil monitoring. This study represents a significant step toward sustainable agriculture and increasing productivity in areas with diverse climate conditions.

5-References

- [1] C. Manivelprabhu, N. Sangeetha, and T. Ramganes, "Design modification and structural analysis of rotavator blade by using HyperWorks 12.0," *Altair Technology Conference*, 2015.
- [2] S. K. Mandal, B. Basudev, and S. Mukherjee, "Optimization of design parameters for rotary tiller's blade," *Power*, Vol. 4, No. 5, 2013.
- [3] D. Prasad, P. Tupkari, P. Sharma, and A. Singh, "Computer aided design and analysis of rotavator blade," *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 312–317, 2014.
- [4] G. U. Shinde, J. M. Potekar, R. V. Shinde, and S. R. Kajale, "Design analysis of rotary tillage tool components by CAD-tool: rotavator," in *2011 International Conference on Environmental and Agriculture Engineering (IPCBE)*, Vol. 15, 2011.
- [5] G. U. Shinde and S. R. Kajale, "Computer aided engineering analysis and design optimization of

rotary tillage tool components,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 1–6, 2011. doi: [10.3965/j.issn.1934-6344.2011.03.001-006](https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2011.03.001-006).

[6] P. V. Labhsetwar, R. S. Lonkar, R. S. Rajurkar, and S. S. Arsod, “Design and failure analysis of rotavator blade by means of CAD and FEA tool,” *International Journal of Advances in Engineering and Management*, Vol. 4, No. 5, pp. 1341–1347, 2022, doi: [10.35629/5252-040513411347](https://doi.org/10.35629/5252-040513411347).

[7] G. M. Vegad and R. Yagva, “Design analysis and optimization of rotary tiller blades using computer software,” *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, Vol. 49, No. 1, pp. 43–49, 2018.

[8] K. C. Selvi, “A new blade design of rotary tiller and static analysis using computer-aided tool,”

Inmateh-Agricultural Engineering, Vol. 53, No. 3, 2017.

[9] D. Kumar and P. Mohanraj, “Design and analysis of rotavator blades for its enhanced performance in tractors,” *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, Vol. 1, No. 1, pp. 160–185, 2017.

[10] G. S. Reddy, J. Narsaiah, and G. Shashikala, “Dynamic analysis on tillage equipment used in agriculture using ANSYS software,” *Science and Technology*, Vol. 3, No. 7, 2017.

[11] S. K. Mandal, B. Bhattacharyya, S. Mukherjee, and A. K. Prasad, “Design optimization of rotary tiller blade using specific energy requirement,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 1257–1263, 2016. doi: [10.14741/ijcet/22774106/6.4.2015.31](https://doi.org/10.14741/ijcet/22774106/6.4.2015.31).



طراحی و ساخت رتیواتور چندمنظوره زراعی با بازوهای متحرک

محمدرضا ابراهیمیان^{۱*} ID، فرزاد رحمنی^۲ ID، امیررضا برزگر شکری^۳ ID

۱- استادیار، دانشکده مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

چکیده

عملیات خاک‌ورزی از جنبه‌های مختلفی چون بهبود کیفیت فیزیکی خاک، حفظ رطوبت، افزایش مواد آلی و کاهش فرسایش اهمیت زیادی دارد و نقشی اساسی در آماده‌سازی بستر مناسب برای رشد بهینه گیاه ایفا می‌کند. در این راستا، طراحی و ساخت رتیواتور چندمنظوره با هدف انجام هم‌زمان عملیات خاک‌ورزی و کاشت، تحولی در افزایش بهره‌وری، کاهش مصرف سوخت، زمان و هزینه تمام‌شده محصول ایجاد می‌کند. این دستگاه با داشتن مکانیزم‌های ترکیبی، قابلیت انجام عملیاتی نظیر خرد کردن کلوخ‌ها، تهویه خاک، آماده‌سازی بستر بذر و حفر جوی‌های قابل تنظیم را به‌صورت هم‌زمان دارد. ساختار تاشوی دوطرفه و طراحی سازگار با شرایط حمل‌ونقل جاده‌ای نیز از دیگر ویژگی‌های مهم این رتیواتور پیشرفته است. علاوه بر مزایای فنی، استفاده از این دستگاه با فناوری‌های روز، در جهت خودکارسازی عملیات کشاورزی، کاهش تلفات منابع (مانند آب، انرژی و کود) و سازگاری با اصول کشاورزی پایدار گام برمی‌دارد. به‌واسطهٔ نداشتن نمونه مشابه داخلی و قیمت مقرون‌به‌صرفه در مقایسه با نمونه‌های خارجی، این دستگاه می‌تواند سهم مؤثری در توسعه مکانیزاسیون کشاورزی کشور ایفا کند. بدین ترتیب، رتیواتور چندمنظوره به‌عنوان ابزاری کارآمد، هوشمند و اقتصادی، زمینه‌ساز افزایش بهره‌وری، حفظ منابع و دستیابی به اهداف توسعه پایدار در کشاورزی مدرن خواهد بود.

کلمات کلیدی

رتیواتور
عملیات خاک‌ورزی بهینه
بهره‌وری
رشد محصول
مکانیزاسیون

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

*نویسنده مسئول

محمدرضا ابراهیمیان

ایمیل

m.abrahimian@kar.ac.ir

۱- مقدمه

سامانه‌ها ضمن افزایش طول عمر مفید دستگاه، نیاز به تعمیرات مکرر را کاهش می‌دهند و امکان تنظیم سرعت چرخش تیغه‌ها را متناسب با نوع خاک و شرایط مزرعه فراهم می‌کنند [۲]. سیستم‌های کنترلی مانند اسکی‌های تنظیم عمق، درب عقب فنردار برای تنظیم میزان خرد شدن خاک، و سوک‌های جلو جهت اصلاح مسیر چرخ تراکتور، به بهبود عملکرد دستگاه در عملیات مختلف کمک می‌کنند. همچنین، طراحی بدنه دوتکه مقاوم، اتصال سه نقطه‌ای استاندارد، و وجود محافظ‌های ایمنی، باعث افزایش دوام و ایمنی در حین کار شده است [۳]. رتیواتور معرفی شده، با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی چون مصرف بهینه سوخت، تنوع در عرض کار، و قابلیت کاربرد در شرایط مختلف، به‌عنوان ابزاری همه‌کاره، کارآمد و سازگار با کشاورزی مدرن شناخته می‌شود. این

رتیواتور به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تجهیزات خاک‌ورزی با قابلیت تنظیم عمق کار و قدرت خردسازی بالا، نقش مهمی در آماده‌سازی بستر بذر و اختلاط بقایای گیاهی ایفا می‌کند. تیغه‌های مارپیچی نصب‌شده روی روتور، به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که به‌صورت تدریجی وارد خاک شوند و ضمن کاهش مصرف انرژی، خاک را به‌صورت یکنواخت خرد کنند. تیغه‌های نوع L و C برای کاربرد در عمق‌های مختلف مناسب‌اند و با طراحی خاص خود، باعث افزایش کیفیت خاک و کاهش فشردگی آن می‌شوند [۱]. در شکل ۱ نمای یک رتیواتور و تیغه‌های L و C آورده شده‌است. در بخش انتقال قدرت، گیربکس‌های چندسرعت، کلاچ‌های اصطکاکی، و سیستم دنده‌ای مهر و موم‌شده برای عملکرد مطمئن در شرایط سخت مزرعه به کار رفته‌اند. این

How to Cite this Article:

[1] M. R. Ebrahimian, F. Rahmani, and A. Barzegar Shokri, "Design and construction of a multi-purpose agricultural rotator with movable arms," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 27-45, 2026, <https://doi.org/10.22034/stme.2025.524280.1131>, (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

ویژگی‌ها موجب شده تا دستگاه مذکور، ضمن پاسخگویی به نیازهای حرفه‌ای کشاورزان، در راستای اهداف پایداری و بهینه‌سازی عملیات مزرعه، نقش مؤثری ایفا کند [۴].



شکل ۱: نمای یک روتیواتور و تیغه‌های C و L

آرتور کلیفورد هاوارد، در سال ۱۹۱۲، اولین بیل زن دوار برقی را اختراع کرد [۵]. او با استفاده از موتور تراکتور بخار و دیسک‌های چرخشی، روشی نوین برای خاک‌ورزی ابداع کرد که خاک را بدون انباشت و فشردگی شخم می‌زد. این روش نسبت به گاوآهن‌های سنتی، خاکی مناسب‌تر برای کاشت محصولات زراعی تولید می‌کرد. هاوارد دریافت که خاک‌ورزی چرخشی می‌تواند علف‌های هرز و ریشه‌ها را به‌طور مؤثر با خاک مخلوط کند. طرح اولیه او مشکل پرتاب خاک به طرفین را داشت، اما او با طراحی تیغه‌های L شکل که روی فلنچ‌های روتور نصب می‌شدند، این مشکل را برطرف کرد. این نوآوری باعث شد خاک به‌صورت یکنواخت‌تر خرد شود و برای کشاورزی آماده گردد [۶]. در سال ۱۹۲۷، هاوارد مدل‌های متنوعی از جمله بیل‌های چرخشی برای تراکتور فوردسون و ماشین‌های کنترل دستی طراحی کرد و ۱۹۲۷ ماشین با موتور احتراق داخلی و پنج کولتیواتور چرخشی معرفی کرد که نقطه عطفی در تولید تراکتور در استرالیا بود. هاوارد یک جعبه دنده اسپلیتر را به سیستم افزود و این سیستم قدرت را از موتور به محور عقب و کولتیواتورها منتقل می‌کرد، هر کدام با کلاچ جداگانه. او همچنین تراکتورهای تک‌محوره با موتورهای هوا خنک تولید کرد [۷]. اولین روتاواتور هاوارد برای تراکتور فوردسون طراحی شد و از قرقره تراکتور نیرو می‌گرفت. در سال ۱۹۴۹، مدل سبک‌تر نوع D با تیغه‌های کوچک‌تر و روتور ۲۰ اینچی برای تراکتورهای فرگوسن و فورد "دیربورن" معرفی شد که با بازوهای پیوندی چهار نقطه‌ای به تراکتور متصل می‌شد [۸]. در سال ۱۹۵۰، مدل نوع F با اتصال مستقیم به گیربکس عقب و روتور ۲۳ اینچی عرضه شد که برای تراکتورهای مختلف مناسب بود. در سال ۱۹۵۲، روتاواتورهای دنباله‌دار برای تراکتورهای تا ۴۵ اسب بخار و در سال ۱۹۵۳ مدل‌های قوی‌تر تا ۸۰ اسب بخار معرفی شدند. در سال ۱۹۵۸، سری جدیدی برای تراکتورهای ۱۵ تا ۲۵ اسب بخار با گیربکس تک‌سرعت تولید شد که جایگزین چرخ زنجیر شد. روتاواتورهای مدرن با آماده‌سازی سریع و

مؤثر خاک، نقش کلیدی در افزایش بهره‌وری کشاورزی ایفا می‌کنند. این ماشین‌ها خاک را برای کاشت غنی‌تر کرده، ریشه‌های ناخواسته را حذف می‌کنند و ساختار خاک را بهبود می‌بخشند. استفاده از روتاواتور زمان و نیروی کار مورد نیاز برای خاک‌ورزی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و امکان کشت مناطق وسیع را با دقت بالا فراهم می‌کند. تجهیزات مدرن با کاهش هزینه‌های نگهداری و مصرف سوخت، سودآوری را افزایش می‌دهند. همچنین، روتاواتورها با امکاناتی مانند کاشت گیاهان پوششی و مخلوط کردن کود، به کشاورزی پایدار کمک می‌کنند و عملکرد محصول و کیفیت خاک را بهبود می‌بخشند [۹]. روتاواتورهای اولیه به دلیل وزن زیاد و مصرف انرژی بالا، اغلب دچار خرابی‌های مکانیکی می‌شدند. خاک‌ورزی مکرر با این دستگاه‌ها ساختار خاک را تخریب کرده، باعث فشردگی، فرسایش و کاهش مواد آلی می‌شود. این مشکلات می‌توانند به کاهش حاصلخیزی خاک و افزایش رواناب منجر شوند که کیفیت آب‌های سطحی را تهدید می‌کند. خاک‌ورزی بیش‌ازحد همچنین فعالیت میکروبی خاک را مختل کرده و منافذ خاک را مسدود می‌کند، که نفوذ آب را کاهش می‌دهد [۱۰]. این معایب، به‌ویژه در خاک‌های مرطوب، با افزایش هزینه‌های انرژی و نیروی کار، چالش‌های جدی برای کشاورزان ایجاد می‌کنند. تحقیقات نوردیک نشان می‌دهد که فشردگی خاک ناشی از ماشین‌آلات سنگین می‌تواند عملکرد محصول را ۵ تا ۱۵ درصد کاهش دهد. این فشردگی، حجم هوای خاک را کم کرده و نفوذ آب را مختل می‌کند، که به فرسایش و از دست رفتن مواد مغذی منجر می‌شود [۱۱]. بررسی‌ها با استفاده از سی‌تی اسکن نشان داده که آسیب‌های ساختاری خاک حتی پس از ۱۴ سال باقی می‌مانند. تغییرات اقلیمی و افزایش بارندگی، خاک‌های مرطوب را در برابر فشردگی آسیب‌پذیرتر می‌کنند. ماشین‌آلات سنگین با وزن تا ۶۰ تن، این مشکل را تشدید کرده و در لایه‌های عمیق‌تر خاک، کاهش عملکرد می‌تواند دائمی باشد. روتاواتور از اجزایی مانند شفت پروانه، کلاچ لغزشی، گیربکس، درایو جانبی، تیغه‌ها، سپر خاک و چرخ گیج تشکیل شده است. تیغه‌های L شکل از فولاد پر کربن ساخته می‌شوند و برای خاک‌ورزی کم‌عمق ایده‌آل‌اند، در حالی که تیغه‌های C شکل برای خاک‌های سنگین مناسب‌ترند. بدنه دستگاه از فولاد ST37 با استحکام بالا اما مقاومت کم در برابر لرزش ساخته می‌شود. پوسته گیربکس از چدن خاکستری یا فولاد ریخته‌گری برای تحمل تنش‌ها تولید می‌شود. گاردان‌ها از فولاد کم کربن و اسکی‌های سایشی از آهن ST37 ساخته می‌شوند که انعطاف‌پذیر اما مستعد خوردگی هستند [۱۲]. این متریال‌ها دوام و

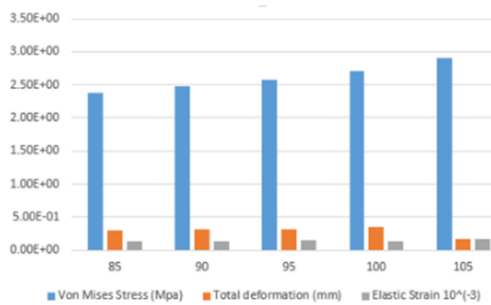
۲- روش تجربی

این بخش، شامل تحلیل‌های مکانیکی، شبیه‌سازی‌ها و بررسی متریک‌ها برای بهبود عملکرد دستگاه است. برخلاف گاوآهن‌های سنتی که باعث عدم تعادل و فشردگی خاک می‌شوند، روتاواتور با تیغه‌های دوار خود خاک را به صورت یکنواخت آماده می‌کند. طراحی تیغه‌ها نقش حیاتی در عملکرد و دوام دستگاه دارد، زیرا این اجزا مستقیماً با خاک درگیر هستند و تحت فشار و اصطکاک شدیدی قرار می‌گیرند. خواص فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی خاک، مانند استحکام و محتوای آب، تأثیر مستقیمی بر انرژی مورد نیاز برای خاک‌ورزی دارند. این خواص مقاومت خاک را تعیین می‌کنند که روتاواتور باید بر آن غلبه کند. برای مثال، خاک‌های مرطوب یا سنگین نیاز به انرژی بیشتری دارند، درحالی‌که خاک‌های خشک و سبک ممکن است به عملیات کم‌فشارتر نیاز داشته باشند. درک این خواص برای طراحی تیغه‌ها و تنظیمات عملیاتی دستگاه ضروری است تا کارایی و کیفیت خاک‌ورزی بهبود یابد. تیغه‌ها، مهم‌ترین بخش روتاواتور هستند که با خاک تعامل دارند. تیغه‌های L شکل با ضربه به خاک، آن را پودر کرده و به سمت بالا پرتاب می‌کنند که منجر به تسطیح یکنواخت زمین می‌شود. فاصله بین تیغه‌ها و سپر قابل تنظیم است و این امکان را فراهم می‌کند که درجه پودر شدن خاک کنترل شود. کاهش این فاصله باعث افزایش پودر شدن می‌شود. روتور معمولاً هم‌جهت با چرخ‌های تراکتور می‌چرخد و هر تیغه بخشی از خاک را برش می‌دهد که به کاهش اوج گشتاور و بهبود تعادل دستگاه کمک می‌کند. نیروهای وارد بر تیغه‌های رتیبواتور شامل انواع بارهای (۱) بار عملیاتی: نیروی وارد بر تیغه در اثر برخورد با خاک است که بسته به نوع خاک، میزان سختی، زاویه شیب، و سرعت حرکت متفاوت است. (۲) نیروهای جانبی و خمشی: در اثر فشار خاک و مقاومت آن، ممکن است نیروهای برشی و خمشی بر تیغه وارد شوند. (۳) نیروهای دینامیک: حرکت سریع و ضربه‌های ناگهانی ممکن است بار دینامیکی ایجاد کند. شرایط مرزی و نحوه اعمال نیروها بر اساس نوع خاک و انتهای تیغه است. سطح تماس تیغه با خاک که دارای شرایط اصطکاکی است، در تحلیل دینامیکی خاک به صورت رفتار غیرخطی و مقاومتی عمل می‌کند که باید به صورت تابعی از نیروهای برشی و فشاری تعریف شود در صورتی که انتهای تیغه آزاد است که در توزیع نیروها و تغییر شکل‌ها تأثیر می‌گذارند. اعمال نیروهای برشی و فشاری بر اساس تماس تیغه با خاک و مقاومت خاک هستند و بر اساس آزمایش‌های خاک تعیین می‌شوند.

عملکرد دستگاه را تضمین می‌کنند. این مطالعه با هدف شناسایی فرصت‌های جدید در بازار جهانی روتاواتور، ارائه بینش‌هایی در مورد نیازهای مشتری و تحلیل چشم‌انداز رقابتی انجام شده است. این تحقیق به شرکت‌ها کمک می‌کند تا استراتژی‌های مؤثری برای افزایش فروش و سودآوری تدوین کنند. با درک پویایی صنعت و فناوری‌های نوظهور، امکان شناسایی مشتریان هدف و طراحی خدمات مناسب فراهم می‌شود. روتاواتور یک ابزار چندمنظوره برای آماده‌سازی بستر بذر است که با خرد کردن، برش، مخلوط کردن و تسطیح خاک در یک مرحله، بهره‌وری کشاورزی را افزایش می‌دهد. این دستگاه با جلوگیری از بیماری‌های محصول و کنترل آفات، شرایط بهینه خاک را فراهم می‌کند.

از اهداف اصلی طراحی و ساخت دستگاه روتیبواتور چندمنظوره خاک‌ورزی بهینه بوده که از ضروریات انجام طراحی و ساخت آن می‌توان به قیمت مقرون‌به‌صرفه آن در داخل کشور و کاربرد آن در تمامی مزارع کشاورزی، کشت و صنعت‌های کشور اشاره نمود. طراحی و ساخت این دستگاه به دلیل دوکاره بودن آن موجب صرفه‌جویی ۵۰ درصدی در مصرف سوخت و زمان همچنین قیمت تمام شده محصول می‌گردد. مطابق نیاز مزارع و کشاورزان اقدام به طراحی و ساخت دستگاهی شده است که علاوه برداشتن عرض کاری بالا دارای مکانیزم‌های مختلف جهت رفع مشکلات حمل‌ونقل در جاده‌ها، ترکیب کردن دو دستگاه با در نظر گرفتن توان مورد نیاز ورودی و نبود نمونه مشابه در ایران است. بدین ترتیب افزایش بهره‌وری و انجام عملیات خاک‌ورزی بر روی زمین جهت کاشت نشاء در کوتاه‌ترین زمان، ممکن میسر بوده و علاوه بر این هم‌زمان می‌تواند عملیات حفر جوی که اندازه و سایز آن هم نسبت به نوع محصول قابل تنظیم است را ممکن می‌نماید. رتیبواتورهای دوطرفه تاشو ماشین‌های خاک‌ورزی هستند که خاک را از سطح زیرین به کمک فلنچ چرخان افقی جهت تهیه بستر بذر، تهویه خاک، خرد کردن و مخلوط کردن ضایعات گیاهی برای کاشت آماده می‌کنند. این دستگاه از مجموعه‌ها و مکانیزم‌هایی طراحی و ساخته شده که به پیشرفت در زمینه بهینه‌سازی، طول عمر، ایمنی اپراتور و هزینه تعمیر و نگهداری کمک شایانی می‌کند. این دستگاه ابزار قدرتمندی است که می‌تواند کارایی و بهره‌وری عملیات کشاورزی را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. با استفاده از روتیبواتور، خاک غنی‌تری خواهیم داشت که منجر به موفقیت بیشتر در رشد محصول می‌گردد.

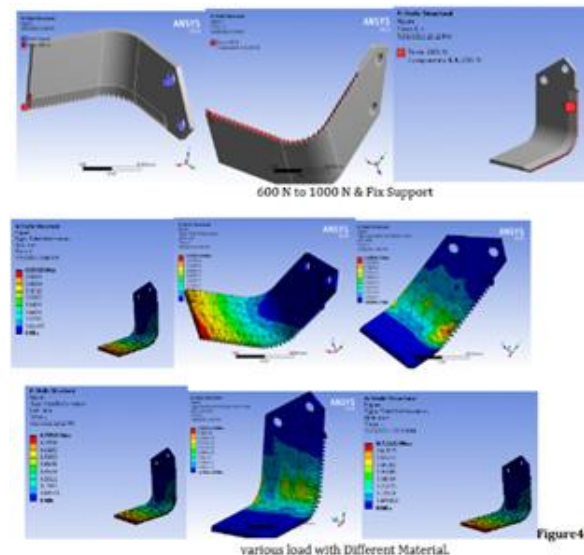
شکل ۰/۷۹۵۹۲ میلی متری دارد. این تفاوت به دلیل سفتی بالاتر فولاد سازه‌ای است. چدن خاکستری، اگرچه ارزان‌تر است، تغییر شکل بیشتری نشان می‌دهد، درحالی‌که فولاد سازه‌ای با کارایی بالاتر، ماده‌ای مناسب‌تر برای کاربردهای سنگین است. این نتایج بر اهمیت انتخاب ماده بر اساس نیازهای عملیاتی تأکید دارد. برای بهبود عملکرد، تیغه‌های L شکل با دندانه‌های اره‌ای اصلاح شدند. تحلیل المان محدود (FEA) نشان داد که این طراحی جدید ایمن است و تنش‌ها در محدوده مجاز باقی می‌مانند. تغییر در هندسه تیغه، مانند افزودن دندانه‌ها، بر سفتی و تغییر شکل تأثیر گذاشت. این اصلاح به افزایش کارایی برش و کاهش انرژی موردنیاز کمک کرد که برای بهینه‌سازی عملکرد روتواتور حیاتی است. تحلیل استاتیکی با تغییر زاویه تیغه‌ها (۸۵، ۹۰، ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۵ درجه) انجام شد. نتایج نشان داد که زاویه تیغه بر تنش و تغییر شکل تأثیر دارد. زاویه بهینه (۹۵ درجه در طراحی موجود) تعادل مناسبی بین کارایی برش و مقاومت ساختاری فراهم کرد. این تحلیل‌ها در نرم‌افزار انسیس انجام شد که نتایج در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳: نمودار تحلیل استاتیکی زوایای تیغه

شکل ۴ شبیه‌سازی تیغه دوار در حال برش از میان یک مدل خاک تکمیل شده است. شبیه‌سازی دینامیک برش خاک شبیه‌سازی برش خاک در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۴ انجام شد تا رفتار تیغه‌ها در تعامل با خاک بررسی شود. این شبیه‌سازی نشان داد که تیغه‌های C شکل با زاویه برش مناسب، اصطکاک کمتری ایجاد کرده و گشتاور معکوس کمتری به تراکتور وارد می‌کنند. این تحلیل به بهینه‌سازی طراحی تیغه‌ها و کاهش مصرف انرژی کمک کرد، که برای افزایش عمر مفید دستگاه ضروری است.

شکل ۲ نشان دهنده تغییرات تنش فون میزس، تغییر شکل کل و کرنش الاستیک با زوایای تیغه می باشد که مشخص می نماید، افزایش زاویه تیغه منجر به افزایش مقادیر تنش فون-میسز، تغییر شکل و کرنش می گردد. شکل ۲ به مقایسه آنالیزهای شبیه سازی سه نقطه دستگاه میباشد و طبق آنالیز انجام شده، نتایج نشان می دهد، مقادیر تغییرشکل کرنش درنقاطی که با استراکچرها پوشش داده شده اند مقاومت بیشتری دربرابر تنش و کرنش دارند. به دلیل اتصال تراکتور به سه نقطه جهت کشیدن دستگاه و انجام عملیات کشاورزی این نقاط تحت تنش قرار می گیرند که در نرم افزارانسیس سه نقطه اتصال بدون استفاده از استراکچرها و با استراکچرها تحلیل شده و نیروی کششی اعمال شده و تغییر شکل کرنش در قسمت بازوهای بغل و پایین نمایش داده می شود.

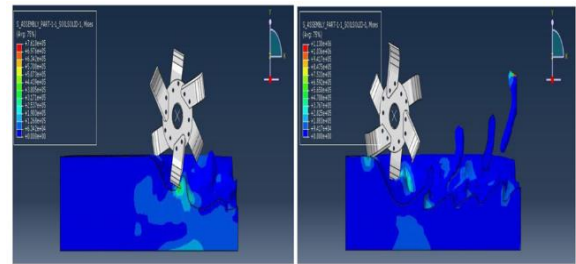


شکل ۲: آنالیز تیغه در نرم افزار انسیس

چدن خاکستری در مقابل فولاد سازه‌ای برای انتخاب ماده مناسب تیغه‌ها، چدن خاکستری و فولاد سازه‌ای موردبررسی قرار گرفتند. چدن خاکستری با تنش مجاز ۱۰۵ مگاپاسکال و فولاد سازه‌ای با ۱۴۰ مگاپاسکال تحلیل شدند. با اعمال بارهای ۶۰۰ و ۱۰۰۰ نیوتن، تنش‌های تولیدی در هر دو ماده (به ترتیب ۴۲/۸۳۲ و ۷۴/۲۸۳ مگاپاسکال برای چدن خاکستری؛ ۴۲/۵۰۵ و ۷۳/۲۳۴ مگاپاسکال برای فولاد سازه‌ای) در محدوده مجاز بودند که نشان‌دهنده ایمنی طراحی است. این تحلیل در نرم‌افزار انسیس انجام شد و نتایج نشان داد که هر دو ماده برای شرایط کاری مناسب هستند.

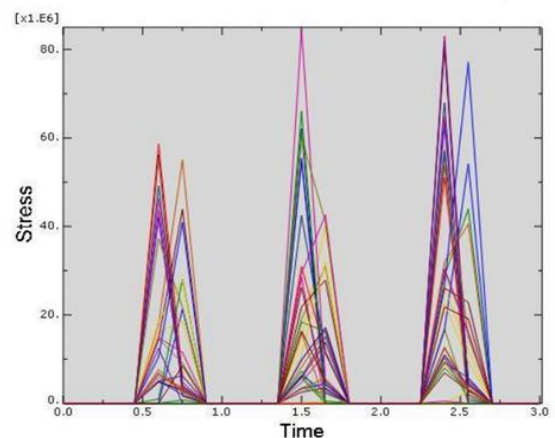
تحلیل تغییر شکل تیغه‌ها نشان داد که چدن خاکستری با بار ۱۰۰۰ نیوتن تغییر شکل ۱/۴۳۲۴ میلی متری و فولاد سازه‌ای تغییر

می‌شود تا فلنچ‌ها و پوشش‌ها باکیفیت بالا ساخته شوند. عملکرد روتاوتور تحت تأثیر عواملی مانند پیکربندی تیغه، جهت چرخش، عمق خاک‌ورزی، نسبت سرعت محیطی به سرعت جلو و وضعیت خاک قرار دارد. افزایش عمق خاک‌ورزی معمولاً انرژی بیشتری نیاز دارد، اما رابطه خطی بین این دو عامل در شرایط خاک مشابه مشاهده شد. جهت چرخش روتور نیز بر تقاضای توان و کیفیت کار تأثیر می‌گذارد که برای طراحی بهینه دستگاه حیاتی است. روتاوتور مجهز به بلبرینگ‌های دوردیف ساچمه‌ای با جنس فولاد کروم‌دار (AISI 52100) است. این بلبرینگ‌ها بارهای شعاعی و محوری را تحمل کرده و از انحراف شفت جلوگیری می‌کنند. مقاومت بالای این بلبرینگ‌ها در برابر سایش و خوردگی، انعطاف‌پذیری در برابر ضربات و دوام طولانی مدت را تضمین می‌کند که برای عملکرد پایدار دستگاه ضروری است. برای کاهش هزینه‌های تولید، از قطعات استاندارد مانند توپی‌های چدنی و بدنه‌های مشابه دستگاه‌های دیگر استفاده شد. این رویکرد نیاز به طراحی قالب‌های جدید برای ریخته‌گری، خم‌کاری ورق‌ها و فیکسچرهای جوشکاری را به حداقل رساند. استفاده از قطعات مشترک نه تنها هزینه‌ها را کاهش داد، بلکه زمان تولید را نیز کوتاه کرد. برای کاهش ضایعات، از ورق‌هایی با ضخامت و ابعاد مشابه دستگاه‌های دیگر استفاده شد. چیدمان برش ورق‌ها به گونه‌ای طراحی شد که حداکثر استفاده از مواد انجام شود و ضایعات به حداقل برسد. این روش، بهره‌وری مواد را افزایش داد و هزینه‌های تولید را کاهش داد که برای رقابت در بازار جهانی حیاتی است. برای افزایش دوام، بخش‌های تحت تنش‌های استاتیکی و خمشی، مانند توپی‌های وسط، دوبله شدند. استفاده از توپی‌های واسکازینی به جای گریس، روغن کاری دقیق‌تری فراهم کرد. همچنین، پکینگ‌های دوطرفه ترک به جای پکینگ‌های پلی‌یورتان در جک‌های هیدرولیک استفاده شدند تا عملکرد آب‌بندی و روغن‌کاری بهبود یابد. این تغییرات کیفیت و قابلیت اطمینان دستگاه را افزایش داد. افزایش قطر شفت گیربکس مرکزی از ۳۵ به ۴۵ میلی‌متر، توانایی تحمل وزن و دور روتاوتور را بهبود بخشید و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش داد. استفاده از مواد بادوام و طراحی‌های بهینه‌شده، مانند بلبرینگ‌های مقاوم و پکینگ‌های پیشرفته، نیاز به تعمیرات مکرر را به حداقل رساند و عمر مفید دستگاه را افزایش داد. شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای CAD مانند SolidWorks و تحلیل در آنسیس و آباکوس انجام شد. این ابزارها امکان آزمایش مجازی مدل‌ها در شرایط واقعی را فراهم کردند. در تحلیل مکانیکی تیغه‌ها و اجزای انتقال قدرت بارهای ضربه‌ای و غیرمستمر مانند بارهای ناگهانی و شدید که ممکن



شکل ۴: شبیه‌ساز دینامیک برش خاک در نرم افزار آباکوس

یک نمودار XY روی سطح تیغه ایجاد شد. این امر امکان استخراج نمودار تاریخچه زمانی تنش تماسی در لبه تیغه را با تمرکز تحلیل بر روی سطح برش فراهم می‌آورد. این رویکرد به درک رفتار تنش در جایی که تیغه با خاک در تعامل است کمک می‌کند. نمودارهای شکل ۵ کانتور توزیع یک متغیر واحد (مانند تغییر شکل) را در یک سطح یا حجم نشان می‌دهند، نمودار XY برای نمایش رابطه بین دو متغیر استفاده شده است و در این شکل ۵ از آنها برای رسم نمودار تنش تماسی در برابر زمان روی لبه برش تیغه استفاده گردیده است.



شکل ۵: تنش تماسی ایجادشده در یک صفحه نوک تیز

سیستم سه‌نقطه اتصال، نیروی تراکتور را از شفت PTO به روتور منتقل می‌کند. این سیستم مانند پلی بین تراکتور و روتاوتور عمل می‌کند و امکان استفاده از نیروی تراکتور یا موتور مستقل را فراهم می‌کند. اجزای این سیستم با دستگاه برش لیزری ساخته می‌شوند که دقت بالایی در برش فلزات مانند فولاد و آلومینیوم ارائه می‌دهد. این روش تولید، کیفیت و دوام اجزا را تضمین می‌کند. انتقال قدرت در روتاوتور از طریق سیستم زنجیری یا چرخ‌دنده‌ای انجام می‌شود. چرخ‌دنده‌ها در حمام روغن کاری می‌کنند و با آب‌بندی فلزی، مقاومت بالایی در برابر نشت و آلودگی دارند. طراحی دندانه‌های چرخ‌دنده‌ها گرما و سایش را کاهش می‌دهد و نیاز به سیستم خنک‌کننده را حذف می‌کند. این سیستم با دقت توسط دستگاه‌های برش لیزری تولید

همچنین شرایط محیطی مانند دما و رطوبت و قرارگرفتن در معرض منابع خارجی در نظر گرفته شده است.

۳- فرایند طراحی و تولید

این بخش به تشریح فرایند طراحی، ساخت و نتیجه‌گیری مرتبط با روتاواتور، یک ماشین خاک‌ورزی پیشرفته، می‌پردازد و با تمرکز بر نیازسنجی بازار، شبیه‌سازی، تولید و مشخصات فنی محصول، چگونگی تبدیل ایده به یک محصول نهایی را بررسی می‌کند. هدف اصلی، ارائه دستگاهی با عملکرد بهینه، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کشاورزی است. این مطالعه با توجه به شرایط اقلیمی، نوع محصول و توان تراکتور، راهکارهایی برای بهبود طراحی و تولید ارائه می‌دهد. نیازسنجی، فرایند کلیدی در طراحی روتاواتور، شامل شناسایی نیازهای مشتریان و بازار هدف است. با انجام مطالعات آماری در مناطق مختلف، عواملی مانند اقلیم، نوع خاک، آب‌وهوا و محصولات زراعی بررسی شدند. این تحقیقات به انتخاب طرحی متناسب با نیازهای کشاورزان و شرایط محلی کمک کرد. شناخت دقیق مشتری نهایی، نقش اساسی در موفقیت محصول دارد و طراحی روتاواتور را به سمتی هدایت کرد که بهره‌وری و سهولت استفاده را به حداکثر برساند. در شبیه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه سوخت مطابق نیاز مزارع و کشاورزان رفتار شده است و در مقایسه با نمونه داخلی دو عملیات را به طور هم‌زمان انجام داده می‌شود: (۱) خاک را از سطح زیرین به کمک فلنچ چرخان افقی جهت تهیه بستر بذری، تهویه خاک، خردکردن و مخلوط کردن ضایعات گیاهی برای کاشت آماده می‌کنند (۲) عملیات حفر جوی که اندازه و سایز آن هم نسبت به نوع محصول قابل تنظیم است را هم‌زمان با عملیات خاک‌ورزی انجام می‌دهد. به دلیل عرض کاری بالا موجب می‌شود که در هر پاس، سطح بیشتری از خاک زمین به خاک‌ورزی اختصاص یابد که در نتیجه فرایند کاشت، شخم‌زنی و سایر عملیات زراعی را با بهره‌وری بیشتر و زمان‌بندی مناسب‌تر انجام می‌دهد. این قابلیت نه تنها به کاهش تعداد پاس‌ها و صرفه‌جویی در زمان و هزینه کمک می‌کند، بلکه منجر به اصلاح و بهبود کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری زراعی می‌گردد. طراحی محصول یک فرایند پیوسته است که از ایده‌پردازی تا تولید نهایی را شامل می‌شود. این فرایند با شناسایی مشکلات و نیازهای بازار آغاز شده و با اصلاح و ارتقای ویژگی‌های محصول ادامه می‌یابد. طراحی روتاواتور شامل سه مرحله اصلی است: (۱) طراحی مقدماتی برای تعیین ویژگی‌های اولیه، (۲) طراحی تکمیلی برای رفع مسائل فنی و بهبود مشخصات، و (۳) آنالیز

است در اثر برخورد، ضربه یا شروع و توقف ناگهانی سیستم رخ دهند و بارهای سینوسی یا سیکنی مانند بارهای تکراری و نوسانی که بیشتر بر اثر چرخش یا فعالیت‌های تکراری دیگر ایجاد می‌شوند و همچنین بارهای دینامیکی ناشی از نیروهای قابل حذف مانند بارهای ناشی از ارتعاش یا امواج صوتی که بر اثر فعالیت دستگاه‌ها ایجاد می‌گردد و در نهایت بارهای اصطکاکی و احتمالی اثرات حرارتی زیرا تغییر دما می‌تواند باعث تغییر در خواص مواد و در نتیجه تأثیر بر حالت استاتیکی و دینامیکی قطعات شود، در نظر گرفته شده است. تحلیل‌های استاتیکی، خستگی و دینامیکی نشان داد که طراحی تیغه‌ها و شفت‌ها ایمن است. شبیه‌سازی‌ها با کاهش نیاز به نمونه‌های اولیه فیزیکی، هزینه‌ها و زمان توسعه را کاهش دادند. تحلیل خستگی بر اساس حوادث یا شکاف‌های اولیه برای پیش‌بینی احتمال شکست ناشی از ترک‌خوردگی‌های اولیه یا خلل‌های موجود صورت پذیرفته است. در مورد تطابق نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار Ansys با داده‌های تجربی تا حد قابل قبولی تطابق وجود دارد؛ اما هر چه مدل‌های المان، مواد، و بارگذاری‌ها دقیق‌تر باشد، تطابق بهتری حاصل می‌شود همچنین پارامترهای مواد و شرایط محیطی مانند خواص مواد در دماهای بالا، اثرات ساییدگی و دیگر عوامل واقعی و احتمال خطاهای مدل‌سازی در مورد تماس، لقی‌ها، و مرزهای اتصال وجود دارد. انتخاب متریال بر عملکرد، زیبایی، دوام و هزینه دستگاه تأثیر دارد. موادی مانند چدن نشکن برای گیربکس، فولاد کروم‌دار برای بلبرینگ‌ها و فولاد ST57 برای شاسی انتخاب شدند. این مواد مقاومت بالایی در برابر سایش، خوردگی و ضربات دارند. تحلیل خواص مکانیکی و شیمیایی، همراه با بررسی فرایندهای تولید و هزینه‌ها، به انتخاب موادی منجر شد که تعادل بهینه‌ای بین کیفیت و مقرون‌به‌صرفه بودن ارائه می‌دهند.

در انتخاب مواد از معیارهای مکانیکی زیر استفاده گردید:

۱. استحکام کششی و خمشی: زیرا مواد باید بتوانند بارهای وارد شده را تحمل کنند و بدون شکست یا تغییر شکل دائمی باشند.
۲. مقاومت به ضربه و خمش: به این دلیل که در چدن نشکن، مقاومت بالا به ضربه اهمیت دارد تا در برابر فشارهای ناگهانی مقاومت کند.
۳. مقاومت سایشی: چون در بلبرینگ‌ها نیاز است که ماده مقاومت خوبی در برابر سایش داشته باشد تا از کاهش عمر قطعه جلوگیری کند.

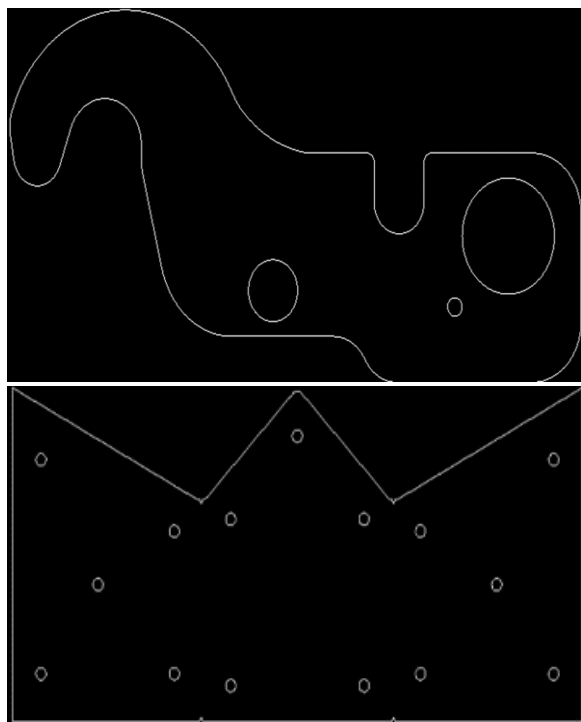
CNC توانایی برش انواع فلزات، از جمله فولاد و آلومینیوم، را با تolerانس‌های دقیق فراهم کردند که برای ساخت اجزای پیچیده روتواتور ضروری بود.

برش لیزری CNC با دقت بالا (۰/۰۲ میلی‌متر) می‌تواند دقت ابعادی قطعات را بسیار بهبود بخشد. دقت در فرایند ساخت منجر به کاهش ساییدگی و استرس‌های مکانیکی اضافی می‌شود و بهبود کیفیت نهایی و کاهش ضایعات قطعاتی با دقت بالا، کارایی بیشتری دارند و نیاز به اصلاحات و دوباره‌کاری کم‌تر است. داده‌های کمی عبارت‌اند از:

۱. دقت ابعادی: در برش لیزری CNC، دقت ابعادی معمولاً در حدود ۰/۰۲ میلی‌متر است.

۲. کاهش ضایعات: استفاده از این روش‌ها منجر به کاهش ضایعات تولیدی تا ۲۰-۳۰ درصد می‌شود.

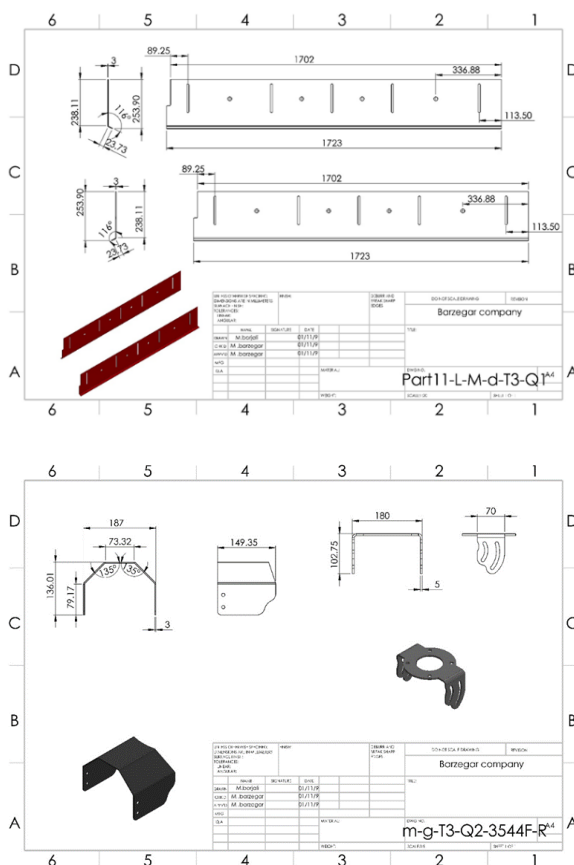
۳. زمان‌برش: افزایش سرعت عملیات به‌عنوان یکی دیگر از مزایای قابل‌اندازه‌گیری، با کاهش زمان تولید قطعات نسبت به روش‌های دستی یا سنتی است.



شکل ۶: قطعه طراحی شده و تبدیل شده به فرمت

چیدمان بهینه قطعات در نرم‌افزارهایی مانند سیپکات انجام شد تا مصرف ورق به حداقل برسد و ضایعات کاهش یابد. فاصله مناسب بین قطعات از کاهش کیفیت برش ناشی از حرارت جلوگیری کرد. این نرم‌افزار با افزایش سرعت و دقت برش، بهره‌وری تولید را بهبود بخشید

محصول برای بررسی مقاومت‌ها و عملکرد. این مراحل تضمین می‌کنند که محصول نهایی با استانداردهای کیفی و عملکردی مطابقت داشته باشد. در مرحله طراحی مقدماتی، با توجه به نیازهای شناسایی شده، محاسبات اولیه برای عملکرد دستگاه انجام شد. یک مدل ساده طراحی شد که با شرایط واقعی، مانند توان تراکتور و نوع خاک، سازگار باشد. هدف این مرحله، بررسی نقاط قوت و ضعف طرح و ارزیابی عملکرد اولیه بود. این فرایند به شناسایی چالش‌های احتمالی و ارائه راهکارهای اولیه برای بهبود طراحی کمک کرد. طراحی تکمیلی بر رفع مسائل فنی و مهندسی تمرکز داشت. در این مرحله، مشخصات فنی مانند سرعت، دقت، بازده و مکانیزم‌های دستگاه بررسی و بهینه شدند. جنس قطعات، نحوه ساخت، مونتاژ، زیبایی ظاهری و تطابق با استانداردهای زیست‌محیطی نیز ارزیابی شدند. این مرحله تضمین کرد که روتواتور از نظر عملکرد و دوام با نیازهای بازار همخوانی داشته باشد. آنالیز محصول با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند انسیس انجام شد تا مقاومت‌های کششی، استاتیکی، خمشی و کرنش بررسی شوند. این تحلیل‌ها نقاط ضعف ساختاری را شناسایی کرده و ایمنی و ضریب اطمینان دستگاه را تأیید کردند. نتایج این مرحله به اصلاح طراحی و تولید نمونه اولیه بدون نقص کمک کرد. در نرم‌افزار شبیه‌سازی اولیه در نرم‌افزارهای CAD مانند SolidWorks و Catia انجام شد. قطعات به‌صورت جداگانه طراحی و سپس در محیط مونتاژ ترکیب شدند. عملکرد مکانیزم‌ها، مانند گیربکس و دنده‌ها، بررسی شد تا از مشکلات احتمالی جلوگیری شود. تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی در نرم‌افزار انسیس، ایمنی و کارایی دستگاه را تأیید کرد و نمونه اولیه با حداقل خطا تولید شد. تهیه نقشه‌های فنی با تolerانس‌های دقیق و مشخصات متریکال، مرحله‌ای حیاتی در تولید بود. نقشه‌های انفجاری برای مونتاژ و شناسایی قطعات استفاده شدند. انتخاب متریکال بر اساس خواص مکانیکی، هزینه، دردسترس بودن و پایداری انجام شد. موادی مانند چدن نشکن، فولاد کروم‌دار و فولاد ST57 به دلیل مقاومت و دوام انتخاب شدند تا عملکرد و طول عمر دستگاه تضمین شود. معیارهایی مانند استحکام، مقاومت در برابر خوردگی، وزن و پایداری زیست‌محیطی در نظر گرفته شدند. موادی که انرژی کمتری برای تولید یا بازیافت نیاز دارند، اولویت داشتند. این انتخاب‌ها نه تنها کارایی دستگاه را بهبود بخشیدند، بلکه هزینه‌های تولید و نگهداری را کاهش دادند. برای برش دقیق قطعات، نقشه‌ها به فرمت DXF تبدیل شدند تا در دستگاه‌های برش لیزری CNC استفاده شوند. این فناوری دقت و کیفیت برش را افزایش داده و زمان تولید را کاهش داد. دستگاه‌های

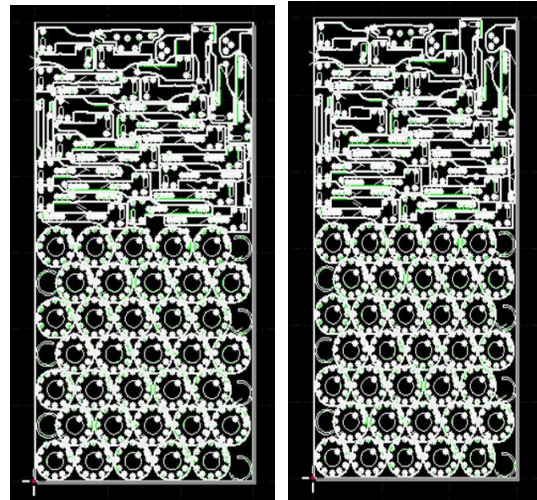


شکل ۸: نمونه نقشه خم کاری اجزای دستگاه

تست نهایی شامل بررسی بخش‌های هیدرولیک، برقی و مکانیکی و عملکرد دستگاه روی تراکتور بود. کنترل کیفیت با نمونه‌گیری و تحلیل آماری، صحت و دقت محصول را تأیید کرد. این مرحله ایمنی، کارایی و انطباق با استانداردها را تضمین کرد و هزینه‌های احتمالی ناشی از نقص را کاهش داد. روتواتور با عرض کاری ۳/۵۰ متر، ابعاد ۳۹۲۲×۱۸۲۰×۱۳۷۰ میلی‌متر و عرض حمل‌ونقل ۲۳۷۰ میلی‌متر طراحی شد. این دستگاه با سه نقطه اتصال استاندارد، گیربکس مرکزی (۱۴۵۰ نیوتن) و دو گیربکس کناری (۲۱۵۰ نیوتن) مجهز شده است. تیغه‌های ۶تایی با پللیت‌های ۱۲ میلی‌متری، جک‌های هیدرولیک و مکانیزم دنده‌ای، عملکرد و دوام دستگاه را بهبود بخشیدند. تاشو بودن و ایمنی روتواتور تاشو با جک‌های هیدرولیک و قفل‌کن‌های ایمنی طراحی شد تا عرض آن از ۴ به ۲ متر کاهش یابد که حمل‌ونقل را آسان‌تر کرد.

در زمینه سازگاری اقلیمی در شرایط متفاوت اقلیماتی مانند سخت‌کاری دنده‌ها با عملیات حرارتی که برای گرم کردن و خنک کردن یک ماده فلزی در دمای مناسب برای ایجاد ریزساختار و خواص مکانیکی مانند سختی و چقرمگی صورت می‌گیرد بررسی دنده‌ها از

و هزینه‌ها را کاهش داد. خم کاری با دستگاه‌های پرس برک CNC انجام شد که امکان خم کردن ورق‌های فلزی با زوایای دقیق را فراهم کرد. تنظیم فشار پانچ و سمبه بر اساس ضخامت و نوع فلز، کیفیت خم کاری را تضمین کرد. این فرایند برای تولید اجزای ساختاری مانند شاسی و پللیت‌ها حیاتی بود.



شکل ۷: قطعات چیدمان شده در نرم‌افزار برش لیزر

جوش کاری با دستگاه CO2 برای اتصال دائمی قطعاتی که نیاز به جداسازی نداشتند استفاده شد. این روش با نفوذ بالا و سطح جوش تمیز، اتصالات قوی و مقرون به صرفه‌ای ایجاد کرد. جوش کاری به عنوان روشی اقتصادی، دوام و استحکام اجزای دستگاه را تضمین کرد. ماشین کاری، شامل تراش کاری، فرز کاری و سوراخ کاری، برای شکل‌دهی دقیق قطعات انجام شد. این فرایند، اگرچه پرهزینه، برای تولید قطعاتی با هندسه پیچیده ضروری بود. نقشه‌های تراش کاری دقت بالایی در تولید اجزا فراهم کردند و کیفیت نهایی را بهبود بخشیدند. رنگ آمیزی با روش الکترواستاتیک (رنگ کوره‌ای) انجام شد تا از زنگ‌زدگی جلوگیری کرده و ظاهر دستگاه بهبود یابد. این روش با پاشش پودر رنگ و پیوند شیمیایی، پوشش مقاومی ایجاد کرد که دوام دستگاه را در شرایط محیطی سخت افزایش داد. مونتاژ شامل نصب قطعات، جای گذاری بلبرینگ‌ها، کاسه‌نمدها و آب‌بندی اجزا بود. این فرایند با دقت بالا انجام شد تا عملکرد مکانیکی و هیدرولیکی دستگاه تضمین شود. مونتاژ صنعتی با افزایش بهره‌وری و کاهش خطاها، محصول نهایی را آماده تست کرد.

جنس سمانته با سختی $hrc 54$ صورت گرفته و همچنین استفاده از کاسه‌نمد سه لبه برای پایداری در برابر آب‌بندی روغن در دمای بالا و ضدآب بودن آن استفاده شده است.



شکل ۹: بازوهای قفل‌کن هیدرولیک

مکانیزم تاشو بال‌ها به کمک جک‌های هیدرولیک که توان و قدرت آنها محاسبه شده و نقشه فنی برای ساخت آن تهیه شده انجام می‌گیرد تا عملیات تاشو و باز کردن مجدد، ساده و سریع انجام شود و در حمل‌ونقل شاسی‌های طرفین را به سمت بالا تا کند و به دلیل عرض کار بالا دستگاه ترافیکی نباشد.

قفل‌کن‌های سر جک امکان شناور بودن بال‌های جانبی را فراهم کردند که در زمین‌های ناهموار فشار روی اجزا را کاهش داد و عمر دستگاه را افزایش داد. قفل‌کن‌های هیدرولیک در بالای سه‌نقطه به کمک بازوها جهت ایمنی در حمل‌ونقل عمل می‌کنند که بازهم جک موردنیاز با قدرت و توان لازم محاسبه می‌شود که بتواند وزن شاسی را تحمل کرده و هم در صورت پارگی شلنگ هیدرولیک از باز شدن کنترل نشده شاسی جلوگیری نماید. ویژگی‌های پیشرفته و مجموعه فاروثراین دستگاه با مجموعه فاروثر (عمق شیار ۱۷۰ میلی‌متر، عرض ۴۰۰ میلی‌متر) امکان خاک‌ورزی و جوی‌سازی هم‌زمان را فراهم می‌کند. تیغه‌های C شکل با زاویه بهینه، فنرهای خردکن و دیسک‌های جانبی کارایی و دقت را افزایش دادند. در طراحی تیغه‌های رتیواتور، اغلب از استانداردهای مهندسی کشاورزی و مکانیک خاک بهره گرفته شد و داده‌های تجربی (آزمایشگاهی یا میدانی) یا نتایج شبیه‌سازی‌ها بر اساس مدل‌های خاک و مقاومت برشی خاک استفاده گردید و همچنین فرضیات بر اساس تجربیات سابق و مقالات معتبر در طراحی تیغه‌های رتیواتور بنا نهاده شد.

تیغه‌های C شکل یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مهندسی در تجهیزات خاک‌ورزی است که تأثیر قابل‌توجهی بر فرایند کارکرد و بازدهی دستگاه دارد. جزئیات مربوط به زاویه برش، عمق نفوذ، و

هندسه دندانه‌های این تیغه‌ها و همچنین تأثیرات آن‌ها بر کاهش اصطکاک و افزایش بهره‌وری خاک‌ورزی در نظر گرفته شده است.

زاویه برش در تیغه‌های C شکل معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ درجه تنظیم می‌شود. این زاویه نقش مهمی در کاهش مقاومت برشی و اصطکاک دارد. زاویه‌های کوچک‌تر منجر به کاهش اصطکاک سطح تماس و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می‌شوند، درحالی‌که زاویه‌های بزرگ‌تر می‌توانند برش مؤثرتر و راحت‌تری در خاک ایجاد کنند. عمق نفوذ تیغه با تنظیم ارتفاع و مقاومت خاک تعیین می‌شود، و معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر است. عمق مناسب باعث می‌شود خاک به اندازه کافی درگیر برش شود و فرایند خاک‌ورزی بهینه انجام گیرد. نفوذ عمیق‌تر ممکن است مقاومت بیشتری ایجاد کند تا عملیات مؤثرتر انجام شود. هندسه دندانه‌ها به صورت لبه برش تیز است تا برش خاک آسان‌تر صورت گیرد، سطح داخلی دندانه‌ها کم اصطکاک است و از جمع شدن خاک جلوگیری می‌نماید. زاویه برش مناسب و هندسه دندانه‌ها، کاهش اصطکاک اولیه و سطح تماس با خاک را به همراه دارد که منجر به کاهش مصرف انرژی و استهلاک تجهیزات می‌شود. عمق نفوذ بهینه و هندسه مناسب باعث می‌شود که خاک به راحتی برش بخورد و مقاومت کلی کاهش یابد که این امر بهره‌وری را افزایش می‌دهد. تیغه‌های C شکل موجب می‌شوند عملیات به طور یکنواخت‌تر و با کمترین نیروی لازم انجام گردد و در نتیجه بهره‌وری افزایش یافته و زمان عملیات کوتاه‌تر می‌شود. هندسه دندانه‌ها و زاویه برش از تجمع خاک و انسداد در تیغه جلوگیری می‌کند و این امر عمر مفید تیغه‌ها را افزایش داده و نگهداری را آسان‌تر خواهد کرد.

گاردان ۴ لنت، توپی‌های واسکازینی و بلبرینگ‌های دوردیف هزینه‌های نگهداری را کاهش داده و ایمنی اپراتور را با گاردهای محافظ تضمین کردند.

در خصوص ارزیابی عملکرد رتیواتور، یک نمونه از تیغه دستگاه جهت آنالیز مواد و تعیین سختی به آزمایشگاه متالورژی ارسال و میزان فرسایش تیغه‌ها پس از ۸۰ هکتار کارکرد تست و درصد وزنی آن اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ بیان گردیده است. هر قطعه زمین یک نمونه خاک در عمق خاک‌ورزی برداشته شده و جهت تعیین رطوبت و بافت به آزمایشگاه خاک‌شناسی ارسال گردید.

جدول ۱: میزان فرسایش تیغه های روتیواتور پس از ۸۰ هکتار کارکرد در مزرعه

شماره قطعه	وزن اولیه (gr)	وزن ثانویه (gr)	مقدار کاهش وزن (gr)	کاهش وزن (%)
۱	۶۸۴	۶۷۳	۱۱	۱/۶۱
۲	۶۷۳	۶۶۴	۹	۱/۳۴
۳	۶۷۲	۶۶۳	۹	۱/۳۴
۴	۶۸۱	۶۷۴	۷	۱/۰۳
۵	۶۸۶	۶۷۶	۱۰	۱/۴۶
۶	۶۷۰	۶۶۰	۱۰	۱/۴۹
۷	۶۷۸	۶۶۹	۹	۱/۳۳
۸	۶۷۱	۶۶۲	۹	۱/۳۴
درصد میانگین کاهش وزن				
۱/۳۷				

میزان خردشدن خاک در ارزیابی کیفیت کار و عملکرد این ادوات یکی از مهم ترین عواملی که موردبررسی قرار می گیرد، جهت کاهش میانگین قطر دانه بندی خاک از هشت الک با چشمه های مربع شکل به اضلاع ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی متر استفاده شد. قبل و بعد از اجرای عملیات ماشینی بر روی خاک مزرعه با قاب های مخصوص ۱۰۰×۱۰۰ سانتی متر مربع نمونه برداری انجام گرفت. خاک برداشت شده از مجموعه الک های ذکر شده عبور داده شد. با استفاده از رابطه زیر میانگین قطر دانه بندی خاک محاسبه گردید و اجزاء سه نقطه اتصال اندازه گیری و با اندازه های توصیه شده در استاندارد ملی ۹۱۹۲ مقایسه شد که در جدول ۲ آورده شده است.

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w \quad (1)$$

که در رابطه (۱) داریم:

$$w = \frac{w_i}{w_t} \quad (2)$$

که در روابط فوق $\bar{x}_i$ میانگین قطر خاکدانه های باقیمانده بر روی هر الک، n تعداد الک ها و w نسبت وزن خاکدانه های روی هر الک به وزن کل خاک به کار برده شده در ابتدای آزمایش می باشد. نتایج دانه بندی خاک در سه وضعیت قرارگیری درپوش عقب روتیواتور در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات سه نقطه اتصال تیپ ۲ دستگاه روتیواتور ۷۲ تیغه هیدرولیک جک دار دوطرفه و تطبیق آن با استاندارد شماره ۹۱۹۲

ویژگی های ابعادی	کمینه (mm)	بیشینه (mm)	اندازه گیری شده (mm)
قطر سوراخ اتصال پین	۲۵/۳۷	۲۵/۵	۲۵/۴
عرض بین وجوه داخلی یوغ بالا	۵۲	-	۵۴
قطر پین اتصال پایین	۲۷/۸	۲۸	۲۷/۹
عرض قلاب	۶۵	۶۷	۶۶
فاصله نقاط اتصال پایینی نسبت به هم	۸۲۳/۵	۸۲۶/۵	۸۲۴
قطر برای سوراخ پین اتصال بالا	۱۲	-	۱۳
قطر برای سوراخ پین اتصال پایین	۱۲	-	۱۳
ارتفاع دیرک	۶۰۸/۵	۶۱۱/۵	۶۱۱

عمق خاک ورزی تعیین کننده میزان تخریب و نرم سازی خاک است که پارامتر اصلی در ارزیابی کارایی روتیواتور است که به وسیله عمود بر سطح خاک، از نوک تیغه یا پیکربندی ابزارهای سنجنش عمق، خط کش های دقیق یا حسگرهای فاصله سنج لیزری اندازه گیری می شود و با اندازه گیری های مکرر در نقاط مختلف عملیات برای میانگین گیری ثبت می گردد. نرخ خردایش کلوخ ها نشان دهنده میزان خردشدن سنگ ها و کلوخ ها در فرایند خاک ورزی است که با روش نمونه گیری از خاک قبل و بعد از عملیات و روش آزمایشگاهی شمارش و اندازه گیری اندازه کلوخ ها در نمونه ها و ثبت تعداد و حجم یا وزن کلوخ های خرد شده با معیارهای استاندارد حداقل خردایش مورد نیاز مقایسه می گردد. نتایج اندازه گیری ها در قالب جداول و نمودارها جمع آوری شده و با استانداردهای ملی یا بین المللی مانند ASTM، ISO یا استانداردهای داخلی کشور مقایسه خواهد شد. این مقایسه شامل بررسی حداقل و حداکثر محدوده های مجاز، توزیع یکنواختی و میزان انطباق کلی است و هرگونه انحراف از استانداردها در گزارش ها مستندسازی و تحلیل می گردد تا نقاط قوت و ضعف تجهیزات مورد ارزیابی مشخص شود. برنامه های آزمایشی برای بررسی دوام قطعات کلیدی در مرکز مکانیزاسیون کشاورزی صورت پذیرفت که هدف از آزمون موارد زیر بوده است:

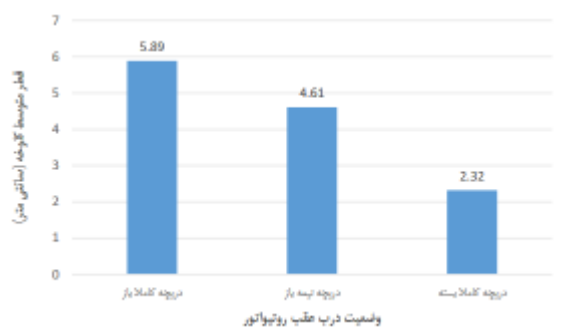
- بررسی میزان خردشدن کلوخ ها.

- تعیین میزان از بین بردن، زیر خاک کردن و درصد جاماندگی علف هرز.
- بررسی میزان فرسایش تیغه های خاک ورز دستگاه
- بررسی استحکام و دوام دستگاه
- بررسی ایمنی در قسمت های مختلف دستگاه
- بررسی سهولت تنظیمات و کار با دستگاه
- تطبیق اتصال سه نقطه دستگاه با استاندارد ملی شماره ۹۱۹۲

جدول ۳: قطر متوسط وزنی کلوخه ها پس از تردد رتیبواتور در سه وضعیت قرارگیری درپوش عقب

قطر کلوخه Cm ² (درپوش عقب)	میانگین قطر کلوخه ها (میلیمتر)							
	۸۳/۷	۶۸/۳	۵۶/۴	۴۷/۳	۳۸/۸	۲۵/۹	۱۴/۵	۷/۱
	وزن کلوخه ها بر روی هر الگ (گرم)							
۵/۸۹ (کاملاً باز)	۱۰۹۶۰	۷۲۴۷	۵۵۶۹	۴۱۷۷	۲۲۴۹	۲۷۱۳	۱۱۴۳	۱۰۳۵
۴/۶۱ (نیمه باز)	۷۸۹۰	۵۲۴۸	۳۶۰۶	۳۰۷۰	۲۲۴۹	۳۵۳۴	۴۷۸۴	۴۴۹۸
۲/۳۲ (کاملاً بسته)	.	۱۹۶۳	۲۶۰۶	۲۴۲۸	۳۸۹۱	۵۵۶۹	۷۶۰۴	۸۸۱۸

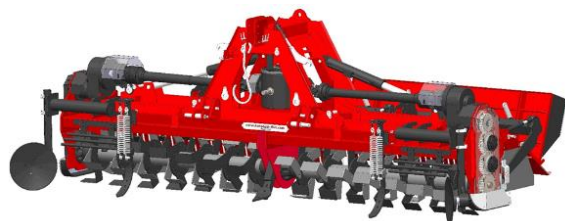
شکل ۱۰ نتیجه جدول ۳ را در قالب نمودار نمایش می دهد.



شکل ۱۰: قطر متوسط وزنی کلوخه ها پس از تردد رتیبواتور در سه وضعیت قرارگیری درپوش عقب

نتایج آزمون اعلام شده به شرح زیر بود:

- میانگین سطح پوشیده از بقایا قبل از عملیات ۱۵۲ و بعد از عملیات ۵۱/۸ و میانگین درصد زیر خاک شدن بقایا ۶/۹۱ درصد به دست آمد.
- میزان فرسایش تیغه ها پس از ۸۰ هکتار کارکرد ۱/۰۸ درصد وزنی اندازه گیری و قابل قبول است.
- دستگاه از استحکام و دوام کافی برخوردار بوده و پس از حدود ۲۰ ساعت آزمون، هیچ گونه شکستگی، پیچیدگی، خمیدگی، لرزش و یا فرسایش غیرعادی در قسمت های مختلف دستگاه مشاهده نگردید.
- کاربری، تنظیمات، سرویس و نگهداری و تعویض تیغه ها به آسانی انجام می گیرد.
- اتصال سه نقطه دستگاه با استاندارد ملی ۹۱۹۲ مطابقت دارد.



شکل ۱۱: شکل نهایی روتاواتور با عرض کاری ۳/۵۰ متری

- کارایی دستگاه در اراضی زراعی مناسب بوده است. متوسط ظرفیت عملی دستگاه با سرعت پیشروی ۳/۳۲ کیلومتر در ساعت و عرض کار عملی ۲۰۸/۴ سانتی متر، حدود ۰/۶۰ هکتار در ساعت با بازده ۸۲/۷۹ درصد اندازه گیری و محاسبه گردید.
- میانگین بکسواتر رتیبواتور ۱۲/۶ درصد در سرعت متوسط ۳/۳۲ کیلومتر در ساعت به دست آمد.
- میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (MWD) پس از عملیات ۲۲/۶۸ میلی متر به دست آمد.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف طراحی و ساخت یک روتاواتور پیشرفته برای بهبود بهره‌وری کشاورزی، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش دوام دستگاه انجام شد. با استفاده از روش‌های تجربی، شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری (مانند SolidWorks، انسیس و آباکوس) و تحلیل‌های مکانیکی، عملکرد تیغه‌ها، سیستم‌های انتقال قدرت و اجزای ساختاری بررسی شد. نیازسنجی بازار و شرایط اقلیمی به طراحی محصولی متناسب با نیازهای کشاورزان کمک کرد. فرایند طراحی شامل مراحل مقدماتی، تکمیلی و آنالیز بود که ایمنی و کارایی دستگاه را تضمین کرد. تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که انتخاب متریال، مانند چدن نشکن برای گیربکس‌ها و فولاد کروم‌دار برای بلبرینگ‌ها، تأثیر قابل‌توجهی بر دوام و عملکرد دستگاه دارد. تیغه‌های C شکل با زاویه بهینه و طراحی دندانه‌دار، اصطکاک را کاهش داده و خاک‌ورزی را بهبود بخشیدند. مکانیزم‌های تاشو، قفل‌کن‌های هیدرولیک و مجموعه فاروئر، امکان خاک‌ورزی و جوی‌سازی هم‌زمان را فراهم کردند. شبیه‌سازی‌ها و تست‌های نهایی تأیید کردند که دستگاه در شرایط مختلف خاک و تراکتورهای با توان متفاوت عملکرد مطلوبی دارد. روتاواتور طراحی‌شده با ویژگی‌هایی مانند گاردان ۴ لنت، توبی‌های واسکازینی و بلبرینگ‌های دوردیف، هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش داد. استفاده از فناوری‌های برش لیزری CNC و چیدمان بهینه قطعات، ضایعات تولید را به حداقل رساند و دقت ساخت را افزایش داد. این دستگاه با عرض کاری ۳/۵۰ متر و قابلیت تاشو، حمل‌ونقل را آسان‌تر کرده و ایمنی اپراتور را با گاردهای محافظ تضمین نمود. این نوآوری‌ها بهره‌وری کشاورزی را افزایش داده و محصول را در بازار جهانی رقابتی کردند. این تحقیق نه تنها به توسعه یک روتاواتور کارآمد منجر شد، بلکه چارچوبی برای طراحی ماشین‌آلات کشاورزی با تأکید بر پایداری و مقرون‌به‌صرفه بودن ارائه داد. یافته‌ها می‌توانند در بهبود سایر ابزارهای خاک‌ورزی و توسعه فناوری‌های کشاورزی هوشمند به کار روند. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و ادغام حسگرهای هوشمند برای پایش خاک تمرکز کنند. این مطالعه گامی مهم در جهت کشاورزی پایدار و افزایش بهره‌وری در مناطق با شرایط اقلیمی متنوع است.

۵- پیشنهادهای توسعه‌ای

مطابق مطالعات انجام شده برای توسعه محصول می‌توان یک سنسور بر روی اسکی‌های طرفین نصب نمود که مقدار فشردگی خاک را

تشخیص داده و متناسب با آن به کمک جک‌های هیدرولیک عمق را تنظیم نماید. همچنین با نصب سیستم GPS می‌توان سطح خاک‌ورزی شده را از سطحی که خاک‌ورزی نشده تشخیص داد که موجب افزایش دقت در عملیات کشاورزی، مدیریت بهینه منابع را به همراه دارد. این فناوری امکان ردیابی و نظارت بر عملکرد را فراهم می‌سازد و از پوشش کامل زمین در عملیات خاک‌ورزی اطمینان حاصل می‌شود و مسیرهای بهینه حرکت روتاواتور را مشخص و از تکرار بی‌مورد عملیات جلوگیری می‌نماید که این امر باعث کاهش مصرف سوخت، زمان و فرسودگی ماشین‌آلات می‌گردد.

۶- منابع

- [1] C. Manivelprabhu, N. Sangeetha, and T. Ramganes, "Design modification and structural analysis of rotavator blade by using HyperWorks 12.0," *Altair Technology Conference*, 2015.
- [2] S. K. Mandal, B. Basudev, and S. Mukherjee, "Optimization of design parameters for rotary tiller's blade," *Power*, Vol. 4, No. 5, 2013.
- [3] D. Prasad, P. Tupkari, P. Sharma, and A. Singh, "Computer aided design and analysis of rotavator blade," *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 312–317, 2014.
- [4] G. U. Shinde, J. M. Potekar, R. V. Shinde, and S. R. Kajale, "Design analysis of rotary tillage tool components by CAD-tool: rotavator," in *2011 International Conference on Environmental and Agriculture Engineering (IPCBE)*, Vol. 15, 2011.
- [5] G. U. Shinde and S. R. Kajale, "Computer aided engineering analysis and design optimization of rotary tillage tool components," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 1–6, 2011. doi: [10.3965/j.issn.1934-6344.2011.03.001-006](https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2011.03.001-006).
- [6] P. V. Labhsetwar, R. S. Lonkar, R. S. Rajurkar, and S. S. Arsod, "Design and failure analysis of rotavator blade by means of CAD and FEA tool," *International Journal of Advances in Engineering and Management*, Vol. 4, No. 5, pp. 1341–1347, 2022, doi: [10.35629/5252-040513411347](https://doi.org/10.35629/5252-040513411347).
- [7] G. M. Vegad and R. Yagva, "Design analysis and optimization of rotary tiller blades using

agriculture using ANSYS software,” *Science and Technology*, Vol. 3, No. 7, 2017.

[11] S. K. Mandal, B. Bhattacharyya, S. Mukherjee, and A. K. Prasad, “Design optimization of rotary tiller blade using specific energy requirement,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 1257–1263, 2016. doi: [10.14741/ijcet/22774106/6.4.2015.31](https://doi.org/10.14741/ijcet/22774106/6.4.2015.31).

[12] J. S. Mahal, G. S. Manes, A. Prakash, M. Singh, and A. Dixit, “Study on blade characteristics of commercially available rotavators in Punjab,” *Agricultural Engineering Today*, Vol. 36, No. 3, pp. 8–11, 2012.

computer software,” *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, Vol. 49, No. 1, pp. 43–49, 2018.

[8] K. C. Selvi, “A new blade design of rotary tiller and static analysis using computer-aided tool,” *Inmateh-Agricultural Engineering*, Vol. 53, No. 3, 2017.

[9] D. Kumar and P. Mohanraj, “Design and analysis of rotavator blades for its enhanced performance in tractors,” *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, Vol. 1, No. 1, pp. 160–185, 2017.

[10] G. S. Reddy, J. Narsaiah, and G. Shashikala, “Dynamic analysis on tillage equipment used in



Evaluation of mechanical properties of ultrafine-grained pure titanium produced via warm ECAP process by concurrently utilizing casing and back pressure

Reza Naseri ^{*1}

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Abstract

The application of the Equal Channel Angular Pressing (ECAP) process imposes severe plastic strains on the metallic billet. As a result of these imposed strains, the initially coarse grains are transformed into ultra-fine or nanostructured grains, and beneficial microstructural evolutions occur in the texture of the material, which lead to improvements in mechanical properties. In this study, commercially pure titanium (CP-Ti) BT1-0, as a hard-to-deform material, was placed inside a casing made of pure copper and subjected to four passes of warm ECAP at a temperature of 250°C in a 135° channel using route Bc, accompanied by the application of back pressure through extrusion in the end of die. The simultaneous effect of back pressure and the casing on the grain structure and mechanical properties of the target material, i.e., CP-Ti, was evaluated. Experimental results showed that the grain size was refined from 49 µm in the initial annealed state to 710 nm after four ECAP passes. The compressive yield and ultimate strength, and also compressive elongation changed from 267 MPa, 899 MPa, and 51.8 mm/mm in the non-ECAPed condition to 958 MPa, 1375 MPa, and 30.7 mm/mm after ECAP processes, corresponding to increases of 359% and 153%, and a decrease of 59%, respectively. The average Vickers hardness also increased from 163 Hv in the initial annealed state to 289 Hv after four ECAP passes, representing a 77% enhancement.

Keywords

Pure titanium
Warm ECAP process
Casing
Back pressure
Mechanical properties

Received: 12.06.2025

Revised: 06.05.2025

Accepted: 27.28.2025

*Corresponding Author

Reza Naseri

Email

rnaseri@tvu.ac.ir

1. Introduction

Titanium and its alloys are widely used in various industries such as aerospace, automotive, and biomedical due to advantages including low density, high specific strength, excellent corrosion resistance, low elastic modulus, high temperature resistance, good castability and weldability, relatively low cost, and most importantly, outstanding biocompatibility [1].

Metals and alloys such as titanium and magnesium, which possess a hexagonal close-packed crystal structure, as well as precipitation-hardenable alloys such as aluminum 7075, are considered hard-to-deform metals due to their low formability at low

temperatures and even at room temperature [2, 3]. When processes such as ECAP with high strains are applied to these metals at low temperatures, surface and subsurface defects, cracking, and fragmentation occur as a result of unstable plastic flow [4]. Previous studies have shown that these defects in the ECAP process can be mitigated by increasing the die channel angle, increasing the processing temperature, reducing the pressing speed, using a bimetallic sample with a casing, applying back pressure, and controlled annealing [5, 6].

In summary, in this research, warm ECAP at 250°C and a die channel angle of 135° was applied to BT1-

How to Cite this Article:

[1] R. Naseri, "Evaluation of mechanical properties of ultrafine-grained pure titanium produced via warm ECAP process by concurrently utilizing casing and back pressure," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 47–63, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.530050.1136> .(in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

0 CP-Ti inserted into a copper casing. By using an extrusion designed at the exit end of the channel (reducing the diameter from 15 mm to 10 mm) and placing a billet of pure aluminum in it, during the ECAP process, the extrusion force of the secondary material imposed a hydrostatic pressure referred to as back pressure on the titanium sample. The ECAP process was performed for four passes using route Bc, and the microstructure, compressive strength, and hardness were evaluated to investigate the simultaneous effects of warm temperature, back pressure, and the casing on the workability of CP-Ti. The compressive strength property was selected in order to examine the strength of the ultrafine-grained CP-Ti produced for potential application in compression-loaded components such as dental implants. The implementation of warm casing ECAP on CP-Ti accompanied by the simultaneous application of back pressure through the innovative method of end extrusion, resulting in successful execution of four passes of ECAP at 135° and the achievement of an ultrafine-grained structure with enhanced mechanical properties, represents the significant objectives and novelties of this study.

2. Materials and Experimental procedure

In this study, rods of CP-Ti BT1-0 were used as the core metal or billet and were press-fitted into tubular casings made of pure copper. For the back pressure material, a rod of pure Al 1070 was used due to its softness and easier plastic flow. In this method, to apply back pressure, an extrusion with a diameter reduction was designed at the exit end of the die channel. The force required to perform the extrusion results in a reaction force being applied to the ECAP specimen, known as back pressure [7].

The ECAP process was carried out at a warm temperature (not hot) of 250°C [8] using a hydraulic press with ram speed of 9 mm/s. The process was performed for up to four passes following route Bc [9]. After removing the casing from the processed material, it was observed that the four passes had been successfully applied, and no macroscopic evidence of surface cracks, subsurface defects, or noticeable fracture was present on the surface of the CP-Ti. Therefore, the titanium billet before ECAP and after the four passes of ECAP was subjected to mechanical and microstructural characterization. The microstructure evolution, compression

behavior and hardness of CP-Ti BT1-0 before and after the warm ECAP process under simultaneous application of back pressure and casing confinement was investigated according to the ASTM standards.

3. Results and Discussion

The microstructure of CP-Ti BT1-0 before and after four passes of casing ECAP accompanied by back pressure was examined using optical microscopy and is shown in Figure 1. A noticeable grain size reduction is clearly observable qualitatively in the images. The output of the MIP software indicates that the grain size decreased from 49 μm in the initial annealed state to 0.71 μm (equivalent to 710 nm), which confirms the ultrafine-grained structure of the material resulting from severe plastic deformation. Grain refinement accompanied by grain elongation along the flow direction indicates the application of a high-strain deformation process, which transformed the initially equiaxed grains into elongated secondary grains.

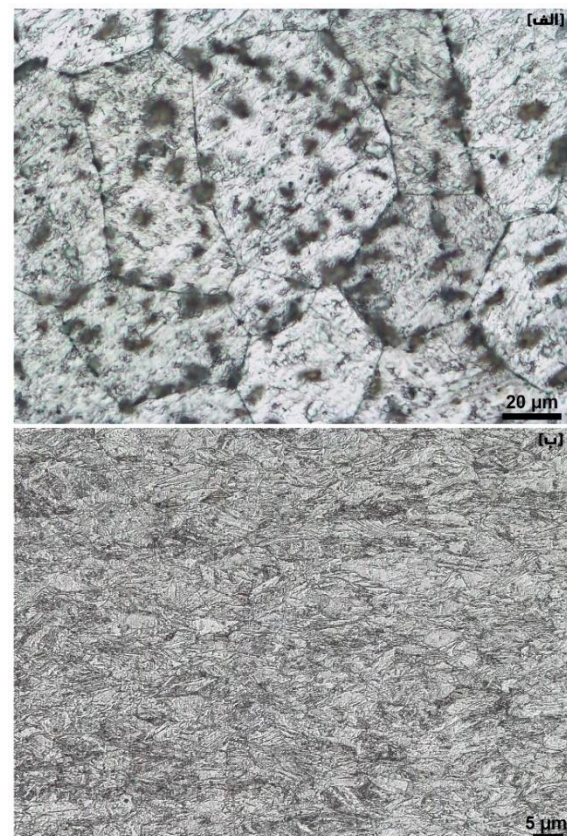


Figure 1: Optical microscopy (OM) images of CP-Ti BT1-0, (a) without ECAP (initial annealed condition), and (b) after four passes of warm casing ECAP with back pressure.

The engineering stress–strain curves obtained from the compression tests are presented in Figure 2. The results show that with the application of ECAP accompanied by the casing and back pressure, increasing the number of passes from 1 to 4 increases the compressive yield and ultimate strength of the material, while the percentage of compressive strain decreases. The yield strength (MPa), ultimate strength (MPa), and compressive strain (%) change from 267, 899, and 51.8% in the non-ECAPed condition to 958, 1375, and 30.7%, respectively, after four ECAP passes. As can be seen, increases of 153% and 359% were obtained in the compressive yield and ultimate strengths, respectively, along with a decrease of 59% in compressive strain. The trend of variations in yield strength, ultimate strength, and compressive strain during the compression tests can be observed in Figure 3.

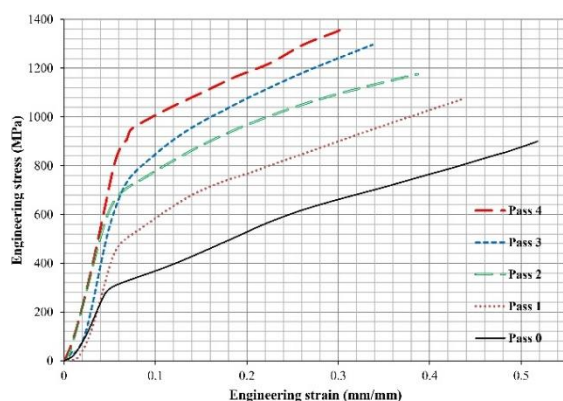


Figure 2: Engineering stress–strain curves from the compression test of CP-Ti BT1-0 before and after 1 to 4 passes of warm casing ECAP with back pressure.

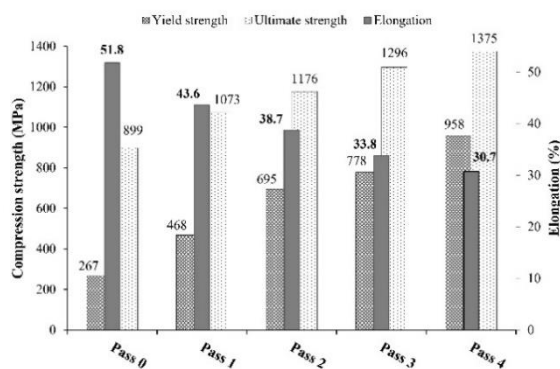


Figure 3: Variation trends of yield strength, ultimate strength, and compressive strain of CP-Ti BT1-0 during the compression test after four passes of the casing ECAP process with back pressure.

The prepared specimens were subjected to Vickers microhardness testing before and after 1 to 4 passes of the ECAP process. The results showed that increasing the number of passes increased the average hardness across the mid-section of the billet, and the hardness values increased from 163 Vickers (Hv) for the non-ECAPed (initial annealed) state to 223, 252, 278, and 289 Vickers for passes 1 through 4, respectively. A 77% increase is evident from the non-ECAPed state to the four-pass ECAP state. Figure 4 shows the hardness evolution of CP-Ti BT1-0 before and after the ECAP passes.

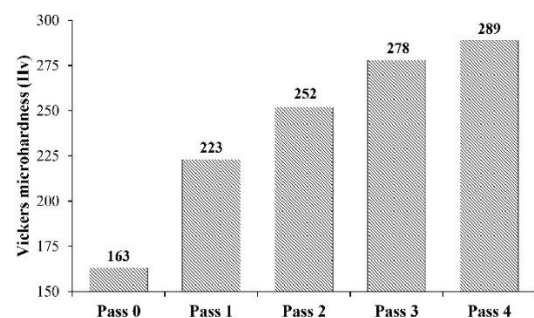


Figure 4: Trends of Vickers microhardness increase in BT1-0 samples before and after 1 to 4 passes of warm casing ECAP with back pressure.

The improvement in mechanical properties, including strength and hardness, can be attributed to the simultaneous effects of severe plastic deformation by warm ECAP, the use of the casing, and the application of back pressure in optimizing microstructural evolutions and increasing the rate of ultrafine grain formation. In addition to the increased imposed plastic strain and the resulting significant grain refinement, optimized microstructural transformations (including the formation of mechanical twins, shear bands, lamellar structures, and complex band intersections, as well as increased dislocation density, accumulation, and the increased fraction of high-angle grain boundaries) due to severe plastic deformation by ECAP lead to improved mechanical properties, which are further enhanced by the use of the casing and back pressure [7, 10].

4. Conclusion

- The successful application of four ECAP passes on CP-Ti, resulting in an approximate total average strain of about 1.84 in this hard-to-deform material without observable defects or noticeable

damage, indicates an improvement in the workability of the material due to the simultaneous application of back pressure and the use of a casing. This effect is mainly attributed to the increase in hydrostatic pressure and the reduction of fracture-related stress effects.

- Microstructural analyses showed that the grains transformed from the initially coarse equiaxed state (49 μm) to an ultrafine elongated secondary structure (710 nm).
- Evaluation of the stress-strain curves from compression testing on the initially annealed titanium samples and those processed through 1 to 4 ECAP passes indicates a significant enhancement in compressive yield and ultimate strength, along with a relative decrease in compressive strain. Quantitatively, the yield strength (MPa), ultimate strength (MPa), and compressive strain (%) changed from 267, 899, and 51.8% in the non-ECAPed (annealed) state to 958, 1375, and 30.7%, respectively, after four ECAP passes, corresponding to increases of 359% and 153% in yield and ultimate strengths, and a decrease of 59% in compressive strain.
- The Vickers microhardness assessment of the mid-section of the titanium billets showed that the average hardness value increased from 163 Hv in the initial annealed state to 289 Hv after four ECAP passes, representing a 77% improvement.

5. References

- [1] M. Geetha, A. K. Singh, R. Asokamani, and A. K. Gogia, "Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—a review," *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 54, No. 3, pp. 397–425, May 2009. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.pmatsci.2008.06.004](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004).
- [2] M. R. Roshan, S. A. J. Jahromi, and R. Ebrahimi, "Predicting the critical pre-aging time in ECAP processing of age-hardenable aluminum alloys," *J. Alloys Compd.*, Vol. 509, No. 30, pp. 7833–7839, Aug. 2011. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.jallcom.2011.05.065](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.05.065).
- [3] M. H. Shaeri, F. Djavanroodi, M. Sedighi, S. Ahmadi, M. T. Salehi, and S. H. Seyyedein, "Effect of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing," *J. Strain Anal. Eng. Des.* Vol. 48, No. 8, pp. 512–521, Dec. 2013. [Online]. Available: doi: [10.1177/0309324713495251](https://doi.org/10.1177/0309324713495251).
- [4] S. L. Semiatin, D. P. DeLo, V. M. Segal, R. E. Goforth, and N. D. Frey, "Workability of commercial-purity titanium and 4340 steel during equal channel angular extrusion at cold-working temperatures," *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 30, No. 5, pp. 1425–1435, May 1999. [Online]. Available: doi: [10.1007/s11661-999-0155-7](https://doi.org/10.1007/s11661-999-0155-7).
- [5] R. Z. Valiev and T. G. Langdon, "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement," *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 51, No. 7, pp. 881–981, Sep. 2006. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.pmatsci.2006.02.003](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003).
- [6] R. B. Figueiredo, P. R. Cetlin, and T. G. Langdon, "The processing of difficult-to-work alloys by ECAP with an emphasis on magnesium alloys," *Acta Mater.* Vol. 55, No. 14, pp. 4769–4779, Sep. 2007. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.actamat.2007.04.019](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.04.019).
- [7] R. Naseri, "Experimental evaluation of back-pressure effect on workability and mechanical properties of commercially pure titanium in cold-ECAP process," *J. Solid Fluid Mech.*, Vol. 12, No. 6, pp. 67–81, 2023. (in Persian)
- [8] K. Hajizadeh, B. Eghbali, K. Topolski, and K. J. Kurzydowski, "Ultra-fine grained bulk CP-Ti processed by multi-pass ECAP at warm deformation region," *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 143, No. 3, pp. 1032–1038, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.matchemphys.2013.12.047](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.12.047).
- [9] C. T. Wang, A. G. Fox, and T. G. Langdon, "Microstructural evolution in ultrafine-grained titanium processed by high-pressure torsion under different pressures," *J. Mater. Sci.*, Vol. 49, No. 19, pp. 6558–6564, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1007/s10853-014-8412-0](https://doi.org/10.1007/s10853-014-8412-0).
- [10] V. M. Segal, "Materials processing by simple shear," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 197, No. 2, pp. 157–164, Jul. 1995. [Online]. Available: doi: [10.1016/0921-5093\(95\)09705-8](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09705-8).



ارزیابی خواص مکانیکی تیتانیوم خالص فوق ریزدانه تولیدشده توسط فرآیند ایکپ گرم با به کارگیری همزمان غلاف و فشار پستی

رضا ناصری^{۱*}

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

کلمات کلیدی

تیتانیوم خالص
فرآیند ایکپ گرم
غلاف
فشار پستی
خواص مکانیکی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

*نویسنده مسئول

رضا ناصری

ایمیل

rnaseri@tvu.ac.ir

چکیده

به کارگیری فرآیند پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار موسوم به ایکپ (ECAP)، منجر به اعمال کرنش‌های شدید بر ماده‌ی فلزی بیلت می‌شود. در اثر وارد شدن این کرنش‌ها، دانه‌ها از حالت درشت‌دانه‌ی اولیه به فوق‌ریز دانه یا نانوساختار استحاله شده و تحولات میکرو ساختاری مفید در بافت ماده اتفاق می‌افتد که این دگرگونی‌ها به بهبود خواص مکانیکی می‌انجامد. در این تحقیق تیتانیوم خالص BT1-0 به‌عنوان یک ماده سخت کارپذیر در یک غلاف از جنس مس خالص قرار گرفته و تحت چهار گذر فرآیند ایکپ گرم با دمای °C ۲۵۰ در کانال ۱۳۵ درجه و مسیر Bc همراه با اعمال فشار پستی توسط اکستروژن انتهایی قالب قرار گرفت و اثر هم‌زمان فشار پستی و غلاف بر ساختار دانه‌بندی و خواص مکانیکی ماده‌ی هدف یعنی تیتانیوم خالص بررسی شد. نتایج تجربی نشان داد که دانه‌ها از ۴۹ μm در حالت آئیل شده‌ی اولیه به ۷۱۰ nm فوق ریزدانه پس از چهار گذر ایکپ تبدیل شدند. استحکام تسلیم فشاری، استحکام نهایی فشاری و تغییر طول نسبی فشاری از MPa ۲۶۷، MPa ۸۹۹ و ۵۱/۸ mm/mm برای حالت ایکپ نشده به MPa ۹۵۸، MPa ۱۳۷۵ و ۳۰/۷ mm/mm برای حالت چهار گذر ایکپ شده تغییر یافته و به ترتیب به میزان ۳۵۹٪ افزایش، ۱۵۳٪ افزایش و ۵۹٪ کاهش یافتند. مقدار سختی ویکرز میانگین هم با افزایش از Hv ۱۶۳ برای حالت آئیل شده‌ی اولیه به Hv ۲۸۹ بعد از اعمال چهار گذر ایکپ، به میزان ۷۷٪ ارتقا یافته است.

۱- مقدمه

می‌گردد [۳ و ۴]. از این رو استفاده از فلزات خالص زیست‌سازگار که دارای استحکام مکانیکی مناسبی باشند در صنعت پزشکی رو به افزایش است. تیتانیوم خالص به دلیل خواص زیست‌سازگاری عالی، جزء اولین گزینه مهندسان پزشکی است ولی استحکام استاتیکی و دینامیکی پایینی دارد [۱ و ۳ و ۵].

تیتانیوم و آلیاژهای آن به دلیل مزایایی نظیر چگالی پایین، استحکام مخصوص بالا، مقاومت خوردگی بی‌نظیر، مدول الاستیسیته پایین، مقاومت دمایی بالا، قابلیت ریخته‌گری و جوشکاری خوب، قیمت نسبتاً پایین و مهم‌تر از همه زیست‌سازگاری عالی به‌طور وسیعی در صنایع مختلف نظیر هوافضا، خودروسازی و بایوپزشکی مورد استفاده واقع می‌شوند [۱-۳]. آلیاژهای تیتانیوم نظیر آلیاژ پر کاربرد Ti-6Al-4V به دلیل وجود درصد قابل توجهی از عناصر آلیاژی مضر نظیر آلومینیم و وانادیوم به هنگام استفاده در صنعت پزشکی به‌عنوان ایمپلنت‌های دندان‌ی و ارتوپدیک با آزادسازی یونی در بدن منجر به ایجاد بیماری‌های عصبی، آلزایمر، سرطان، التهابات پوستی، استخوان نرمی و دیگر امراض

How to Cite this Article:

[1] R. Naseri, "Evaluation of mechanical properties of ultrafine-grained pure titanium produced via warm ECAP process by concurrently utilizing casing and back pressure," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 47-63, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.530050.1136> (in Persian)



ایکپ (ECAP^۱) به عنوان یکی از مهم ترین و پرکاربردترین فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD^۲) شناخته می شود که به دلیل به کارگیری نسبتاً آسان، هزینه عملیات پایین و بازدهی بالا بسیار مورد توجه است. در این فرآیند ماده فلزی (بیلت) تحت فشار پرس از دو کانال هم مقطع متقاطع عبور کرده و در هنگام عبور از محل تقاطع دو کانال، تحت تنش برشی شدید و بالطبع کرنش پلاستیک بسیار زیاد قرار می گیرد. این کرنش پلاستیک بالا منجر به تحولات میکروساختاری مفید در ماده خواهد شد. در این فرآیند طی اعمال چندین گذر^۳ عملیات، ماده فلزی درشت دانه (CG^۴) اولیه به صورت فوق ریزدانه (UFG^۵) و یا نانوکریستال (NC^۶) با اندازه دانه های در محدوده میکرو و حتی نانو استحاله شده و بر اساس رابطه Hall-Petch استحکام استاتیکی و دینامیکی آن در اثر کاهش اندازه دانه، افزایش چشمگیر می یابد. تحولات میکروساختاری درون دانه ای نظیر تبدیل مرز دانه های زاویه پایین (LAGBs^۷) به مرز دانه های زاویه بالا (HAGBs^۸)، تشکیل دوقلوئی های مکانیکی، افزایش چگالی، حرکت، انباشت و قفل شدگی نابجایی ها^۹، تشکیل ساختارهای لایه ای، نوارهای برشی و باندهای پیچیده متقاطع و غیره نیز بر ارتقای خواص مکانیکی و متالورژیکی ماده مؤثر هستند [۶-۱۰].

فلزات و آلیاژی های مانند تیتانیوم و منیزیم که دارای سیستم کریستالی شش وجهی فشرده (HCP^{۱۰}) هستند و همچنین آلیاژهای با قابلیت پیرسختی^{۱۱} بالا نظیر آلومینیم ۷۰۷۵، به دلیل قابلیت شکل پذیری پایین در دماهای پایین و حتی دمای محیط به عنوان فلزات سخت کارپذیر^{۱۲} شناخته می شوند [۱۱-۱۴]. در صورتی که بر این فلزات، عملیاتی نظیر ایکپ با کرنش های بالا در دمای پایین وارد آید، به دلیل سیلان ناپایدار، عیوب سطحی و زیرسطحی، ترک خوردگی و تکه تکه شدگی در آنها اتفاق می افتد [۱۱، ۱۴ و ۱۵]. پژوهش های صورت گرفته نشان می دهد که می توان این عیوب را در فرایند ایکپ با افزایش زاویه کانال قالب، افزایش دمای فرایند، کاهش سرعت پرسکاری، استفاده از نمونه دوفلزی با بکارگیری غلاف^{۱۳} پیرامون بیلت،

اعمال فشار پستی^{۱۴} و آنیل کنترل شده برطرف کرد [۶ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۶-۲۱].

هر کدام از روش های ذکر شده جهت سیلان مواد سخت کارپذیر طی فرآیند ایکپ، دارای مزایا و معایبی هستند. افزایش زاویه کانال از مقدار کرنش وارده کاسته و نیاز به اعمال گذرهای بیشتر را ایجاد می کند. ایکپ دما بالا (داغ^{۱۵}) به دلیل مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی^{۱۶} و ممانعت از پالایش مناسب دانه ها، راه حل چندان مناسبی نیست. ایکپ گرم^{۱۷} دارای معایب ایکپ سرد^{۱۸} و داغ نبوده و صرفاً با مکانیزم بازبایی دینامیکی^{۱۹}، از حیث تحولات میکروساختاری و بهبود خواص مکانیکی راندمان مناسبی دارد. کاهش سرعت پرس کاری منجر به طولانی شدن عملیات شکل دهی خواهد شد ولی مزایای قابل توجهی دارد که در همه فرآیندها الزاماً در نظر گرفته می شود. آنیل کنترل شده از سهولت عملیات کاسته و هزینه های بالایی را تحمیل می کند [۶ و ۲۲]. غلاف و فشار پستی با ایجاد تنش هیدرواستاتیک در منطقه تغییر شکل، احتمال تغییر شکل پلاستیکی شدید را افزایش داده با بالابردن کرنش و همگنی توزیع آن، به ایجاد میکروساختار ریزدانه تر و همگن تر و بالطبع ارتقای خواص مکانیکی کمک می کنند [۱۶ و ۱۹].

مکانیزم اصلی اثر غلاف در دو جنبه کلیدی نهفته است: اولاً، غلاف با محصور کردن بیلت اصلی، منجر به افزایش مؤلفه تنش هیدرواستاتیک^{۲۰} در منطقه تغییر شکل می شود [۱۲ و ۲۳]. این افزایش فشار هیدرواستاتیک، شروع و رشد ترک ها و حفره ها را در ماده اصلی به شدت مهار کرده و به این ترتیب، امکان اعمال تغییر شکل های پلاستیک بزرگ تر را بدون شکست فراهم می آورد [۲۴]. ثانیاً، غلاف می تواند به کاهش اصطکاک بین بیلت و دیواره های قالب کمک کند، به خصوص اگر ماده غلاف دارای ضریب اصطکاک پایین تری باشد و یا به عنوان یک لایه روان کننده عمل کند. این کاهش اصطکاک منجر به جریان یکنواخت تر ماده و کاهش تنش های برشی غیرمطلوب می شود که به بهبود همگنی ریزساختار و خواص مکانیکی نهایی بیلت ایکپ شده کمک می کند [۱۲ و ۱۶]. ثابت شده است که استفاده از غلاف با

^{۱۱} Age Hardening

^{۱۲} Difficult-to-work alloys

^{۱۳} Casing

^{۱۴} Back pressure

^{۱۵} Hot ECAP (0.5 Tm < T < 0.8 Tm, Tm: Melting temperature)

^{۱۶} Dynamic recrystallization

^{۱۷} Warm ECAP (0.3 Tm < T < 0.5 Tm, Tm: Melting temperature)

^{۱۸} Cold ECAP (RT: Room temperature)

^{۱۹} Dynamic recovery

^{۲۰} Hydrostatic stress

^۱ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

^۲ Severe Plastic Deformation (SPD)

^۳ Pass

^۴ Coarse grain (CG)

^۵ Ultra-Fine Grains (UFG)

^۶ Nano-Crystalline (NC)

^۷ Low Angle Grain Boundaries (LAGBs)

^۸ High Angle Grain Boundaries (HAGBs)

^۹ Dislocations

^{۱۰} Hexagonal Close Packed (HCP)

ضخامت مناسب (عدم استفاده از غلاف با ضخامت بالا [۱۹ و ۲۵]) منجر به کاهش نیروی شکل‌دهی، افزایش سطح منطقه تغییر شکل، افزایش تعداد گذرهای قابل انجام، افزایش کرنش متوسط، افزایش سختی متوسط، بهبود همگنی میکروساختار و ارتقای استحکام مکانیکی می‌گردد [۱۲، ۱۹]. کاهش اندازه دانه، افزایش نرخ پالایش دانه‌ها، یکنواخت شدن توزیع کرنش و ساختار دانه‌بندی، جلوگیری از ترک سطحی و بالطبع تولید مواد بدون نواقص سطحی، افزایش خواص مکانیکی و کاهش پراکندگی خواص مکانیکی نظیر سختی از دیگر مزایای استفاده از غلاف در فرآیند ایکپ است [۷ و ۱۶-۱۹].

در مورد به‌کارگیری غلاف در فرآیند ایکپ، ایوانی و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۰۷ اولین بار این روش مبتکرانه را برای تولید میله‌های دوفلزی با استفاده از فرآیند ایکپ معرفی کردند. در سال ۲۰۱۱، زبردست و همکارانش [۲۷] نشان دادند که میله دوفلزی آلومینیم-مس می‌تواند با استفاده از فرآیند ایکپ سرد و جوش سرد دو ماده تولید شود. جوانرودی و همکارانش [۲۸]، در سال ۲۰۱۲، از روش جدیدی به نام پوشش لوله غلافی (CCT^۱) برای افزایش همگنی و توزیع کرنش در مواد ایکپ شده استفاده کردند. در مطالعه‌ای مشابه، شاعری و همکارانش [۱۲] تأثیر غلاف مسی را بر توزیع کرنش و خواص مکانیکی آلومینیم سری هفت ایکپ شده بررسی کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت غلاف، همگنی کرنش بهبود یافته و همچنین سختی و استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. ناصری و همکارانش [۱۶] هم در سال ۲۰۱۶، اثر غلاف را بر یکنواختی کرنش و خواص مکانیکی آلومینیم ۷۰۷۵ غلاف شده با مس به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. نتایج آن‌ها افزایش قابل توجه در مقدار کرنش، بهبود همگنی کرنش و ارتقای خواص مکانیکی را نشان داد.

اعمال فشار پستی در فرآیند ایکپ به‌عنوان یک تکنیک بسیار مؤثر برای بهبود قابلیت شکل‌پذیری مواد، به‌ویژه آن‌هایی که در شرایط معمول دچار ترک‌خوردگی یا گسیختگی می‌شوند، مطرح است. در این روش، علاوه بر نیروی فشاری اصلی که بیلته را به داخل قالب هدایت می‌کند، یک نیروی فشاری اضافی به‌صورت کنترل‌شده از انتهای کانال خروجی قالب به نمونه اعمال می‌گردد. مکانیزم اصلی اثر فشار پستی، افزایش قابل توجه مؤلفه تنش هیدرواستاتیک در منطقه تغییر شکل است [۲۹-۳۱]. فشار هیدرواستاتیک نیروهای کششی را بدون آنکه بر میزان تنش برشی اثر بگذارد؛ کاهش می‌دهد. از این‌رو تمایل به

ترک‌خوردگی را کاهش داده و قابلیت شکل‌پذیری ماده را ارتقا می‌دهد. افزایش تنش هیدرواستاتیک باعث می‌شود که پدیده‌های مؤثر بر زوال مانند ایجاد و رشد حفره‌ها و ترک‌ها به‌شدت سرکوب شوند. این مهم به ماده اجازه می‌دهد تا مقادیر بیشتری از کرنش پلاستیک را بدون تجربه‌ی شکست تحمل کرده و در نتیجه، امکان انجام تعداد گذرهای بیشتر و دستیابی به دانه‌های فوق ریزدانه را فراهم آورد [۱۹، ۲۳]؛ به عبارت دیگر فشار پستی، منجر به بهبود چشمگیر کارپذیری^۲ به‌عنوان حد یک ماده در تحمل کرنش بدون ایجاد عیوب و نقایص سطحی و عمقی در مقیاس مایکرو و میکرو، می‌گردد [۳۲]. علاوه بر این، فشار پستی می‌تواند با پر کردن قوس خارجی کانال (زاویه گوشه) و رفع منطقه‌ی مرده به همگن‌سازی سیلان ماده و توزیع کرنش یکنواخت در سراسر مقطع بیلته کمک کند، که این امر منجر به تشکیل میکروساختار همگن‌تر و خواص مکانیکی بهبود یافته در ماده نهایی می‌گردد [۱۹ و ۳۳]. ثابت شده است که فشار پستی بر میزان ریزش‌دگی دانه‌ها تأثیر چشمگیری دارد ولی پژوهش‌های بیشتری نیاز است تا دقیق مشخص گردد که ریزش‌دگی دانه‌ها در اثر فشار پستی به دلیل تغییر الگوی سیلان فلزی در هنگام تغییر شکل است یا اینکه فشار اعمالی معکوس مستقیماً در تحولات میکروساختاری نقش دارد [۶ و ۳۳ و ۳۴].

مطالعاتی بر اثر فشار پستی در فرآیند ایکپ مواد سخت کارپذیر، انجام شده است. اثر دما و فشار پستی بر میکروساختار تیتانیوم خالص توسط راب و همکارانش در سال ۲۰۰۴ [۳۵] بررسی شد. تحقیقات آن‌ها نشان داد که فشار پستی حتی با کاهش دما هم می‌تواند به ارتقای شکل‌پذیری ماده و تحمل کرنش‌های بالاتر و ساختار با مقیاس نانو بیانجامد. چروینسکی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۳۶]، با اعمال فشار کنترل‌شده در ایکپ گرم/داغ تیتانیوم خالص، بهبود عمر خستگی و شکل‌پذیری آن را بررسی کردند. در سال ۲۰۱۳، استرین و همکارانش [۳۷] با ایکپ گرم تیتانیوم خالص با اعمال هم‌زمان فشار پستی، خواص مکانیکی و زیست‌سازگاری^۳ ماده را جهت استفاده در صنعت پزشکی بررسی کردند. نشان داده شد که با اعمال این فرآیند، نانوساختار با خواص مکانیکی ارتقا یافته همراه با زیست‌سازگاری عالی به دست می‌آید. جاگر و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۳۸]، با ایکپ سرد تیتانیوم خالص همراه با اعمال فشار پستی، به‌اندازه دانه بسیار ریز نانوساختاری دست یافتند.

³ Biocompatibility¹ Covered Tube Casing (CTC)² Workability

نمونه‌های دو-ماده‌ای فلزی است [۱۲ و ۱۶ و ۲۸]. میلگردهایی از جنس تیتانیوم خالص BT1-0 به‌عنوان فلز هسته یا بیلت درون غلاف‌هایی لوله‌ای شکل از جنس مس خالص به‌صورت انطباق پرسی با تolerانس تقریبی ± 0.1 میلی‌متر جا زده شدند. طول و قطر بیلت تیتانیومی به ترتیب ۹۰ و ۱۰ میلی‌متر و طول، قطر خارجی و قطر داخلی غلاف مسی به ترتیب برابر با ۹۰، ۱۵ و ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۱ نمایی شماتیک و ابعادگذاری شده از نمونه‌ی دو-فلزی قبل از اعمال فرآیند ایکپ نشان داده شده است. برای ماده فشار پستی از میلگردی با جنس آلومینیوم خالص ۱۰۷۰ به دلیل نرمی و سیلان راحت‌تر و به طول و قطر به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۱۵ میلی‌متر استفاده گردید. در این روش جهت اعمال فشار پستی از یک اکستروژن با کاهش قطر از ۱۵ به ۱۰ میلی‌متر در انتهای کانال خروجی قالب استفاده شد. نیروی موردنیاز جهت انجام اکستروژن منجر به اعمال نیروی برگشتی به نمونه ایکپ تحت عنوان فشار پستی خواهد شد [۱۹].

ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص BT1-0، مس خالص و آلومینیوم خالص ۱۰۷۰ با استفاده از روش اسپکترومتری نشری به دست آمد. بر اساس آزمون انجام‌شده، ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص تجاری، مس خالص و آلومینیوم خالص ۱۰۷۰ برحسب درصد وزنی به‌صورت زیر به دست آمد:

- CP-Ti BT1-0 (Ti 99.27, Al 0.372, Fe 0.201, Mn 0.079, C 0.043, V 0.029)
- Pure Cu (Cu 99.92, Fe 0.027, Zn 0.024, Cd 0.008, Pb 0.005, Ag 0.003, Si 0.002)
- Al 1070 (Al 99.74, Fe 0.13, Sn 0.052, Mg 0.031, V 0.011, Ga 0.011, Zn 0.01, Mn 0.003, Ti 0.003, Si 0.002)

آنیل این نمونه‌ها قبل از اعمال فرآیند، برای حذف تنش‌های پسماند و همگن‌سازی و پایدار کردن میکروساختار انجام شد [۳۸]. بدین جهت، پیش از انطباق بیلت و غلاف، بیلتهایی از جنس تیتانیوم خالص به مدت ۱ ساعت در دمای 800°C در کوره قرار داده‌شده [۴۶] و [۴۷] و سپس در داخل کوره خاموش سرد شدند. با این عملیات حرارتی یک میکروساختار هم‌محور و همگن با میانگین اندازه دانه درشت ۴۹ میکرومتر برای ماده‌ی هدف یعنی تیتانیوم خالص BT1-0 به دست آمد [۴۸]. غلاف‌های ساخته‌شده از مس خالص نیز به مدت ۱ ساعت در دمای 600°C حرارت‌دهی و در داخل کوره خاموش سرد گشتند [۲۵]. میلگردهای فشار پستی از جنس آلومینیوم ۱۰۷۰ نیز به

طی سالیان گذشته تحقیقات مناسبی در ایکپ دما پایین (سرد) [۷ و ۱۷ و ۱۸ و ۳۹ و ۴۰] و دما بالا (گرم/داغ) [۴۱-۴۵] روی تیتانیوم خالص صورت گرفته است. عمده این پژوهش‌ها بر ارزیابی میکروساختاری، کارپذیری، بهبود خواص متالورژیکی و ارتقای خواص مکانیکی استاتیکی و دینامیکی نظیر سختی، رفتار کششی و فشاری، خستگی، خوردگی و خستگی-خوردگی متمرکز شده‌اند. در اکثر این تحقیقات یک یا نهایتاً دو پارامتر ایکپ نظیر دما، غلاف، فشار پستی، سرعت پرس‌کاری و غیره تغییر یافته و اثر آن بر کارپذیری و ایکپ موفق تیتانیوم خالص مورد بررسی واقع شد. ولی در این آزمون با به‌کارگیری هم‌زمان سه پارامتر مؤثر دمای گرم، غلاف و فشار پستی، اعمال فرآیند ایکپ موفق بر تیتانیوم خالص امکان‌سنجی گردید. به‌طور خلاصه، در این تحقیق، فرآیند ایکپ گرم در دمای 250°C درجه سانتی‌گراد و زاویه کانال 135° درجه، بر تیتانیوم خالص BT1-0 غلاف شده در لوله‌ای مسی اعمال شد. با استفاده از اکستروژن طراحی‌شده در انتهای کانال خروجی (کاهش قطر از ۱۵ به ۱۰ میلی‌متر) و قرار دادن یک بیلت از جنس آلومینیوم خالص در آن، همراه با اعمال فرآیند ایکپ، نیروی ناشی از اکستروژن ماده‌ی ثانویه، فشاری هیدرواستاتیک تحت عنوان فشار پستی بر نمونه تیتانیومی وارد می‌آورد. فرآیند ایکپ طی چهار گذر در مسیر Bc انجام و میکروساختار، استحکام فشاری و سختی جهت بررسی اثر هم‌زمان دمای گرم، فشار پستی و غلاف در کارپذیری تیتانیوم خالص مورد ارزیابی قرار گرفت. خاصیت مکانیکی استحکام فشاری با هدف بررسی استحکام تیتانیوم خالص فوق ریزدانه تولیدشده جهت به‌کارگیری در کاربردهای تحت تنش فشاری نظیر ایمپلنت‌های دندانی انتخاب شد. انجام فرآیند ایکپ گرم غلافی بر تیتانیوم خالص همراه با اعمال هم‌زمان فشار پستی با روش خلاقانه‌ی استفاده از اکستروژن انتهایی و در نتیجه اعمال موفق ۴ گذر ایکپ 135° درجه و دستیابی به ساختار فوق ریزدانه با خواص مکانیکی ارتقا یافته، از اهداف و نوآوری‌های قابل‌اعتنای این تحقیق است.

۲- مواد و روش‌ها

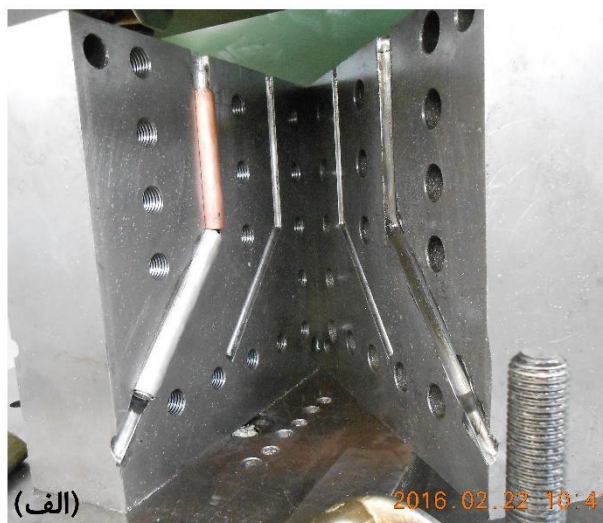
۲-۱- مواد

در این مطالعه از نمونه‌های دو-ماده‌ای^۱ به‌صورت ماده‌ی هدف (هسته^۲) و ماده‌ی فدا شونده (غلاف) جهت به‌کارگیری در فرآیند ایکپ استفاده شد. افزایش همگنی میکروساختار، بهبود یکنواختی توزیع کرنش مؤثر، ارتقای خواص مکانیکی و کاهش نیروی شکل‌دهی از دلایل استفاده از

² Core

¹ Bi-material specimens

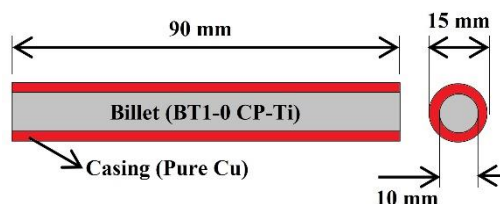
از پیکربندی قالب، پیش و بعد از اعمال فرآیند ایکپ گرم همراه با اعمال فشار پستی نشان داده شده است.



شکل ۲: نمایی از پیکربندی قالب (الف) پیش و (ب) پس از اعمال فرآیند ایکپ گرم همراه با اعمال فشار پستی

اثبات شده است که استفاده از مسیر Bc، منجر به تشکیل سریع میکروساختار فوق ریزدانه و نانوساختار همگن و هم‌محور با مرزهای زاویه بالا می‌شود [۲۵ و ۵۱]. با عبور ماده در زاویه کانال و گوشه مذکور، در هر گذر جداگانه کرنشی حدود ۰/۴۶ بر نمونه اعمال می‌شود [۶]. بعد از جدا کردن غلاف‌ها از روی ماده‌ی هدف، نشان داده شد که ۴ گذر اعمال شده موفق بوده و هیچ نشانه ماکروسکوپیکی از ترک‌های سطحی، عیوب زیرسطحی و یا شکست محسوسی در سطح تیتانیوم خالص وجود ندارد. لذا بیلت تیتانیومی قبل و بعد از اعمال ۴ گذر ایکپ مورد بررسی خواص مکانیکی و میکروساختاری واقع شد.

مدت ۳۰ دقیقه در دمای 375°C گرمادهی و سپس در کوره خاموش سرد گردیدند [۱۸].



شکل ۱: نمایی شماتیک و ابعادگذاری شده از نمونه دو-فلزی ایکپ

۲-۲- فرآیند ایکپ

قالب ایکپ مورد استفاده دارای دو لنگه و چهار کانال با مقطع دایروی شکل است که از جنس فولاد ابزار گرمکار AISI 1.2714 ساخته و تا حدود RC ۵۲ سخت‌کاری شد. در این مطالعه صرفاً از کانال با قطر ۱۵ میلی‌متر، زاویه کانال 135° و زاویه گوشه 20° با قابلیت اکستروژن انتهایی با کاهش قطر از ۱۵ به ۱۰ میلی‌متر در انتهای کانال خروجی استفاده گردید. در اثر اکستروژن شدن ماده‌ی فشار پستی (میلگرد آلومینیم خالص ۱۰۷۰)، نیروی معکوسی به انتهای نمونه دو-فلزی وارد می‌آید که نقش فشار پستی بر ماده قطعه‌کار را در فرآیند ایکپ ایفا می‌کند. بررسی‌ها نشان داده است؛ در اثر اکستروژن میلگرد آلومینیم خالص که به ترتیب دارای کرنش نهایی، استحکام کششی تسلیم و استحکام کششی نهایی برابر با ۳۳٪، ۶۱ MPa و ۸۹ MPa است؛ مقدار فشار پستی ایجادشده برابر با ۱۸۵ MPa خواهد بود که این مقدار از اختلاف نیروی شکل‌دهی در حالت ایکپ با و بدون فشار پستی به‌دست‌آمده است [۱۹].

در این تحقیق، فرآیند ایکپ در دمایی گرم (نه داغ) برابر با 250°C [۴۹] با استفاده از یک پرس هیدرولیک با ظرفیت اسمی ۶۰ تن و سرعت رم ۹ mm/s صورت گرفت. جهت اعمال دما بر تیتانیوم خالص، بیلتهای تیتانیومی پیش از جازدن در غلاف در داخل کوره به دمای $(15-10) \pm 25^{\circ}\text{C}$ رسانده شده و برای گذر اول به‌سرعت در غلاف‌ها به‌صورت پرس‌ی انطباق‌دهی می‌گردند. برای گذرهای بعدی همراه با غلاف مسی به دمای مذکور رسانده می‌شود. سپس بی‌درنگ با استفاده از روانکار مولیکوت^۱ (روانکار پایه روغن معدنی فرموله شده با روانکارهای جامد مس، گرافیت و مواد سفید با تحمل دمایی تا 650°C)، فرآیند ایکپ بر نمونه‌ها تا ۴ گذر در مسیر Bc (چرخش در یک‌جهت به میزان ۹۰ درجه) [۵۰] اعمال می‌گردد. در شکل ۲ نمایی

^۱ MOLYKOTE ® 1000 PASTE

کاربردی در ایمپلنت‌های دندانی [۵۲-۵۴] انجام شد. از استاندارد ASTM E9-89 در دستگاه تک‌محوره‌ی Zwick Z-250 با نرخ کرنش 0.004 s^{-1} برای انجام آزمون فشار روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر $4/5 \text{ mm}$ و ارتفاع 8 mm با نسبت ارتفاع به قطر $1/78$ استفاده گردید [۵۵]. برای کاهش اثرات اصطکاکی نیز سطح تماس بین نمونه و فک‌های دستگاه با روانکار دی‌سولفید مولیبدن (MoS_2) روانکاری شد. کلیه آزمون‌ها در دمای محیط صورت گرفت و جهت صحت‌بخشی به نتایج از حداقل سه آزمون فشار استفاده گردید [۱۹].

سختی‌سنجی نمونه‌های تیتانیومی قبل و بعد از اعمال فرآیند ایکپ، بر طبق استاندارد ASTM E92 با استفاده از سختی‌سنج Buehler سری ۱۶۰۰ انجام و میانگین میکروسختی ویکرز (Hv) نمونه‌ها گزارش شد. نمونه‌ها مشابه مراحل صورت گرفته جهت آزمون متالوگرافی تا سطح شبه‌آینه آماده‌شده و سپس تحت بار 1 kgf و زمان بارگذاری 10 s قرار گرفتند. همچنین برای اعتباربخشی به نتایج از میانگین حداقل ۵ آزمون سختی جداگانه در هر نمونه استفاده گردید [۷ و ۱۷-۱۹].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- میکروساختار

میکروساختار تیتانیوم خالص BT1-0 پیش و پس از اعمال چهار گذر ایکپ غلافی همراه با به‌کارگیری فشار پشتی، توسط میکروسکوپ نوری بررسی و در شکل ۴ نشان داده شد. کاهش محسوس اندازه دانه به‌وضوح به‌صورت کیفی در تصاویر نمایان است. خروجی نرم‌افزار MIP نشان می‌دهد که اندازه دانه از $49 \mu\text{m}$ در حالت آنیل شده اولیه به $0.71 \mu\text{m}$ معادل 710 nm کاهش یافته است که این مهم بیانگر فوق ریزدانه‌ی ماده در اثر تغییر شکل پلاستیکی شدید است. ریزشدگی دانه‌ها همراه با کشیدگی آن‌ها در مسیر سیلان بیانگر اعمال فرآیند شکل‌دهی با کرنش بالا است که منجر به تحول دانه‌های هم‌محور^۵ اولیه به دانه‌های کشیده^۶ ثانویه گشت است. ثابت شده است که می‌توان بهبود خواص مکانیکی را علاوه بر کاهش اندازه دانه و اثر مستقیم رابطه‌ی Hall-Petch، به تحولات میکروساختاری درون دانه‌ای نظیر تشکیل ساختارهای لایه‌ای، نوارهای برشی، دوقلوئی‌های مکانیکی، افزایش چگالی، انباشت و قفل‌شدگی نابجایی‌ها، توسعه مرزدانه‌های

شکل ۳: نمایی از بیلست تیتانیومی جداشده از غلاف بعد از اعمال ۴ گذر موفق ایکپ گرم همراه با فشار پشتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمایی از بیلست تیتانیومی جداشده از غلاف بعد از اعمال ۴ گذر ایکپ گرم همراه با فشار پشتی

۳-۲- آزمون‌های تجربی

در این پژوهش، ارزیابی میکروساختار تیتانیوم خاص BT1-0 آنیل شده اولیه و ایکپ شده جهت بررسی تحولات میکروساختاری، تغییرات اندازه دانه و اثبات فوق ریزدانه‌ی ماده انجام شد. از آزمون‌های فشار و سختی هم برای بررسی ارتقای خواص مکانیکی ماده هدف از حالت درشت‌دانه اولیه به فوق ریزدانه نهایی بعد از اعمال فرآیند تغییر شکل پلاستیکی شدید استفاده گردید.

میکروساختار تیتانیوم خالص BT1-0 پیش و پس از اعمال فرآیند ایکپ گرم تحت اعمال هم‌زمان فشار پشتی و به‌کارگیری غلاف، با طی مراحل از متالوگرافی بررسی شد. ابتدا نمونه‌هایی از میانه‌ی بیلست و عمود بر راستای اکستروژن بریده شد و پس از مانع داغ، سنباده و پولیش شدند. بدین منظور از ورق‌های سنباده سیلیکون کارباید (SiC) شماره ۱۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰ به ترتیب استفاده شد و سپس به‌صورت دستی و اتوماتیک توسط ذرات آلومینای $0.3 \mu\text{m}$ میکرومتر تا سطح شبه‌آینه صیقل‌کاری گردید. جهت نمایش مرزدانه‌ها، اچ نمونه‌های آماده‌شده با غوطه‌وری به مدت ۷۰ ثانیه در محلولی محتوی آب مقطر، اسید فلوئوریدریک و هیدروژن پراکساید با فرمولاسیون مشخص‌شده^۱ انجام و سطح نمونه‌ها بلافاصله بعد از شستشو با الکل با گرمای مستقیم خشک گردید. مرزدانه‌های خورده شده باعث نمایان شدن دانه‌ها هنگام مشاهده با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM^2) مدل Olympus BX60M می‌گردد. سپس با روش جدایش خطی^۳ و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل عکس MIP^۴ و بر اساس استاندارد ASTM E 112-96 اندازه متوسط دانه‌ها با استفاده از تصاویر میکروساختار به دست آمد [۷ و ۳۹].

آزمون فشار برای بررسی میزان بهبود خواص مکانیکی تیتانیوم خالص BT1-0، قبل و بعد از اعمال فرآیند ایکپ با تمرکز بر اهداف

^۴ Microstructural Image Processing (MIP)

^۵ Equiaxed grains

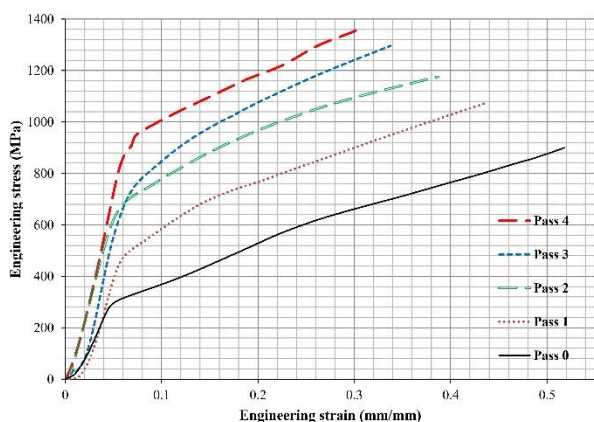
^۶ Elongated grains

^۱ H_2O (100 mL) + H_2O_2 (35%) (5 mL) + HF (2 mL)

^۲ Optical Microscopy (OM)

^۳ Line intercept method

منحنی‌های به‌دست‌آمده از حیث کیفی انطباق مناسبی با نتایج قبلی دارد [۵۸].

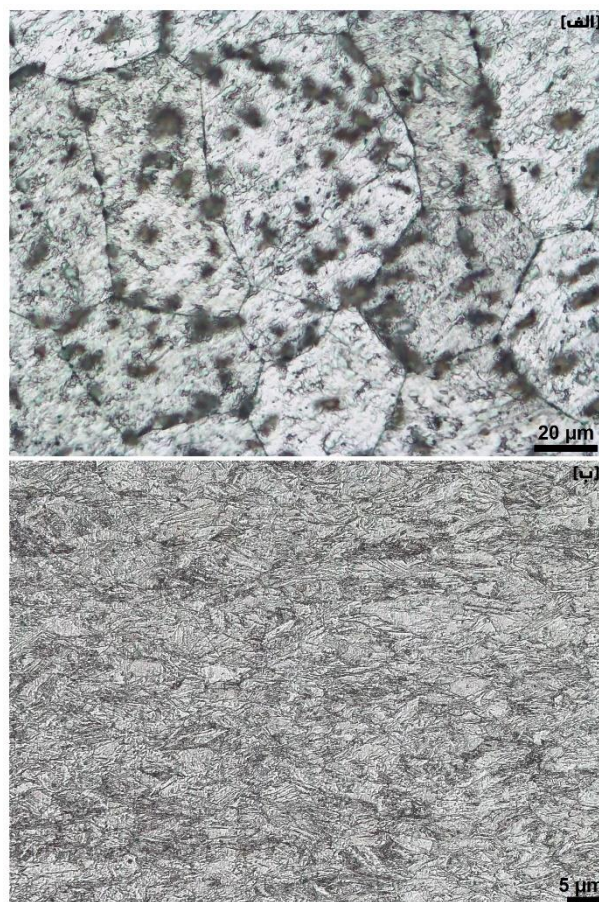


شکل ۵: منحنی تنش-کرنش مهندسی حاصل از آزمون فشار تیتانیوم خالص BT1-0 پیش و پس از اعمال گذرهای ۱ الی ۴ ایکپ گرم غلافی همراه با اعمال فشار پستی

نتایج نشان داده است که با اعمال فرآیند ایکپ همراه با غلاف و فشار پستی، با افزایش گذرها از ۱ تا ۴، بر استحکام فشاری تسلیم و نهایی ماده افزوده می‌شود ولی درصد تغییر طول نسبی کاهش می‌یابد. استحکام تسلیم (MPa)، استحکام نهایی (MPa) و تغییر طول نسبی (%) از ۲۶۷، ۸۹۹ و ۵۱/۸ برای حالت ایکپ نشده به ترتیب به ۹۵۸، ۱۳۷۵ و ۳۰/۷ برای حالت چهار گذر ایکپ شده می‌رسد. همان‌طور که مشخص است، ۱۵۳٪ و ۳۵۹٪ ارتقا به ترتیب برای استحکام تسلیم و نهایی فشاری و همچنین ۵۹٪ کاهش برای تغییر طول نسبی به‌دست‌آمده است. همچنین با مقایسه نتایج آزمون فشار مشاهده شد که در کرنش مشترک ۰/۳ در منطقه پلاستیک برای هر پنج حالت آنیل اولیه و گذرهای ۱ تا ۴، به ترتیب مقادیر تنش فشاری برابر با ۶۶۱/۵، ۸۹۹/۶، ۱۰۹۴/۱، ۱۲۴۱/۴ و ۱۳۵۳/۹ مگاپاسکال به دست آمد. این مهم نیز تأییدی مجدد بر ارتقای استحکام فشاری طی اعمال تغییر شکل پلاستیکی شدید مربوطه است.

بهبود استحکام فشاری طی این فرآیند قابل پیش‌بینی است چون ثابت شده است فشار پستی و غلاف با اعمال تنش‌های هیدرواستاتیک منجر به بهبود خواص مکانیکی ماده‌ی بیلت می‌گردند [۷ و ۱۶ و ۱۹]. لازم به ذکر است که میزان استحکام فشاری به‌دست‌آمده بعد از چهار گذر ایکپ تیتانیوم خالص BT1-0 برابر با ۱۳۷۵ MPa از مقدار استحکام فشاری تیتانیوم آلیاژی Ti-6Al-4V به میزان تقریبی ۱۳۰۰ MPa بیشتر بوده و از این حیث بسیار قابل توجه است. لذا تیتانیوم خالص فعلی با خواص زیست‌سازگاری بسیار بالا دارای استحکامی معادل با تیتانیوم آلیاژی با عیب عدم زیست‌سازگاری است که تیتانیوم

زاویه بالا، تشکیل باندهای پیچیده متقاطع و غیره نسبت داد [۳ و ۴۰ و ۵۶ و ۵۷].

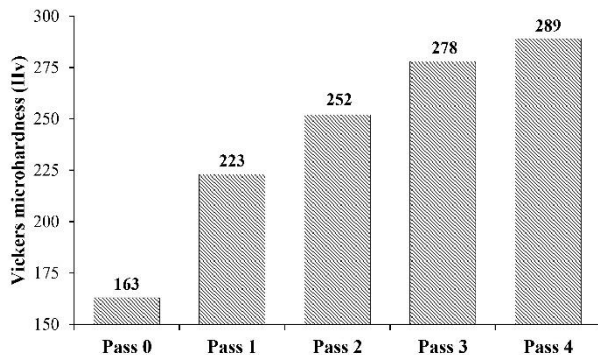


شکل ۴: تصویر میکروسکوپ نوری (OM) از تیتانیوم خالص BT1-0. (الف) ایکپ نشده (آنیل شده اولیه) و (ب) بعد از اعمال چهار گذر ایکپ گرم غلافی همراه با فشار پستی

۳-۲- استحکام فشاری

نمونه‌هایی از تیتانیوم BT1-0 در شرایط آنیل شده اولیه (ایکپ نشده) و گذرهای ۱ تا ۴ تحت آزمون فشار قرار گرفتند تا استحکام فشاری آن‌ها جهت به‌کارگیری در شرایط تحت تنش‌های فشاری نظیر ایمپلنت‌های دندانی مورد ارزیابی قرار گیرد. منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی حاصل از این آزمون‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. ارزیابی نمودارها نشان می‌دهد در همه منحنی‌ها یک حالت پایدار وجود داشته و افزایش یکنواختی در تنش سیلان ماده با افزایش کرنش در منطقه کرنش‌سختی مشاهده می‌شود. در حالت آنیل شده اولیه (گذر صفر)، تنش سیلان با طی یک محدوده وسیع پلاستیک (کرنش‌سختی) به پیک تنش یا تنش نهایی می‌رسد؛ این در حالی است که در مواد ایکپ شده محدوده کرنش‌سختی محدودتر است. مشاهده شده است که

فشار پستی به دست می‌آید که هر یک اثرات سازنده‌ای در بهبود خواص مکانیکی شامل استحکام تسلیم فشاری، استحکام نهایی فشاری و سختی داشته است.



شکل ۷: نمودار روند افزایش میکروسختی نمونه‌های BT1-0 پیش و پس از اعمال گذرهای ۱ الی ۴ ایکپ گرم غلافی همراه با اعمال فشار پستی

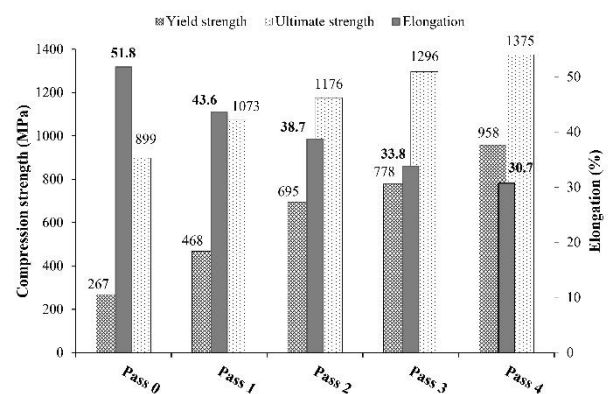
ارتقای خواص مکانیکی شامل استحکام و سختی را می‌توان به اثرات هم‌زمان تغییر شکل پلاستیکی شدید توسط ایکپ گرم، استفاده از غلاف و اعمال فشار پستی در بهینه‌سازی تحولات میکروساختاری و افزایش نرخ بالای فوق ریزدانه شدن دانه‌ها نسبت داد. علاوه بر افزایش کرنش پلاستیک وارده و بالطبع کاهش چشمگیر اندازه دانه‌ها، تحولات بهینه میکروساختاری (شامل تشکیل دوقلویی‌ها، نوارهای برشی، ساختار لایه‌ای و باندهای پیچیده و همچنین افزایش و انباشت نابجایی‌ها و افزایش حجم مرزدانه‌های زاویه بالا) در اثر اعمال فرآیند تغییر شکل پلاستیکی شدید ایکپ [۷ و ۱۷ و ۴۰] منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌گردد که بر این ارتقای خواص با به‌کارگیری غلاف و فشار پستی افزوده می‌شود. ثابت شده است که غلاف و فشار پستی با اعمال تنش‌های هیدرواستاتیک بر همگنی میکروساختار و یکنواختی توزیع کرنش افزوده و منجر به افزایش کارپذیری و بالا بردن تعداد گذرهای قابل انجام می‌شوند [۷ و ۱۶ و ۱۸ و ۱۹ و ۳۹ و ۵۹].

در ایکپ گرم نیز به دلیل فعال شدن مکانیزم‌های بازیابی، نسبت به حالت ایکپ سرد (دمای محیط)، توزیع نابجایی‌ها و کرنش یکنواخت‌تر، ساختار دانه‌بندی همگن‌تر، پایداری حرارتی ساختار بالاتر، تنش‌های پسماند کمتر و میزان شکل‌پذیری بیشتر است. ولی خواص مکانیکی شامل استحکام و سختی در سطح کمی پایین‌تری نسبت به ایکپ سرد قرار دارد که می‌توان با اعمال گذرهای بیشتر این نقیصه را جبران کرد. لذا اعمال ایکپ گرم بر مواد سخت کارپذیر^۱ نظیر تیتانیوم

خالص کار شده می‌تواند به‌عنوان جایگزین تیتانیوم آلیاژی در مصارف پزشکی مطرح باشد [۷ و ۳۹ و ۴۰]. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون فشار برای مواد در شرایط ایکپ نشده و ایکپ شده در گذرهای ۱ الی ۴ در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین روند تغییر استحکام تسلیم، استحکام نهایی و تغییر طول نسبی طی آزمون فشار را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد.

جدول ۱: استحکام تسلیم، استحکام نهایی و تغییر طول نسبی تیتانیوم خالص BT1-0 به‌دست‌آمده از آزمون فشار، قبل و بعد از اعمال چهار گذر فرآیند ایکپ غلافی همراه با فشار پستی

BT1-0	σ_y (MPa)	σ_y/σ_{y-p0}	σ_u (MPa)	σ_u/σ_{u-p0}	δ (%)	δ/δ_{p0}
Pass 0	۲۶۷	۱	۸۹۹	۱	۵۱/۸	۱
Pass 1	۴۶۸	۱/۷۵	۱۰۷۳	۱/۱۹	۴۳/۶	۰/۸۴
Pass 2	۶۹۵	۲/۶۰	۱۱۷۶	۱/۳۱	۳۸/۷	۰/۷۵
Pass 3	۷۷۸	۲/۹۱	۱۲۹۶	۱/۴۴	۳۳/۸	۰/۶۵
Pass 4	۹۵۸	۳/۵۹	۱۳۷۵	۱/۵۳	۳۰/۷	۰/۵۹



شکل ۶: روند تغییر استحکام تسلیم، استحکام نهایی و تغییر طول نسبی تیتانیوم خالص BT1-0 طی آزمون فشار با اعمال چهار گذر فرآیند ایکپ غلافی همراه با فشار پستی

۳-۳- سختی

نمونه‌های سختی آماده‌شده، پیش و پس از اعمال گذرهای ۱ الی ۴ فرآیند ایکپ، تحت آزمون میکروسختی ویکرز قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش گذرها بر میانگین سختی ماده در سطح مقطع میانه‌ی بیلت افزوده‌شده و عددهای سختی از ۱۶۳ ویکرز (HV) برای حالت ایکپ نشده (آنیل شده اولیه) به ۲۲۳، ۲۵۲، ۲۷۸ و ۲۸۹ ویکرز به ترتیب برای گذرهای ۱ تا ۴ ارتقا می‌یابد. ۷۷٪ افزایش از حالت ایکپ نشده تا چهارگذر ایکپ مشهود است. شکل ۷ نمودار افزایش سختی تیتانیوم خالص BT1-0 را پیش و پس از اعمال گذرهای ایکپ نشان می‌دهد. این مهم در اثر ایکپ گرم، استفاده از غلاف و اعمال هم‌زمان

^۱ Hard workability

خالص و آلیاژی با ساختار شبکه کریستالی HCP با احتمال موفقیت بالاتری همراه است [۶۰-۶۲].

به این دلایل، به کارگیری هم‌زمان غلاف و فشار پستی طی فرآیند ایکپ گرم منجر به شکل‌دهی موفق و بدون نقص بیلت تیتانیمی تا چهار گذر و اعمال کرنش بالاتر این ماده و بالطبع فوق ریزدانه شدن دانه‌ها، بهبود میکروساختار و ارتقای خواص مکانیکی در عین نگهداشتن شکل‌پذیری شده است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش بر بررسی اثر هم‌زمان فشار پستی و به کارگیری غلاف در فرآیند ایکپ گرم تیتانیم خالص متمرکز شده است. هدف از مطالعه، ارزیابی خواص مکانیکی استاتیکی و تحولات میکروساختاری ماده هدف یعنی تیتانیم خالص بوده است. بیلتهایی از جنس تیتانیم خالص از نوع BT1-0 در غلافهایی از جنس مس خالص قرار داده شده و تحت ۴ گذر ایکپ گرم در دمای 250°C و زاویه کانال 135° طی مسیر Bc همراه با اعمال فشار پستی توسط عملیات اکستروژن بیلت ثانویه در کانال خروجی قرار گرفتند. با استفاده از آزمون‌های متالوگرافی، استحکام فشاری و سختی، نتایج کمی و کیفی زیر به دست آمده است:

- اعمال چهار گذر موفق ایکپ روی تیتانیم خالص و اعمال تقریبی مجموعاً حدود $1/84$ کرنش متوسط بر تیتانیم خالص سخت کارپذیر، بدون وجود عیوب و نقایص مشهود، نشان از بهبود کارپذیری ماده با اعمال هم‌زمان فشار پستی و به کارگیری غلاف دارد. این مهم عمدتاً به افزایش فشار هیدرواستاتیک و کاهش اثر تنش‌های گسیختگی نسبت داده می‌شود.
- تحلیل‌های میکروساختاری تصاویر نوری میکروساختار تیتانیم خالص، پیش و پس از اعمال چهار گذر ایکپ تحت شرایط مذکور نشان داد که دانه‌ها از حالت درشت‌دانه‌ی هم‌محور اولیه ($49\text{ }\mu\text{m}$) به حالت فوق ریزدانه کشیده ثانویه (710 nm) تبدیل شده‌اند. بر اساس رابطه Hall-Petch ارتقای خواص مکانیکی استاتیکی با کاهش محسوس اندازه دانه قابل پیش‌بینی است. این تحول میکروساختاری و بهبود خواص مکانیکی را می‌توان به اثر توأمان تنش‌های هیدرواستاتیک و تنش‌برشی بالا در افزایش چگالی مرزدانه‌های زاویه بالا، انباشت و قفل‌شدگی نابجایی‌ها، تشکیل باندهای برشی متقاطع،

دوقلوئی‌های مکانیکی، شکست و بازیابی دینامیکی دانه‌ها طی شکل‌دهی گرم و غیره نسبت داد.

ارزیابی منحنی‌های تنش-کرنش آزمون فشار روی نمونه‌های تیتانیمی آنیل شده اولیه و حاصل گذرهای ۱ تا ۴، نشان از ارتقای چشمگیر استحکام فشاری تسلیم و نهایی و کاهش نسبی تغییر طول نسبی فشاری دارد. نتایج کمی نشان داده است؛ استحکام تسلیم (MPa)، استحکام نهایی (MPa) و تغییر طول نسبی (%) با تغییر از ۲۶۷، ۸۹۹ و $51/8$ برای حالت ایکپ نشده (آنیل شده اولیه) به ۹۵۸، ۱۳۷۵ و $30/7$ برای حالت چهار گذر ایکپ شده به ترتیب به میزان ۳۵۹٪ افزایش، ۱۵۳٪ افزایش و ۵۹٪ کاهش داشته‌اند. لذا اثر به کارگیری هم‌زمان فشار پستی و غلاف بر بهبود خواص مکانیکی مشهود است.

- بررسی میکروسختی ویکرز سطح مقطع میانه‌ی بیلتهای تیتانیمی نشان داد که عدد میانگین سختی از 163 Hv برای حالت آنیل شده اولیه به 289 Hv بعد از اعمال چهار گذر ایکپ به میزان ۷۷٪ ارتقا یافته است. به دلیل ارتباط مستقیم سختی با استحکام استاتیکی، انتظار افزایش سختی طی فرآیند ایکپ وجود داشت و همان دلایل مکانیکی و ریزساختاری بر بهبود خواص مکانیکی بر این نتیجه هم مترتب است.

۵- منابع

- [1] M. Geetha, A. K. Singh, R. Asokamani, and A. K. Gogia, "Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—a review," *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 54, No. 3, pp. 397–425, May 2009. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.pmatsci.2008.06.004](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004).
- [2] H. J. Rack and J. I. Qazi, "Titanium alloys for biomedical applications," *Mater. Sci. Eng. C*, Vol. 26, No. 8, pp. 1269–1277, Sep. 2006. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.msec.2005.08.032](https://doi.org/10.1016/j.msec.2005.08.032).
- [3] P. S. Roodposhti, N. Farahbakhsh, A. Sarkar, and K. L. Murty, "Microstructural approach to equal channel angular processing of commercially pure titanium—A review," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 25, No. 5, pp. 1353–1366, May 2015. [Online]. Available: doi: [10.1016/S1003-6326\(15\)63734-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63734-7).
- [4] S. Nag, R. Banerjee, and H. L. Fraser, "Microstructural evolution and strengthening

of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing," *J. Strain Anal. Eng. Des.* Vol. 48, No. 8, pp. 512–521, Dec. 2013. [Online]. Available: doi:

[10.1177/0309324713495251](https://doi.org/10.1177/0309324713495251)

[13] R. B. Figueiredo, P. R. Cetlin, and T. G. Langdon, "The processing of difficult-to-work alloys by ECAP with an emphasis on magnesium alloys," *Acta Mater.* Vol. 55, No. 14, pp. 4769–4779, Sep. 2007. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.actamat.2007.04.019](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.04.019)

[14] S. L. Semiatin, D. P. DeLo, V. M. Segal, R. E. Goforth, and N. D. Frey, "Workability of commercial-purity titanium and 4340 steel during equal channel angular extrusion at cold-working temperatures," *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 30, No. 5, pp. 1425–1435, May 1999. [Online]. Available: doi: [10.1007/s11661-999-0155-7](https://doi.org/10.1007/s11661-999-0155-7)

[15] P. R. Cetlin, M. T. P. Aguilar, R. B. Figueiredo, and T. G. Langdon, "Avoiding cracks and inhomogeneities in billets processed by ECAP," *J. Mater. Sci.*, Vol. 45, No. 17, pp. 4561–4570, Sep. 2010. [Online]. Available: doi: [10.1007/s10853-010-4595-x](https://doi.org/10.1007/s10853-010-4595-x)

[16] R. Naseri, M. Kadkhodayan, and M. Shariati, "An experimental investigation of casing effect on mechanical properties of billet in ECAP process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1–14, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1007/s00170-016-8701-5](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8701-5)

[17] R. Naseri, H. Hiradfar, M. Shariati, and M. Kadkhodayan, "A comparison of axial fatigue strength of coarse and ultrafine grain commercially pure titanium produced by ECAP," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, Vol. 18, No. 3, pp. 755–767, Sep. 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.acme.2017.11.007](https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.11.007)

[18] R. Naseri, H. Hiradfar, M. Shariati, and M. Kadkhodayan, "Corrosion-fatigue resistance of ultrafine grain commercially pure titanium in simulated body fluid," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E: J. Process Mech. Eng.*, Vol. 237, No. 6, pp. 2181–2191, Jul. 2022. [Online]. Available: doi: [10.1177/09544089211045285](https://doi.org/10.1177/09544089211045285)

mechanisms in Ti–Nb–Zr–Ta, Ti–Mo–Zr–Fe and Ti–15Mo biocompatible alloys," *Mater. Sci. Eng. C*, Vol. 25, No. 3, pp. 357–362, May 2005. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.msec.2004.12.013](https://doi.org/10.1016/j.msec.2004.12.013)

[5] Y. J. Chen, Y. J. Li, J. C. Walmsley, S. Dumoulin, P. C. Skaret, and H. J. Roven, "Microstructure evolution of commercial pure titanium during equal channel angular pressing," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, No. 3, pp. 789–796, Jan. 2010. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.msea.2009.09.005](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.005)

[6] R. Z. Valiev and T. G. Langdon, "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement," *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 51, No. 7, pp. 881–981, Sep. 2006. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.pmatsci.2006.02.003](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003)

[7] R. Naseri, M. Kadkhodayan, and M. Shariati, "Static mechanical properties and ductility of biomedical ultrafine-grained commercially pure titanium produced by ECAP process," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 27, No. 9, pp. 1964–1975, Sep. 2017. [Online]. Available: doi: [10.1016/S1003-6326\(17\)60221-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60221-8)

[8] V. M. Segal, "Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 271, No. 1, pp. 322–333, 1999. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0921-5093\(99\)00248-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00248-8)

[9] V. M. Segal, "Materials processing by simple shear," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 197, No. 2, pp. 157–164, Jul. 1995. [Online]. Available: doi: [10.1016/0921-5093\(95\)09705-8](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09705-8)

[10] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, and I. V. Alexandrov, "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation," *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 45, No. 2, pp. 103–189, Jan. 2000. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9)

[11] M. R. Roshan, S. A. J. Jahromi, and R. Ebrahimi, "Predicting the critical pre-aging time in ECAP processing of age-hardenable aluminum alloys," *J. Alloys Compd.*, Vol. 509, No. 30, pp. 7833–7839, Aug. 2011. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.jallcom.2011.05.065](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.05.065)

[12] M. H. Shaeri, F. Djavanroodi, M. Sedighi, S. Ahmadi, M. T. Salehi, and S. H. Seyyedein, "Effect

- Mar. 2011. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.jmatprotec.2011.01.015](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.015)
- [28] F. Djavanroodi, M. Daneshtalab, and M. Ebrahimi, "A novel technique to increase strain distribution homogeneity for ECAPed materials," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 535, pp. 115–121, 2012. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2012.01.037](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.037)
- [29] P. W. J. Mckenzie and R. Lapovok, "ECAP with back pressure for optimum strength and ductility in aluminium alloy 6016. Part 1: Microstructure," *Acta Mater.*, Vol. 58, No. 9, pp. 3198–3211, May 2010. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.actamat.2010.02.028](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.028)
- [30] P. W. J. Mckenzie and R. Lapovok, "ECAP with back pressure for optimum strength and ductility in aluminium alloy 6016. Part 2: Mechanical properties and texture," *Acta Mater.*, Vol. 58, No. 9, pp. 3212–3222, May 2010. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.actamat.2010.02.029](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.029)
- [31] A. Panigrahi et al., "Effect of back pressure on material flow and texture in ECAP of aluminum," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 63, No. 1, p. 012153, 2014. [Online]. Available: doi:[10.1088/1757-899X/63/1/012153](https://doi.org/10.1088/1757-899X/63/1/012153)
- [32] B. Raddad, A. Frefer, M. Abdel-Rahman, and A. Tajouri, "Some aspects of workability of engineering materials," *TMS2013 Supplemental Proceedings*, pp. 593–600, 2013. [Online]. Available: doi:[10.7449/2013SP_593](https://doi.org/10.7449/2013SP_593)
- [33] K. Xia, J. T. Wang, X. Wu, G. Chen, and M. Gurvan, "Equal channel angular pressing of magnesium alloy AZ31," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 410, pp. 324–327, 2005. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2005.08.001](https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.001)
- [34] V. V. Stolyarov, R. Lapovok, I. G. Brodova, and P. F. Thomson, "Ultrafine-grained Al–5 wt.% Fe alloy processed by ECAP with backpressure," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 357, No. 1, pp. 159–167, 2003. [Online]. Available: doi:[10.1016/S0921-5093\(03\)00451-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00451-0)
- [35] G. I. Raab, E. P. Soshnikova, and R. Z. Valiev, "Influence of temperature and hydrostatic pressure during equal-channel angular pressing on the microstructure of commercial-purity Ti," *Mater.*
- [19] R. Naseri, "Experimental evaluation of back-pressure effect on workability and mechanical properties of commercially pure titanium in cold-ECAP process," *J. Solid Fluid Mech.*, Vol. 12, No. 6, pp. 67–81, 2023. (in Persian)
- [20] N. Krasil Nikov, "Strength and ductility of copper subjected to equal-channel angular pressing with backpressure," *Russ. Metall.*, Vol. 3, p. 220, 2005. [Online]. Available: doi: [10.1007/s11182-005-0127-3](https://doi.org/10.1007/s11182-005-0127-3)
- [21] W. J. Kim and J. Y. Wang, "Microstructure of the post-ECAP aging processed 6061 Al alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 464, No. 1, pp. 23–27, Mar. 2007. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.msea.2007.02.027](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.027)
- [22] R. Naseri, M. Kadkhodayan, and M. Shariati, "Theoretical analysis of equal channel angular pressing process by upper bound method and its experimental investigation in condition of circular cross-section channel," *Amirkabir J. Mech. Eng.*, Vol. 53, No. 8, pp. 4729–4744, 2021. doi: [10.22060/mej.2021.18754.6883](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18754.6883). (in Persian)
- [23] R. Y. Lapovok, "The role of back-pressure in equal channel angular extrusion," *J. Mater. Sci.*, Vol. 40, pp. 341–346, 2005. [Online]. Available: doi:[10.1007/s10853-005-3372-8](https://doi.org/10.1007/s10853-005-3372-8)
- [24] T. G. Langdon, "Processing of ultrafine-grained materials using severe plastic deformation: Potential for achieving exceptional properties," *Rev. Metal.*, Vol. 44, No. 6, pp. 556–564, 2008. [Online]. Available: doi:[10.3989/revmetalm.08.065](https://doi.org/10.3989/revmetalm.08.065)
- [25] R. Naseri, M. Kadkhodayan, and M. Shariati, "The investigation of springback of UFG commercially pure titanium in three-point bending test," *Modares Mech. Eng.*, Vol. 16, No. 11, pp. 266–276, 2017. (in Persian)
- [26] A. R. Eivani and A. K. Taheri, "A new method for producing bimetallic rods," *Mater. Lett.*, Vol. 61, No. 19, pp. 4110–4113, 2007. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.matlet.2007.02.057](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.02.057)
- [27] M. Zebardast and A. K. Taheri, "The cold welding of copper to aluminum using equal channel angular extrusion (ECAE) process," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 211, No. 6, pp. 1034–1043,

2015. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2015.02.023](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.023)
- [43] P. Rodriguez Calvillo and J. M. Cabrera, "Microstructure and mechanical properties of a commercially pure Ti processed by warm equal channel angular pressing," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 625, pp. 311–320, 2015. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2014.12.079](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.079)
- [44] C. S. Meredith and A. S. Khan, "The microstructural evolution and thermo-mechanical behavior of UFG Ti processed via equal channel angular pressing," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 219, pp. 257–270, 2015. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.jmatprotec.2014.11.015](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.015)
- [45] X. R. Yang et al., "Evolution of microstructure, macrotexture and mechanical properties of high strength biomedical TA4 pure titanium during multi-pass ECAP," *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 28, pp. 3976–3987, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.062>
- [46] W. J. Kim, C. Y. Hyun, and H. K. Kim, "Fatigue strength of ultrafine-grained pure Ti after severe plastic deformation," *Scr. Mater.*, Vol. 54, No. 10, pp. 1745–1750, 2006. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.scriptamat.2006.02.005](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.02.005)
- [47] M. Ebrahimi, K. H. Tabei, R. Naseri, and F. Djavanroodi, "Effect of flow-forming parameters on surface quality, geometrical precision and mechanical properties of titanium tube," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E*, Vol. 232, No. 6, pp. 702–708, 2018. [Online]. Available: doi:[10.1177/0954408917702227](https://doi.org/10.1177/0954408917702227)
- [48] R. Naseri, M. Shariati, and M. Kadkhodayan, "Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing," *Modares Mech. Eng.*, Vol. 15, No. 6, pp. 157–166, 2015. (in Persian)
- [49] K. Hajizadeh, B. Eghbali, K. Topolski, and K. J. Kurzydowski, "Ultra-fine grained bulk CP-Ti processed by multi-pass ECAP at warm deformation region," *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 143, No. 3, pp. 1032–1038, 2014. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.matchemphys.2013.12.047](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.12.047)
- Sci. Eng. A*, Vol. 387, pp. 674–677, 2004. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2004.08.042](https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.08.042)
- [36] A. Czerwinski, R. Lapovok, D. Tomus, Y. Estrin, and A. Vinogradov, "The influence of temporary hydrogenation on ECAP formability and low cycle fatigue life of CP titanium," *J. Alloys Compd.*, Vol. 509, No. 6, pp. 2709–2715, Mar. 2011. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.jallcom.2010.11.125](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.11.125)
- [37] Y. Estrin, H. E. Kim, R. Lapovok, H. P. Ng, and J. H. Jo, "Mechanical strength and biocompatibility of ultrafine-grained commercial purity titanium," *BioMed Res. Int.*, Vol. 2013, pp. 1–6, 2013. [Online]. Available: doi:[10.1155/2013/980572](https://doi.org/10.1155/2013/980572)
- [38] A. Jäger, V. Gärtnerova, and K. Tesař, "Microstructure and anisotropy of the mechanical properties in commercially pure titanium after equal channel angular pressing with back pressure at room temperature," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 644, pp. 114–120, 2015. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2015.06.009](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.009)
- [39] R. Naseri, H. Heirani, M. H. Mozaffari, and R. Babaei Spouei, "A comparison of corrosion behavior of coarse and ultrafine grain commercially pure titanium in simulated body fluid," *Iran. J. Mech. Eng. Trans. ISME*, Vol. 26, No. 1, 2025. (in Persian)
- [40] X. Zhao, X. Yang, X. Liu, C. T. Wang, Y. Huang, and T. G. Langdon, "Processing of commercial purity titanium by ECAP using a 90 degrees die at room temperature," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 607, pp. 482–489, 2014. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2014.03.030](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.030)
- [41] A. Medvedev, H. P. Ng, R. Lapovok, Y. Estrin, T. C. Lowe, and V. N. Anumalasetty, "Comparison of laboratory-scale and industrial-scale equal channel angular pressing of commercial purity titanium," *Mater. Lett.*, Vol. 145, pp. 308–311, 2015. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.matlet.2015.01.007](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.007)
- [42] S. Zhang et al., "Effect of temperature on microstructural stabilization and mechanical properties in the dynamic testing of nanocrystalline pure Ti," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 634, pp. 64–70,

- multiple passes of ECAP at room temperature," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, No. 23, pp. 6335–6339, 2010. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2010.07.011](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.011)
- [57] M. Ebrahimi, M. H. Shaeri, R. Naseri, and C. Gode, "Equal channel angular extrusion for tube configuration of Al-Zn-Mg-Cu alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 731, pp. 569–576, 2018. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2018.07.025](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.025)
- [58] X. Y. Liu, X. C. Zhao, X. R. Yang, C. Xie, and G. J. Wang, "Compression deformation behaviours of ultrafine and coarse grained commercially pure titanium," *Mater. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 4, pp. 474–479, 2013. [Online]. Available: doi:[10.1179/1743284712Y.0000000272](https://doi.org/10.1179/1743284712Y.0000000272)
- [59] F. Fakheri, S. Pour-Ali, R. Tavangar, and R. Naseri, "Effect of ultrasonic assisted-ECAP processing on the microstructure, mechanical properties, and fluoride-induced corrosion performance of pure titanium," *Mater. Today Commun.*, Vol. 40, p. 109863, 2024. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.mtcomm.2023.109863](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.109863)
- [60] K. R. Gopi, H. Shivananda Nayaka, and S. Sahu, "Microstructural evolution and strengthening of AM90 magnesium alloy processed by ECAP," *Arab. J. Sci. Eng.*, Vol. 42, pp. 4635–4647, 2017. [Online]. Available: doi:[10.1007/s13369-017-2508-0](https://doi.org/10.1007/s13369-017-2508-0)
- [61] R. Jahadi, M. Sedighi, and H. Jahed, "ECAP effect on the micro-structure and mechanical properties of AM30 magnesium alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 593, pp. 178–184, 2014. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2013.12.033](https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.033)
- [62] V. V. Stolyarov, Y. T. Zhu, I. V. Alexandrov, T. C. Lowe, and R. Z. Valiev, "Grain refinement and properties of pure Ti processed by warm ECAP and cold rolling," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 343, No. 1, pp. 43–50, 2003. [Online]. Available: doi:[10.1016/S0921-5093\(02\)00387-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00387-9)
- [50] C. T. Wang, A. G. Fox, and T. G. Langdon, "Microstructural evolution in ultrafine-grained titanium processed by high-pressure torsion under different pressures," *J. Mater. Sci.*, Vol. 49, No. 19, pp. 6558–6564, 2014. [Online]. Available: doi:[10.1007/s10853-014-8412-0](https://doi.org/10.1007/s10853-014-8412-0)
- [51] S. N. Alhajeri, N. Gao, and T. G. Langdon, "Hardness homogeneity on longitudinal and transverse sections of an aluminum alloy processed by ECAP," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 528, No. 10, pp. 3833–3840, 2011. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2010.11.056](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.056)
- [52] A. V. Polyakov, L. Dluhoš, G. S. Dyakonov, G. I. Raab, and R. Z. Valiev, "Recent advances in processing and application of nanostructured titanium for dental implants," *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 17, No. 12, pp. 1869–1875, 2015. [Online]. Available: doi:[10.1002/adem.201500139](https://doi.org/10.1002/adem.201500139)
- [53] C. N. Elias, D. J. Fernandes, C. R. S. Resende, and J. Roestel, "Mechanical properties, surface morphology and stability of a modified commercially pure high strength titanium alloy for dental implants," *Dent. Mater.*, Vol. 31, No. 2, pp. e1–e13, 2015. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.dental.2014.11.001](https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.11.001)
- [54] R. B. Figueiredo et al., "Improving the fatigue behavior of dental implants through processing commercial purity titanium by equal-channel angular pressing," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 619, pp. 312–318, 2014. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.msea.2014.07.084](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.07.084)
- [55] L. Wang et al., "Microstructure and texture evolution in ultrafine-grained pure Ti processed by equal-channel angular pressing with subsequent dynamic compression," *Scr. Mater.*, Vol. 77, pp. 33–36, 2014. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.scriptamat.2014.02.012](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.02.012)
- [56] X. Zhao, X. Yang, X. Liu, X. Wang, and T. G. Langdon, "The processing of pure titanium through



Data-driven and unsupervised damage detection in frame structures using deep neural networks

Omid Allahyari Pargu¹ , Gholamreza Nasirpour² , Akbar Asgharzadeh-Bonab^{*2} ,
Amirhossein Babapour³

1. M.Sc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

1. Assistant professor, Department of Science and Technology Studies, AJA Command and Staff University, Tehran, Iran

1. M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

Damage detection, aimed at preventing overall structural failure and enabling planned repair and rehabilitation, has been a significant research focus in recent years. Data-driven structural health monitoring through structural response analysis constitutes the core of contemporary studies. This approach utilises artificial intelligence tools, particularly artificial neural networks, to eliminate the need for complex preprocessing of time-series data and achieve more accurate results compared to traditional structural health monitoring and damage detection methods. In this study, an unsupervised deep neural network (convolutional autoencoder) is proposed to reconstruct input data and employ the reconstruction error as a damage-sensitive feature. The findings demonstrate that the proposed model achieves highly accurate damage detection across various structural conditions, despite being trained solely on healthy structural data. Moreover, the model exhibits favourable performance in terms of the number of training parameters and computational effort. Finally, to validate the effectiveness of the model, the results are compared with those of similar studies, demonstrating superior accuracy.

Keywords

Structural Damage Detection
Structural Health Monitoring
Anomaly Detection
Deep Neural Networks
Unsupervised Learning

Received: 05.07.2025

Revised: ---.---.---

Accepted: 31.08.2025

*Corresponding Author

Akbar Asgharzadeh-Bonab

Email

a.asgharzadeh@urmia.ac.ir

1- Introduction

Structural health monitoring (SHM) and damage detection aim to provide a system that, in the event of damage, issues an alert to prevent overall structural failure and enables timely repair and rehabilitation of affected areas. This process is carried out through vibration-based methods, where sensor data are collected and analyzed. Over the past decades, both data-driven and model-based vibration methods have been dominant approaches in SHM research. Data-driven methods offer

advantages such as reduced cost, ease of implementation, and real-time inspection capability [1-2]. Unlike model-based approaches, Data-driven methods rely on statistical models, accelerate decision-making and yield more robust results in noisy environments, without requiring prior information or assumptions about the structure [3-4]. In data-driven SHM, the type of data used is crucial. Most recent studies adopt supervised approaches that require access to both healthy and

How to Cite this Article:

[1] O. Allahyari Pargu, G. Nasirpour, A. Asgharzadeh-Bonab, and A. Babapour, "Data-driven and unsupervised damage detection in frame structures using deep neural networks," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 65–81, 2026. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.532643.1142>. (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

damaged data for pattern recognition or classification. However, collecting and labeling damage data is often costly, time-consuming, and sometimes infeasible. Therefore, developing methods that match the nature of available structural data is essential for continuous monitoring and reliable damage detection.

The main contribution of this paper is an unsupervised, data-driven damage detection method with a novel framework and architecture for frame-like structures, relying solely on healthy data. The proposed approach employs acceleration response measurements from the undamaged structure. Statistical indicators from a hybrid model are used as damage-sensitive features. As a result, reliable structural state identification is achieved even under varying operational conditions. The proposed method is validated using the Los Alamos three-story test structure [5].

2- Research Methods

This study introduces an unsupervised, data-driven damage detection method for frame-like structures that relies solely on healthy-state information. The approach is based on anomaly detection concepts. In this framework, the normal behavior of structural data is collected and labeled over a specified time period to form a reference baseline. The trained model then evaluates incoming data and determines whether they conform to the baseline (normal) or deviate from it (anomalous). During the anomaly-based detection process, structural responses in their current healthy condition are continuously collected to establish the baseline state. Once the model is trained, future test data (capturing structural features at later times) are compared against this baseline, and any deviation indicates the occurrence of damage. Machine learning models and artificial neural networks are employed due to their strong learning capacity, computational efficiency, ability to process large datasets, and capability to capture complex patterns [6].

3- Results

The developed Deep Neural Network model (Convolutional Autoencoder (CAE)) in this study demonstrates several notable advantages that justify its effectiveness in learning and reconstructing data. The CAE effectively reduces the dimensionality of the input data (the latent layer dimension is one-eighth of the original input), while preserving spatial hierarchies. The symmetric CAE structure (with convolution and deconvolution layers) identifies key features during the encoding stage and effectively reconstructs them during decoding. Results demonstrate the strong performance of the model in distinguishing between healthy and damaged structural states, even under varying operational conditions and nonlinear relationships between states.

4- Conclusion

In this study, an unsupervised, data-driven method for damage detection in frame-like structures was developed. The reconstruction error of a Convolutional Autoencoder (CAE) proved to be a reliable and powerful indicator for structural damage identification. Damage detection was carried out directly using vibration responses under environmental excitation on the LANL benchmark structure, without resorting to complex preprocessing such as signal processing techniques or dimensionality reduction algorithms. The proposed CAE model was trained exclusively on healthy-state data and successfully identified different structural states, with results evaluated through various figures and tables.

The effectiveness of the CAE in accurately recognizing structural conditions is evident, even in the presence of complex dependencies and interactions between different states. Designed with multiple layers, effective dimensionality reduction, and a symmetric architecture, the CAE achieved a strong balance between feature learning and data reconstruction. Experimental findings show that the model achieved a reconstruction error of 0.226% (corresponding to an accuracy of 99.774%) in detecting damage scenarios. In addition, the model

demonstrated efficiency in terms of trainable parameters (231,940 parameters) and computational effort (requiring only 4.5 minutes of training on the benchmark dataset).

5- References

- [1] M. Azimi, A. Dadras Eslamlou, and G. Pekcan, "Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: A state-of-the-art review," *Sensors*, Vol. 20, No. 10, p. 2778, 2020. doi: [10.3390/s20102778](https://doi.org/10.3390/s20102778)
- [2] Z. Yuan, S. Zhu, C. Chang, X. Yuan, Q. Zhang, and W. Zhai, "An unsupervised method based on convolutional variational auto-encoder and anomaly detection algorithms for light rail squat localization," *Construction and Building Materials*, Vol. 313, p. 125563, 2021. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.125563](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125563)
- [3] K. Eltouny and X. Liang, "Large-scale structural health monitoring using composite recurrent neural networks and grid environments," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 38, No. 3, pp. 271–287, 2023. doi: [10.1111/mice.12841](https://doi.org/10.1111/mice.12841)
- [4] M. Z. Sarwar and D. Cantero, "Probabilistic autoencoder-based bridge damage assessment using train-induced responses," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 208, p. 111046, 2024. doi: [10.1016/j.ymssp.2024.111046](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111046).
- [5] E. Figueiredo, G. Park, J. Figueiras, C. Farrar, and K. Worden, "Structural health monitoring algorithm comparisons using standard data sets," Los Alamos National Lab, 2009. doi: [10.2172/947958](https://doi.org/10.2172/947958)
- [6] C. Farrar, S. Doebling, and D. Nix, "Vibration-based structural damage identification," *Philos. Trans. R. Soc. A*, Vol. 359, No. 1778, pp. 131–149, 2001. doi: [10.1098/rsta.2000.0735](https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0735)



تشخیص داده‌محور و بدون نظارت آسیب در سازه‌های قابی شکل، با به‌کارگیری مدل‌های شبکه عصبی عمیق

امید اللهیاری پرگو^۱، غلامرضا نصیرپور^۲، اکبر اصغرزاده بناب^{۳*}، امیر حسین باباپور^۳

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

کلمات کلیدی

تشخیص آسیب سازه‌ای
پایش سلامت سازه
تشخیص ناهنجاری
شبکه عصبی عمیق
یادگیری بدون نظارت

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴

بازنگری مقاله: ---/---/---

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹

*نویسنده مسئول

اکبر اصغرزاده بناب

ایمیل

a.asgharzadeh@urmia.ac.ir

چکیده

تشخیص آسیب، باهدف جلوگیری از خرابی کلی سازه، ترمیم و بازسازی برنامه‌ریزی شده، حوزه تحقیقات مهم سال‌های اخیر بوده‌است. پایش سلامت سازه با رویکرد داده‌محور بوسیله تحلیل پاسخ سازه موضوع اصلی پژوهش‌های سال‌های اخیر است. در این رویکرد با به‌کارگیری ابزار هوش مصنوعی خصوصاً شبکه‌های عصبی مصنوعی، نیاز به پیش‌پردازش پیچیده داده‌های سری زمانی را برطرف شده و نتایج دقیق‌تری نسبت به رویکردهای گذشته پایش سلامت سازه و تشخیص آسیب حاصل شده‌ست. در این پژوهش، یک شبکه عصبی عمیق بدون نظارت، (خودرمزگذار پیچشی) باهدف بازسازی داده ورودی و استفاده از خطای بازسازی آن به‌عنوان شاخص حساس به آسیب ارائه شده‌است. یافته‌ها نشان داده است مدل مورد نظر، با دقت ۹۹/۷۷۴٪، نتایج دقیقی در تشخیص آسیب وضعیت مختلف سازه با وجود آموزش صرفاً بر اساس داده‌های سالم سازه به همراه داشته؛ همچنین مدل مورد نظر از نظر تعداد پارامترهای آموزش و تلاش محاسباتی عملکرد مطلوبی ارائه داده‌است. در انتها جهت اثبات کارایی مدل، نتایج با پژوهش‌های مشابه مقایسه گردیده که حاکی از نتایجی دقیق‌تر از آن‌ها است.

۱- مقدمه

نویز نتایج مؤثرتری ارائه می‌دهند. همچنین، این روش‌ها نیاز به اطلاعات پیشین و مفروضات اولیه در مورد سیستم سازه ندارند [۵]. روش‌های داده‌محور SHM به دلیل ماهیت غیرمخرب و عدم وابستگی به اطلاعات قبلی درباره محل، نوع یا گستره آسیب، بسیار جذاب هستند [۶].

با فرض پایش و تشخیص آسیب داده محور، نوع داده بکارگرفته‌شده مهم است. تشخیص داده‌محور بر اساس دسترسی به اطلاعات سالم و آسیب‌دیده سازه (تشخیص الگو، دسته‌بندی) رویکرد غالب پژوهش‌های اخیر بوده است [۷]. در این رویکرد الگوریتم‌ها و مدل‌ها، به هر دو گروه داده مرتبط با وضعیت سالم و آسیب‌دیده سازه

پایش سلامت سازه و تشخیص آسیب، فراهم‌سازی سامانه‌ای است که در صورت بروز آسیب و خسارت، با هشدار، از خرابی کلی سازه جلوگیری کند و زمینه را برای ترمیم و بازسازی نقاط آسیب‌دیده فراهم سازد. این کار به‌وسیله جمع‌آوری و تحلیل پاسخ سازه توسط حسگرها انجام می‌شود که روش‌های ارتعاشی نامیده می‌شوند. روش‌های ارتعاشی مبتنی بر داده [۱] و مدل در چند دهه اخیر رویکردهای غالب پژوهش‌های حوزه SHM بوده‌اند. ازجمله مزایای این روش‌ها کاهش هزینه، سهولت اجرا و امکان بازرسی بلادرنگ است [۲ و ۳]. برخلاف روش‌های مدل‌محور، روش‌های داده‌محور مبتنی بر مدل‌های آماری هستند [۴]؛ فرآیند تصمیم‌گیری را سریع‌تر نموده و در محیط‌های پر

How to Cite this Article:

[1] O. Allahyari Pargu, G. Nasirpour, A. Asgharzadeh-Bonab, and A. Babapour, "Data-driven and unsupervised damage detection in frame structures using deep neural networks," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 65–81, 2026. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.532643.1142>. (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیک: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

این رویکرد تنها از داده‌های پاسخ شتاب اندازه‌گیری شده از سازه در وضعیت سالم استفاده می‌کند.

شاخصه‌های آماری خطای بازسازی یک مدل ترکیبی، متشکل از شبکه عصبی خودرمزگذار و شبکه عصبی پیچشی، به‌عنوان شاخص حساس به آسیب، در نظر گرفته شده است. علاوه بر هدف اصلی مبنی بر تشخیص بدون نظارت آسیب، در این مقاله مدلی از شبکه‌های عصبی عمیق ارائه شده است؛ که بدون نیاز به پیش‌پردازش زمان‌بر (ازجمله الگوریتم‌های پردازش سیگنال یا الگوریتم‌های کاهش داده)، ویژگی‌های حساس به آسیب صرفاً از داده‌های خام حسگرها استخراج شده‌است. سپس تشخیص وضعیت سازه با دقتی قابل‌توجه حتی باوجود شرایط متغیر بهره‌برداری صورت پذیرفته است. سازه مبنا سه طبقه آزمایشگاه لس‌آلاموس جهت ارزیابی مدل بکار گرفته شده است. در ادامه در بخش دوم، مشخصات سازه مبنا مورد بررسی، توضیح داده شده‌است. در بخش سوم، چارچوب رویکرد پیشنهادی و معماری مدل پیشنهادی با جزئیات شرح داده شده است. نتایج پژوهش در بخش چهارم و در نهایت در بخش پنجم به جمع‌بندی پرداخته شده است.

۲- مدل اعتبارسنجی (سازه آزمایشگاه لس‌آلاموس)

سازه مبنا آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس یک قاب سه طبقه آلومینیومی است [۱۳]. این قاب آن‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، با اتصالات پیچ و مهره‌ای ساخته شده و هر طبقه، شامل چهار ستون به ارتفاع ۱۷۷ میلی‌متر، طول و عرض ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر به صفحات آلومینیومی مربع شکل با ضلع ۳۰۵ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر متصل است. سازه سه طبقه موردنظر تنها امکان در راستای x را دارد. یک موتور الکترومغناطیسی تحریک را به پایه سازه اعمال می‌کند. چهار شتاب‌سنج در هر طبقه جهت جمع‌آوری پاسخ آن نصب شده‌اند.

برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی در سازه، ستونی کوتاه از سقف آخرین طبقه در تماس با یک ضربه‌گیر نصب‌شده بر روی طبقه پایین آن، طراحی شده‌است. فاصله ستون و ضربه‌گیر قابل تنظیم است. این مکانیسم جهت شبیه‌سازی ترک‌های خستگی، آسیب در اتصالات سازه و شل شدن پیچ‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با کاهش فاصله ستون و ضربه‌گیر اندرکنش آن‌ها با یکدیگر بیشتر شده و شاهد تأثیر

نیاز دارند. درحالی‌که جمع‌آوری و برچسب‌گذاری داده‌های آموزشی خصوصاً در وضعیت آسیب‌دیده، زمان‌بر، پرهزینه و گاهی غیرعملی است. نتیجتاً پژوهش و توسعه روش‌هایی متناسب با ماهیت اطلاعات موجود سازه‌ها، در زمینه پایش مداوم و تشخیص آسیب^۱ ضروری به‌نظر می‌رسد. ترکیب روش‌های داده‌محور و شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ این مهم را برآورده می‌سازد. این مدل‌ها با تحلیل داده‌ی حسگرها حاصل از ارتعاشات سازه، رفتار غیرخطی سازه می‌آموزند، سپس با استفاده از دانش فراگرفته‌شده، وضعیت داده‌های ورودی جدید را تعیین می‌کنند. قازی‌مقدم و حسین‌زاده یک خودرمزگذار ترکیبی همراه با مکانیزم توجه، برای شناسایی آسیب‌های سازه‌ای توسعه داده و ارزیابی کردند. آن‌ها از نسبت انحراف معیار به قله به‌عنوان ویژگی حساس به آسیب برای کمی‌سازی تفاوت بین وضعیت‌های سالم و ناشناخته بر اساس برآورد آستانه و کشف مکان آسیب استفاده کردند [۸]. در پژوهش دیگری یک خودرمزگذار متغیر برای تقریب توزیع داده‌ها بر اساس آموزش روی داده‌های خام بدون آسیب پیشنهاد شد. سپس، یک ماشین بردار پشتیبانی یک کلاسه برای تشخیص شرایط مختلف بر اساس خطای بازسازی به‌کار برده شد [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، پژوهشگران از یک خودرمزگذار متغیر چندهدفه به‌عنوان روشی برای ترکیب داده‌ها برای استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده و تشخیص آسیب استفاده کردند. علاوه بر این، آن‌ها از توابع فاصله بین امتیازات ناهنجاری هر گره حسگری برای مکان‌یابی و پیش‌بینی شدت آسیب سازه‌ای استفاده کردند [۱۰].

مطالعات نشان داده است، تشخیص آسیب مبتنی بر DNNs، تشخیص آسیب را دقیق، سریع و ایمن کرده است [۵]. همچنین می‌تواند مشکلات داده‌های حجیم^۳ SHM را مدیریت کند [۱۱] و با فناوری‌های جدیدی مانند اینترنت اشیا^۴، شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۵ و محاسبات ابری^۶ [۱۲] سازگار است. امکان پردازش مستقیم داده‌ها فراهم است. می‌تواند ارتباط غیرخطی و گاه همراه با هم‌پوشانی میان وضعیت سالم و وضعیت آسیب‌دیده سازه کشف کند. روش موردنظر توانایی در نظر گرفتن تغییرات بهره‌برداری را داشته و نسبت به آن مقاوم است. ازاین‌رو نوآوری اصلی این مقاله، یک روش تشخیص داده‌محور و بدون نظارت آسیب، با چارچوب و معماری نوین؛ در سازه‌های قابی شکل، صرفاً بر اساس دسترسی به اطلاعات سالم است.

^۴ Internet of Things (IOT)

^۵ Wireless Sensor Networks (WSNs)

^۶ Cloud Computing

^۱ Damage Detection

^۲ Deep Neural Networks

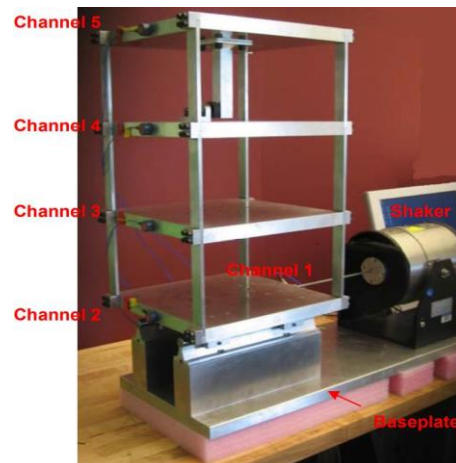
^۳ Big Data

برای وضعیت‌های ۳ تا ۷، فاصله ضربه‌گیر و ستون به ترتیب مطابق با جدول ۱ تغییر داده شده‌است. در وضعیت‌های ۹ تا ۱۱ سناریوهای آسیب به همراه تغییرات شرایط بهره‌برداری با افزودن جرم در طبقات پایه و اول در نظر گرفته شده‌است. داده‌برداری برای هر یک از سناریوهای معرفی شده طی ده تکرار و در هر یک از دفعات اندازه‌گیری، با فرکانس ۳۲۰ هرتز و به تعداد ۸۱۹۲ نمونه اندازه‌گیری شده است [۱۳].

۳- رویکرد پیشنهادی

رویکرد پیش‌روی این مقاله، یک روش تشخیص داده‌محور و بدون نظارت آسیب، در سازه‌های قابی شکل؛ صرفاً بر اساس دسترسی به اطلاعات سالم است. این رویکرد مبتنی بر مفاهیم تشخیص ناهنجاری است. در این راستا، رفتار داده هنجار طی دوره زمانی مشخص جمع‌آوری و برچسب‌گذاری می‌شود. با استفاده از آن، مدل آموزش داده‌شده و نهایتاً مدل موردنظر با دریافت داده‌ی جدید، وضعیت آن را بررسی نموده و هنجار یا ناهنجار بودن آن، اعلام خواهد شد [۱۴] و [۱۵]. طی پروسه تشخیص آسیب مبتنی بر تشخیص ناهنجاری، اطلاعات از وضعیت سالم سازه (در حقیقت همان شرایط کنونی و فعلی است) در زمان‌های مختلف جمع‌آوری شده و وضعیت مبنا شکل می‌گیرد. پس از آموزش مدل با وضعیت مبنا، داده‌های آزمون (ویژگی‌هایی از سازه در زمان آتی) با وضعیت مبنا مقایسه و ارزیابی شده و نسبت به وضعیت آن‌ها گزارش می‌شود. در نتیجه، هرگونه انحراف، نشان‌دهنده‌ی وقوع آسیب در سازه است. قدم اول در ایجاد یک سامانه تشخیص آسیب، ایجاد یک شبکه از حسگرها به‌منظور جمع‌آوری پیوسته اطلاعات از نقاط حساس سازه است. حجم عظیمی از داده‌های استخراج‌شده از حسگرها، در راستای تعیین وضعیت سازه و اقدامات پس‌از آن، تحلیل و بررسی می‌گردند. مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی‌شان در یادگیری قوی و کارایی محاسباتی، همچنین پردازش حجم زیادی از داده‌ها و یادگیری الگوهای پیچیده، بکار گرفته شده‌اند [۱۶]. شکل ۲ چارچوب کلی رویکرد پیشنهادی نمایش داده است. در ادامه به توضیح مبانی مدل‌های بکار گرفته‌شده پرداخته شده و در انتها مدل پیشنهادی با ذکر جزئیات در فلسفه طراحی، پارامترهای طراحی و نحوه آموزش و عملکرد تبیین گشته است.

بیشتر رفتار غیرخطی در سازه خواهیم بود. شرایط مختلف داده‌برداری به‌صورت کلی در چهار گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول، شرایط پایه است. گروه دوم شامل شرایط پایه‌ای است که در آن سازه تغییراتی در سختی به دلیل تغییرات بهره‌برداری داشته است. گروه سوم تداعی‌کننده شرایط آسیب غیرخطی که توسط یک ضربه‌گیر ایجاد شده است. گروه چهارم شامل شرایط ترکیب آسیب‌های غیرخطی و تغییرات بهره‌برداری است.

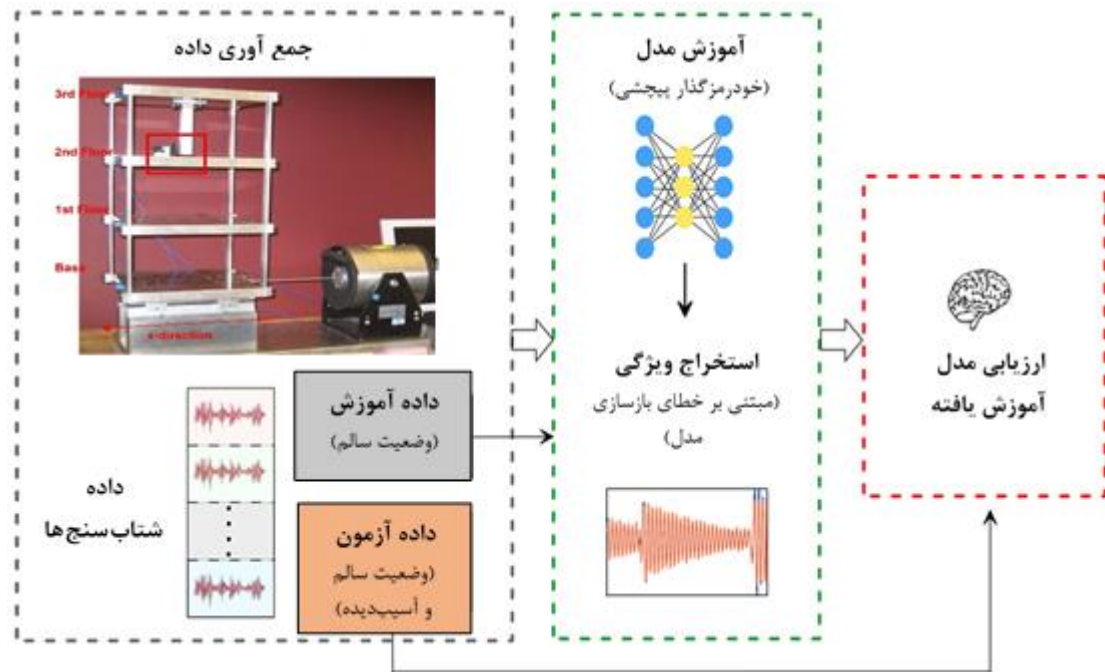


شکل ۱: سازه مبنا آزمایشگاه لس‌آلاموس [۱۳]

جدول ۱: سناریوهای داده‌برداری سازه لس‌آلاموس [۱۳]

وضعیت	برچسب وضعیت (سناریو)
وضعیت ۱	جرم ۱/۲ کیلوگرم طبقه اول
وضعیت ۲	جرم ۱/۲ کیلوگرم طبقه همکف
وضعیت ۳	شکاف ۰/۱۳ میلی‌متری
وضعیت ۴	شکاف ۰/۱۰ میلی‌متری
وضعیت ۵	شکاف ۰/۰۵ میلی‌متری
وضعیت ۶	شکاف ۰/۱۵ میلی‌متری
وضعیت ۷	شکاف ۰/۲۰ میلی‌متری
وضعیت ۸	وضعیت مبنا
وضعیت ۹	جرم ۱/۲ کیلوگرم طبقه اول، شکاف ۰/۲ میلی‌متری
وضعیت ۱۰	جرم ۱/۲ کیلوگرم طبقه اول، شکاف ۰/۱ میلی‌متری
وضعیت ۱۱	جرم ۱/۲ کیلوگرم طبقه همکف، شکاف ۰/۲ میلی‌متری

وضعیت‌های مختلف داده‌برداری از پاسخ شتاب سازه (سناریوها) در جدول ۱ نشان داده شده است. وضعیت پایه، وضعیت ۸ است. وضعیت‌های ۱ و ۲ وضعیت سالم سازه به همراه شبیه‌سازی از شرایط بهره‌برداری بیان شده‌است. در راستای شبیه‌سازی سناریوهای آسیب،



شکل ۲: چارچوب کلی رویکرد پژوهش حاضر

۳-۱- شبکه عصبی پیچشی (درهم تنیده)

شبکه‌های عصبی پیچشی نوعی شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور^۱ با عملکرد نظارت‌شده‌اند. کاربرد اصلی این شبکه‌ها برای وظایف مبتنی بر ورودی از نوع تصویر است؛ اما با ایجاد تغییراتی، بر روی سایر انواع داده‌ها از جمله سری‌های زمانی کاربرد می‌یابند. در مقایسه با شبکه‌های عصبی متعارف^۲، در این شبکه‌ها پارامترهای موردنیاز برای آموزش مدل، کاهش می‌یابد و در مواجهه با پیچیدگی‌های محاسباتی، عملکرد بسیار مناسب‌تری دارند [۱۷]. هدف اصلی در طراحی شبکه‌های پیچشی (درهم‌تنیده)، تشخیص وابستگی‌های محلی در داده‌های ورودی است. بدین معنی که شبکه‌های پیچشی اثر همسایگی و ارتباط داده‌ها با یکدیگر را می‌یابند. این مزیت این امکان را به این شبکه‌ها می‌دهد؛ که الگوهای پیچیده‌تر را به یک روش سلسله‌مراتبی با ترکیب ویژگی‌های سطح پایین و ویژگی‌های سطح بالا، شناسایی کند [۱۸].

شبکه‌های عصبی پیچشی دو نوع هستند: شبکه‌های یک‌بعدی و شبکه‌های دوبعدی. در شبکه‌های عصبی پیچشی یک‌بعدی، داده‌های ورودی یک‌بعدی هستند و نیاز به پیش‌پردازش ندارند. به دلیل

پیکربندی ساده و فشرده نسبت به نوع دوبعدی، پیاده‌سازی سخت‌افزاری آن‌ها در زمانی کوتاه و با هزینه کم امکان‌پذیر است. این شبکه‌ها به‌ویژه در مواجهه با داده‌های آموزشی کم، عملکرد قابل قبولی دارند. همچنین به دلیل ساده‌تر بودن ساختار شبکه‌های پیچشی یک‌بعدی، امکان آموزش با تعداد کمتر داده فراهم است و زمان کمتری جهت آموزش نیاز است [۱۹]. در شکل ۳ ساختار شبکه‌های عصبی پیچشی نشان داده شده است. این شبکه‌ها از لایه‌های ورودی، لایه پیچشی (شامل ناحیه دریافت، فیلتر^۳ (هسته)، طول گام^۴، تابع فعال‌ساز^۵، لایه سازی^۶ (پدینگ))، لایه انتخاب^۷ (رای‌گیری یا تجمیع کننده) و لایه تماماً متصل^۸ لایه تماماً متصل از نورون‌های شبکه‌های عصبی متعارف (شبکه پرسپترون چندلایه) تشکیل شده است [۱۷].

۳-۲- شبکه عصبی خودرمزگذار

خودرمزگذار^۹ نوعی شبکه عصبی مصنوعی، برای یادگیری ویژگی‌های اصلی داده‌های ورودی، به‌صورت بدون نظارت است. فرآیند خودرمزگذاری از دو بخش تشکیل شده است: بخش رمزگذار و بخش رمزگشا. این شبکه به‌صورت متعارف شامل یک لایه ورودی، چندین لایه پنهان و یک لایه خروجی است. لایه پنهان رمزگذار ویژگی‌هایی

^۶ Padding

^۷ Pooling Layer

^۸ Fully-Connected Layer

^۹ Autoencoder

^۱ Feed Forward Neural Network

^۲ Multilayer Perceptron (MLP)

^۳ Kernel

^۴ Stride

^۵ Activation Function

۳-۳- مدل پیشنهادی (مدل ترکیبی خودرمزگذار پیچشی)

▪ فلسفه طراحی

کاهش ابعاد، فشردگی و استخراج ویژگی‌های اصلی و کلیدی از داده‌های ورودی، بدون اطلاع از ماهیت و برجسته آن‌ها، هدف اصلی به‌کارگیری شبکه‌های خودرمزگذار است. از طرفی طراحی خودرمزگذار در حالت کوچک‌تر شدن ابعاد ورودی موجب ارائه داده‌های کم‌حجم و فشرده خواهد شد. پردازش داده‌های کم‌حجم و فشرده آسان‌تر است؛ با سرعت بیشتری انجام می‌شود و بار محاسباتی کمتری دارد. از این‌رو تصمیم‌گیری بر اساس این داده‌ها ساده‌تر خواهد بود.

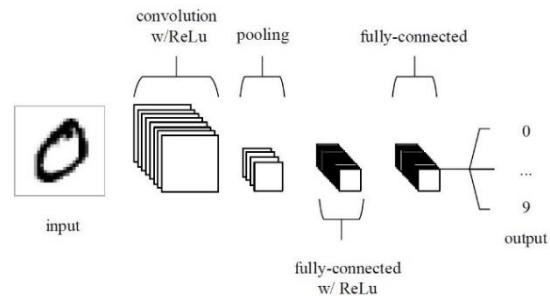
از سویی دیگر، پژوهش‌ها پیشین کارایی شبکه‌های پیچشی به‌منظور کشف و شناسایی ارتباطات محلی و الگو داده‌ها، خصوصاً در مسئله موردبررسی این پژوهش (سری زمانی‌های چندمتغیره حاصل از سامانه پایش سلامت) نشان داده‌اند [۲۳-۲۵]. لازم به ذکر است پژوهش‌های [۲۳-۲۵] بر اساس پایش نظارت‌شده توسعه داده شده‌اند و هیچ‌یک کارایی این شبکه در حالت نظارت‌نشده نسنجیده‌اند.

از این‌رو با توجه به دغدغه محقق و اهداف پژوهش حاضر مبنی بر تشخیص بدون نظارت آسیب، تلفیق دو نوع شبکه فوق‌الذکر در راستای الف) تشخیص آسیب بدون نظارت با بهره‌گیری از خودرمزگذارها و ب) کشف ارتباط میان داده‌های سیستم پیچیده و غیرخطی مورد بررسی با استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی، مورد بررسی قرار گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که شبکه خودرمزگذار به تنهایی می‌تواند یک نمای فشرده از ویژگی‌های اصلی و کلیدی ارائه دهد؛ اما امکان تفکیک ویژگی‌های وضعیت سالم و وضعیت آسیب‌دیده سازه، با وجود ارتباط غیرخطی و هم‌پوشانی میان آن‌ها در هاله‌ای از ابهام است. از طرفی به‌کارگیری شبکه‌های پیچشی به‌تنهایی نیازمند اطلاع از وضعیت داده‌های ورودی است که با هدف پژوهش حاضر در تضاد است؛ اما در ترکیب با خودرمزگذارها، موجب ارائه ویژگی‌های مناسب در عین حفظ ماهیت بدون نظارت خواهد شد. در این مقاله یک خودرمزگذار پیچشی به‌منظور استخراج خودکار ویژگی از پاسخ ثبت‌شده حسگرهای شتاب سنج سازه ارائه شده است.

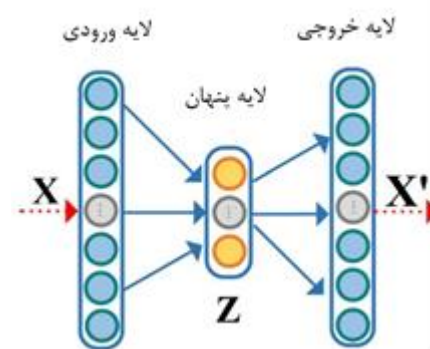
▪ پارامترهای طراحی

CAE این شبکه یک شبکه خودرمزگذار است که در لایه‌های رمزگذار آن از فرآیند پیچش یا کانولوشن و در لایه‌های رمزگشا از کانولوشن ترانهاد ساخته شده است [۲۶]. کانولوشن ترانهاد عملیاتی برای بازسازی داده‌های ورودی است که خروجی آن، دارای ابعادی برابر با

را از ورودی یاد می‌گیرد، درحالی‌که لایه پنهان رمزگشا تلاش می‌کند تا ورودی را بازسازی کند. در این میان داده‌های لایه پنهان، ویژگی‌های آموخته‌شده از داده‌های ورودی هستند. یک خودرمزگذار تک‌لایه کافی نیست تا ویژگی‌های نمایانگر از داده‌های خام را استخراج کند. از این‌رو مفهوم، خودرمزگذار عمیق متشکل از چندین لایه توسعه یافت [۲۰]. خودرمزگذارها برای کاهش ابعاد و یادگیری ویژگی‌ها استفاده‌شده‌اند [۲۱]. ویژگی‌های یاد گرفته‌شده در لایه‌های پنهان این شبکه‌ها، داده‌های اصلی را به شکل مناسبی توصیف می‌کنند. خودرمزگذار یک ابزار یادگیری عمیق بدون نظارت است؛ که از تکرار فرآیند پس انتشار خطا برای آموزش خود به‌منظور بازسازی ورودی‌های شبکه استفاده می‌کند. در طول فرآیند آموزش، خودرمزگذار با کاهش خطای بازسازی به‌روزرسانی می‌شود [۲۰]. در شکل ۴ ساختار یک خودرمزگذار متعارف نشان داده شده است.



شکل ۳: ساختار شبکه CNN [۱۷]



شکل ۴: ساختار شبکه خودرمزگذار [۲۲]

کپی کردن ورودی به خروجی ممکن است بی‌فایده به نظر برسد. از طرفی خروجی رمزگشا کاربرد خاصی ندارد. از این‌رو محدودیت‌های مختلفی بر روی شبکه اعمال می‌گردد. یکی از این محدودیت‌ها، کوچک‌تر بودن لایه پنهان است. این اقدام شبکه را مجبور به یادگیری یک نمای فشرده از ورودی‌ها می‌کند. در این نوع خودرمزگذار امکان کشف ویژگی‌های بارز از داده‌ها را با توجه به ابعاد کمتر از ورودی در لایه پنهان وجود دارد [۲۲].

آموزش شبکه‌های عصبی عمیق به دلیل محدودیت‌های پردازشی، امکان پردازش کل داده در هر دوره وجود ندارد. لذا در فرآیند آموزش، زیرنمونه‌هایی (دسته^۴) از کل داده در هر دوره، به‌صورت قطعه به قطعه به شبکه داده می‌شود.

• آموزش و عملکرد

روش پیشنهادی این مقاله صرفاً از اطلاعات داده‌های وضعیت سالم سازه استفاده کرده است. در سازه مبنا موردبررسی، چهار حسگر، داده‌های وضعیت‌های مختلف را جمع‌آوری می‌کنند، از این‌رو یک سری‌زمانی چهار کاناله باید تحلیل شود. به‌منظور تشخیص آسیب و ارزیابی وضعیت‌های مختلف سازه، خطای بازسازی مدل CAE (مقدار تابع L_{MSLE} برای ورودی) به‌عنوان شاخص حساس به آسیب در نظر گرفته شده است.

به‌منظور آموزش مدل، یک پنجره به طول ۱۰۲۴ با گام‌های ۳۲ تایی، بر روی سری زمانی ۴ کاناله مرتبط با داده‌های وضعیت سالم، لغزنده شده است. نتیجتاً ماتریس ورودی به مدل CAE ابعاد (۱۰۲۴×۴) دارد. درمجموع ۲۹ سری داده برای وضعیت‌های مختلف سالم سازه و ۸۰ سری داده برای وضعیت‌های مختلف آسیب‌دیده سازه گزارش شده است. همان‌طور که پیش‌ازاین تشریح گردید؛ در هر بار داده‌برداری ۸۱۹۲ نمونه برداشت شده است. با لغزاندن پنجره‌ای به طول ۱۰۲۴ با گام‌های ۳۲ تایی، در مجموع ۷۳۹۲ پنجره برای وضعیت‌های سالم سازه و ۲۰۴۴۸ پنجره برای وضعیت‌های آسیب‌دیده سازه ایجاد شده است. این تکنیک ازدیاد داده موجب آموزش هر چه بهتر مدل خواهد شد. نتیجتاً عملکرد مناسب‌تر آن را در پی خواهد داشت.

تقسیم کل داده‌ها به سه مجموعه داده، آموزشی^۵، اعتبارسنجی^۶ و آزمایشی^۷ انجام شده است. مجموعه داده آموزشی برای آموزش مدل، مجموعه داده اعتبارسنجی برای تنظیم پارامترها و مجموعه داده آزمایشی برای آزمودن عملکرد الگوریتم استفاده می‌شود. طی پروسه آموزش مدل از مجموعه‌های داده آموزشی و اعتبارسنجی استفاده می‌گردد. مدل CAE این پژوهش با ۸۰٪ و ۱۰٪ داده‌های وضعیت سالم آموزش دیده است و اعتبارسنجی شده است. تمامی داده‌های مرتبط با وضعیت آسیب‌دیده سازه و مابقی ۱۰٪ داده‌های وضعیت سالم به‌عنوان

ابعاد داده‌های اولیه است. در شکل ۵ معماری شبکه CAE پیشنهادی، نشان داده شده است. همچنین جدول ۲ پارامترهای شبکه CAE بیان شده است.

یکی از پارامترهای اصلی طراحی شبکه‌های عصبی تابع هزینه است. تابع هزینه در هر نوبت از آموزش، میزان خطای پیش‌بینی را ارائه می‌دهد تا شبکه عصبی در مسیر یادگیری خود هر بار اصلاح گردد و به بهترین خروجی برسد. در این مسیر ارائه مقدار خطا توسط تابع هزینه صورت می‌گیرد [۲۷]. در این پژوهش از تابع هزینه میانگین توان دوم لگاریتم خطا L_{MSLE} برای آموزش CAE استفاده شده است. مقدار تابع از رابطه (۱) محاسبه می‌شود که در این رابطه، n تعداد کل داده‌ها، y_i مقادیر اصلی و $\tilde{y}_i$ مقادیر پیش‌بینی شده است:

$$L_{MSLE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\log(1 + y_i) - \log(1 + \tilde{y}_i)]^2 \quad (1)$$

الگوریتم بهینه‌سازی^۱ پارامتر دیگری در طراحی شبکه عصبی است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی با به‌کارگیری مقدار تابع هزینه به‌صورت مکرر الگوریتم‌های مشخصی را اعمال کرده تا به بهترین پاسخ ممکن برسند. این توابع در شبکه‌های عصبی باهدف بهبود فرآیند آموزش، پارامترهای شبکه در لایه‌های مختلف را در راستای هدف موردنظر تنظیم می‌کنند.

جدول ۲: پارامترهای شبکه خودرمزگذار پیچشی

مقادیر هابیر پارامترهای خودرمزگذار پیچشی	
تعداد کل لایه‌ها	۱۲
اندازه دسته آموزش	۱۶
دفعات آموزش	۲۰۰
پارامترهای قابل آموزش	۲۳۱۹۴۰
زمان آموزش (دقیقه)	۴
تابع بهینه یابی	ADAM
تابع فعال‌سازی لایه‌ها	Tanh
تابع هزینه	MSLE

نرخ یادگیری^۲، اندازه گام‌ها در الگوریتم بهینه‌سازی را مشخص می‌کند. تعداد دفعات^۳ آموزش، تعداد دفعاتی است که داده‌های آموزش در اختیار شبکه گذاشته می‌شود و شبکه داده‌ها را می‌بیند. در روند

^۵ Train

^۶ Validation

^۷ Test

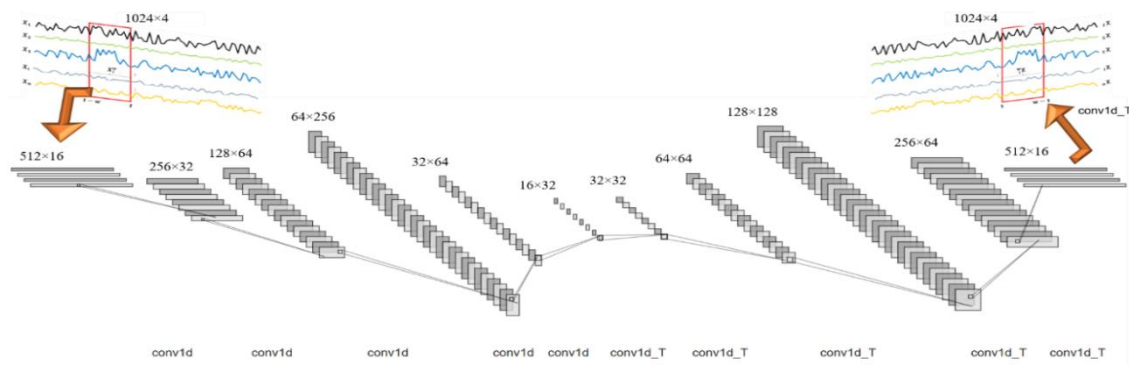
^۱ Optimization Function

^۲ Learning Rate

^۳ Epochs

^۴ Batch size

داده آزمون (تست) پس از آموزش شبکه برای ارزیابی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



شکل ۵: معماری مدل CAE پژوهش حاضر

۴- نتایج

در شکل ۶ عملکرد مدل CAE آموزش داده‌شده در مواجهه با مجموعه داده تست و اعتبارسنجی نشان داده‌شده است. محور افقی، میانگین خطای بازسازی ۴ کانال توسط مدل CAE و محور عمودی تعداد نمونه‌هاست. حجم زردرنگ مربوط به بخشی از داده‌های آزمون است که نماینده وضعیت آسیب‌دیده سازه‌اند. حجم آبی‌رنگ مربوط به بخش مرتبط با وضعیت سالم سازه در داده‌های آزمون (۱۰٪ کل داده‌های سالم سازه) جهت ارزیابی کارایی مدل نشان داده شده است. حجم قهوه‌ای رنگ نشان‌دهنده داده‌های مرتبط با اعتبارسنجی (۱۰٪ کل داده‌های سالم سازه) است. در شکل خط عمودی آبی بیشینه تمام مقادیر میانگین خطای بازسازی ۴ کانال توسط مدل CAE داده‌های وضعیت سالم سازه و خط عمودی زردرنگ کمینه تمامی مقادیر میانگین خطای بازسازی ۴ کانال توسط مدل CAE داده‌های وضعیت آسیب‌دیده سازه است.

به‌منظور اطمینان از عملکرد مدل، تمام داده سازه مینا مورد بررسی، به‌عنوان ورودی به مدل آموزش‌یافته، داده شدند. مقادیر میانگین خطای بازسازی ۴ کانال مدل CAE در شکل ۷ نمایش داده‌شده است. خط عمودی قرمز، مرز جداکننده داده‌های وضعیت سالم و آسیب‌دیده است. خط افقی قرمز بر مبنای مقدار بیشینه خطای بازسازی داده‌های سالم رسم شده است. نتایج حاکی از موفقیت مدل پیشنهادی در جداسازی داده‌های مرتبط با وضعیت سالم و آسیب‌دیده سازه است. محور افقی شکل، تعداد کل پنجره‌های وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده سازه را نشان می‌دهد. محور عمودی میانگین خطای بازسازی پنجره‌های ورودی (۴ کانال) به مدل CAE است.

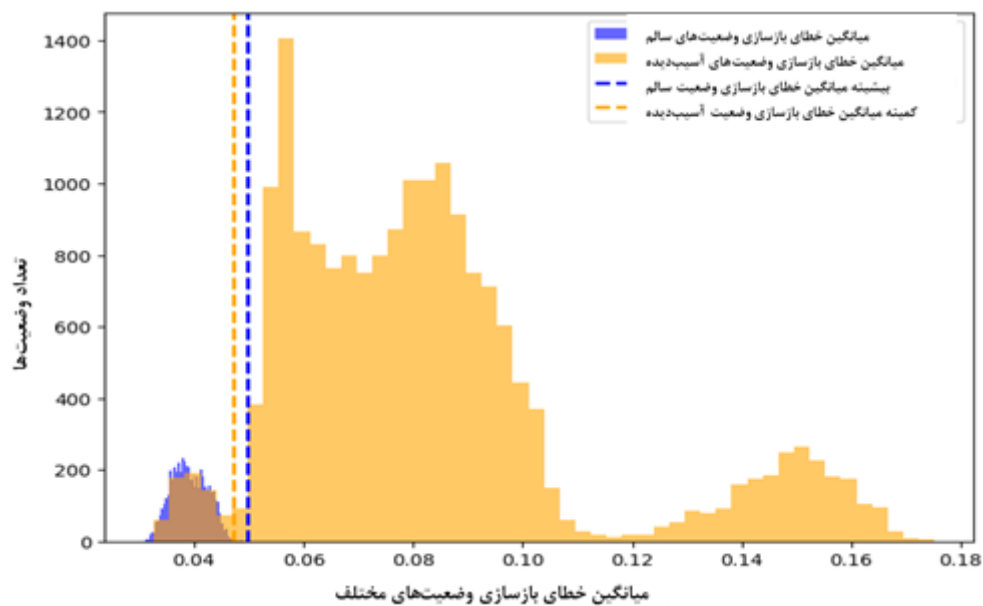
جدول ۳: خطای بازسازی خودرمزگذار پیش‌بینی

مقادیر تابع هزینه پس از ۲۰۰ دفعه آموزش		
MAE	MSE	MSLE
۰/۰۲۶۳	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۳۴۶

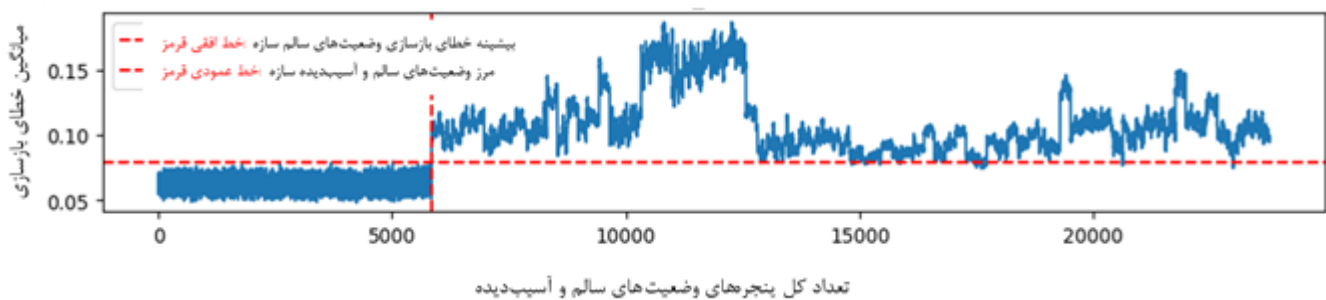
جدول ۴: عملکرد شبکه خودرمزگذار پیش‌بینی

کل	خطا		مدل توسعه داده‌شده
	نوع دو	نوع یک	
۰/۰۲۲۶	۰/۰۲۳۵	۰/۰/۰	خودرمزگذار پیش‌بینی

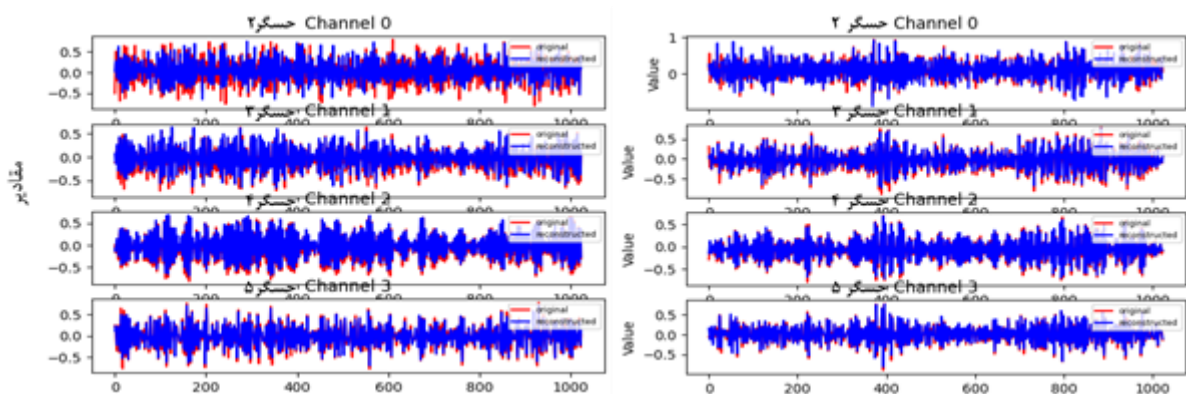
به‌منظور اطمینان از عملکرد مدل، تمام داده سازه مینا مورد بررسی، به‌عنوان ورودی به مدل آموزش‌یافته، داده شدند. مقادیر میانگین خطای بازسازی ۴ کانال مدل CAE در شکل ۷ نمایش داده‌شده است. خط عمودی قرمز، مرز جداکننده داده‌های وضعیت سالم و آسیب‌دیده است. خط افقی قرمز بر مبنای مقدار بیشینه خطای بازسازی داده‌های سالم رسم شده است. نتایج حاکی از موفقیت مدل پیشنهادی در جداسازی داده‌های مرتبط با وضعیت سالم و آسیب‌دیده سازه است. محور افقی شکل، تعداد کل پنجره‌های وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده سازه را نشان می‌دهد. محور عمودی میانگین خطای بازسازی پنجره‌های ورودی (۴ کانال) به مدل CAE است.



شکل ۶: عملکرد مدل CAE روی سازه LANL



شکل ۷: مقادیر میانگین خطای بازسازی CAE روی تمامی داده‌های سازه LANL



شکل ۸: مصورسازی نتایج CAE، الف) داده مرتبط با وضعیت سالم سازه، ب) داده مرتبط با وضعیت آسیب‌دیده سازه

استفاده از MSE و MAE در آموزش خودرمزگذارها مرسوم‌اند اما نتایج بیانگر عملکرد مناسب‌تر MSLE نسبت به آن‌ها است. برای نمونه سیگنال‌های بازسازی‌شده یکی از ورودی‌های CAE، در وضعیت سالم و آسیب‌دیده در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. نقاط قرمز رنگ

در جدول ۳ مقادیر خطای آموزش انتهایی فرآیند آموزش مدل CAE گزارش شده‌است. در جدول مقادیر تابع خطای میانگین توان دوم لگاریتم خطا (MSLE)، میانگین توان دوم خطا (MSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) گزارش شده‌اند. علیرغم اینکه

موقعی که حفظ جان کاربران از اهمیت بسزایی برخوردار است؛ نیاز به شناسایی تمامی وضعیت محتمل آسیب است. به عبارت دیگر نیاز است که مقدار خطای نوع دوم باید بسیار کم باشد و اگر خطایی هم تولید شد در گروه مرتبط با وضعیت سالم سازه که به اشتباه آسیب‌دیده گزارش شده است، قرار گیرد؛ اما گاهی صحت بیشتر هدف مسئله خواهد بود. به طور مثال اگر در حوزه تشخیص سلامت سازه نیاز به سامانه‌ای با اعتماد بالا باشد؛ بایستی صحت الگوریتم قابل قبول بوده به نحوی که اعلان آسیب به صورت اشتباه در آن کم باشد تا هزینه‌های پایش و بازرسی‌های سازه در کمترین مقدار ممکن قرار گیرد. بررسی نتایج این پژوهش خصوصاً نتایج گزارش شده جدول ۴ بیانگر توازن بین هر دو نوع خطا در عین مقادیر پایین هر دو آن‌هاست.

۴-۲- تحلیل مقایسه‌ای با پژوهش‌های پیشین

به منظور اثبات کارایی، نتایج پژوهش حاضر با چندین نمونه از پژوهش‌های گذشته با شرط یکسان بودن سازه مبنا بررسی شده، تحلیل و مقایسه گردید. پژوهش حاضر و پژوهش‌های مقایسه‌شده از نظر سازه بررسی شده، نحوه و نوع داده‌برداری و وضعیت‌های داده‌برداری یکسان و مقید توضیحات و شرایط مرجع [۱۳] هستند. در پژوهش سانتوس و همکاران^۱ [۲۸] با رویکرد تشخیص آسیب مبتنی بر تشخیص ناهنجاری روی سازه سه طبقه LANL، شاخص‌های حساس به آسیب به وسیله ضرایب مدل‌های اتورگسیو^۲ استخراج گردید و توسط الگوریتم‌های مختلف تشخیص ناهنجاری آسیب در سازه تشخیص داده شد. نتایج پژوهش آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. در مقام مقایسه با نتایج پژوهش حاضر، در ردیف انتهایی جدول مذکور نتایج این پژوهش ارائه شده است. بهبود قابل توجه نتایج پژوهش حاضر نسبت به پژوهش کاملاً مشهود است. در پژوهش دیگری توسط بالاسمو و همکاران^۳، ضرایب کپسترا^۴ معیار مل^۴ به عنوان ویژگی‌های حساس به آسیب از سازه مبنا سه طبقه LANL استخراج گردید [۲۹]. در جدول ۶ نتایج پژوهش آن‌ها (استفاده از بردار میانگین و ماتریس کوواریانس ویژگی‌های استخراج شده به عنوان شاخص حساس به آسیب) نشان داده شده است. در ردیف انتهایی جدول مذکور نتایج این پژوهش ارائه شده است. نتایج پژوهش حاضر از برتری قابل توجهی نسبت به پژوهش آن‌ها داراست.

در روش‌های کلاسیکی مانند AANN، LOF، IF، SVD و سایرین، نظیر آنچه در پژوهش [۲۸] بکار گرفته شده است؛ استخراج

قسمت‌هایی از سیگنال اند که توسط CAE بازسازی نشده‌اند. به وضوح پیداست در وضعیت آسیب‌دیده نقاط قرمز رنگ نسبت به وضعیت سالم، بیشتر است. در جدول ۴ عملکرد و نتایج مدل CAE، خطای نوع I و نوع II (خطای نوع یک، خطای مثبت؛ وضعیتی از سازه آسیب‌دیده شناخته می‌شود که در واقعیت آسیب‌دیده نیست و خطای نوع دو، خطای منفی؛ وضعیتی از سازه سالم شناخته می‌شود که در واقعیت آسیب‌دیده است) روی داده‌های آزمون (تمامی داده‌های وضعیت آسیب‌دیده به علاوه ۱۰٪ داده مرتبط با وضعیت سالم)، گزارش شده است.

۴-۱- تحلیل نتایج

مدل CAE توسعه داده شده این مقاله دارای جنبه‌های مثبت قابل توجهی است؛ که کارایی آن در یادگیری و بازسازی داده‌ها توجیه ساخته است. ساختار مدل با لایه‌های کانولوشنی متعدد، منجر به استخراج ویژگی‌های مختلفی از داده‌های ورودی شده است. استفاده از اندازه‌های فیلتر متفاوت به مدل کمک می‌کند تا ویژگی‌ها در مقیاس‌های مختلف شناسایی گردند. از طرفی با استفاده از گام‌های بزرگ‌تر از ۱ در لایه‌های رمزگذار و رمزگشا، مدل به طور مؤثری ابعاد ویژگی ورودی را کاهش داده است (ابعاد لایه پنهان خود رمزگذار یک‌هشتم مقدار اولیه آن است)؛ در حالی که سلسله مراتب فضایی را حفظ نموده است. ساختار متقارن CAE (با کانولوشن‌ها و کانولوشن‌های معکوس) ویژگی‌های مهم را در مرحله رمزگذاری شناسایی کرده، سپس آن‌ها را در مرحله رمزگشایی به طور مؤثر بازسازی کرده است. افزایش و کاهش تدریجی تعداد فیلترها منجر به یادگیری توانمند ویژگی‌های سطح بالا و پایین شده است. لایه‌های پیچشی ترانهاد در رمزگشا موجب بازسازی داده ورودی با ویژگی‌های یاد گرفته شده، شده است. مجموع این عوامل منجر به عملکرد قابل توجه و مناسب مدل، در تشخیص و جداسازی وضعیت‌های مختلف سازه، اعم از حالات سالم و آسیب‌دیده شده است. این مهم حتی با وجود شرایط متغیر بهره‌برداری و وجود ارتباط غیرخطی میان وضعیت‌های مختلف حاصل گشته است. مصورسازی نتایج در قسمت قبل، هم‌پوشانی بسیار کم و غیر قابل توجه در تشخیص و تمایز وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده سازه نشان داده است.

تفسیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل، به بستر و هدف به کارگیری آن‌ها وابسته است. در بحث تشخیص آسیب برای حفظ کارایی سازه و

³ Balsamo et al.

⁴ Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs)

¹ Santos et al.

² Autoregressive

جدول ۵: مقایسه نتایج پژوهش حاضر و پژوهش سانتوس و همکاران [۲۸]

مدل	خطا		کل
	نوع یک	نوع دو	
AANN	٪۹/۷۸	٪۱/۲۵	٪۴/۳۲
MSD	٪۹/۳۳	٪۱/۰۰	٪۴/۰۰
SVD	٪۶/۴۴	٪۳/۶۲	٪۴/۶۴
One-class SVM	٪۸/۰۰	٪۰/۷۵	٪۳/۳۶
SVDD	٪۸/۲۲	٪۰/۷۵	٪۳/۴۴
KPCA	٪۴/۶۷	٪۱/۶۲	٪۲/۷۲
GKPCA	٪۵/۳۳	٪۱/۱۲	٪۲/۶۴
خودرمزگذار پیچشی	٪۰/۱۰	٪۰/۲۳۵	٪۰/۲۲۶

جدول ۶: مقایسه نتایج پژوهش حاضر و پژوهش بالاسمو و همکاران [۲۹]

مدل توسعه داده شده	خطا		کل
	نوع یک	نوع دو	
ضرایب کیسترال	٪۱/۱۱	٪۱/۲۵	٪۱/۱۸
ضرایب اتورگرسیو	٪۱/۴۸	٪۲/۵۰	٪۱/۹۹
خودرمزگذار پیچشی	٪۰/۱۰	٪۰/۲۳۵	٪۰/۲۲۶

۵- جمع بندی

در این پژوهش، یک روش تشخیص داده‌محور و بدون نظارت آسیب، در سازه‌های قابی شکل، توسعه داده شد. خطای بازسازی خودرمزگذار پیچشی، روشی مطمئن و توانمند برای تشخیص آسیب سازه‌ای کشف شد. تشخیص آسیب با به‌کارگیری مستقیم پاسخ‌های ارتعاشی حاصل از تحریک محیطی روی سازه مبنا LANL، تحت شرایط متغیر بهره‌برداری، بدون مبادرت به پیش‌پردازش پیچیده نظیر استفاده از روش‌های پردازش سیگنال یا الگوریتم‌های کاهش ابعاد صورت گرفت. مدل CAE توسعه داده شده، صرفاً بر اساس داده‌های وضعیت سالم سازه آموزش یافته است. وضعیت‌های مختلف سازه را به‌درستی تشخیص داده است و نتایج طی نمودارها و جداول متنوع مورد ارزیابی قرار گرفت. اثربخشی مدل CAE در شناسایی دقیق وضعیت سازه، باوجود درهم‌تنیدگی و وابستگی پیچیده بین حالات مختلف سازه، مشهود است. مدل CAE این پژوهش، باهدف بازسازی داده ورودی و

ویژگی‌ها دستی است یا به‌صورت محدود و غیر تطبیقی انجام می‌شود. در مقابل، CAE توانایی یادگیری خودکار ویژگی‌های سلسله‌مراتبی و غیرخطی از داده‌های خام، بدون نیاز به پیش‌پردازش یا انتخاب ویژگی را دارد. برخلاف AANN که ساختاری مسطح دارد، CAE با استفاده از لایه‌های کانولوشنی، می‌تواند الگوهای محلی و فضایی مهم را شناسایی کند. برخلاف SVD و KPCA که به تحلیل‌های خطی یا نیمه‌خطی متکی هستند، CAE به‌صورت ذاتی توانایی درک ارتباطات غیرخطی پیچیده در داده‌ها را دارد. مدل CAE، به‌ویژه برای داده‌های سری‌های زمانی چندکاناله، ویژگی‌های مکانی و زمانی داده‌ها را حفظ می‌کند. درحالی‌که روش‌هایی مانند LOF و Isolation Forest فقط به داده‌ها به‌عنوان نقاطی در فضای ویژگی نگاه می‌کنند و اطلاعات ساختاری یا ترتیب زمانی در آن‌ها گم می‌شود. در CAE، فرایند کاهش ابعاد از طریق لایه‌های کانولوشن انجام می‌شود. این موضوع برخلاف روش‌هایی مثل SVD و KPCA که کاهش ابعاد را بر پایه معیارهای ایستا و کلی انجام می‌دهند. در CAE این کاهش ابعاد به‌صورت تطبیقی و بهینه‌شده بر اساس هدف بازسازی انجام می‌شود. در سناریوهای تشخیص آسیب با شرایط متغیر بهره‌برداری و روابط غیرخطی، مدل CAE با ساختار غیرخطی و عمیق خود، بهتر از مدل‌هایی مانند LOF یا One-Class SVM (با ساختار داده‌های ساده و توزیع پذیر)، قابلیت تعمیم و تطبیق بالاتری با داده‌های واقعی دارد. در پژوهش کائوس و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۴، از چهار مدل اتورگرسیو (AR، ARMA، ARX و ARMAX) جهت مدل‌سازی سری زمانی‌های چندمتغیره سازه مبنا سه طبقه LANL و استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب از آن‌ها استفاده گردید [۳۰]. نتایج قابل قبولی همچون پژوهش حاضر حاصل گردید؛ اما زمان محاسبه ضرایب مدل‌های اتورگرسیو AR، ARMA، ARX و ARMAX به ترتیب ۳۳/۸ دقیقه، ۱۸/۴ دقیقه و ۲/۷ ساعت گزارش گردیده است. این در حالی است که در رویکرد پیشنهادی این پژوهش، زمان آموزش مدل CAE، ۴/۵ دقیقه بوده است. در واقع روش‌های مدل‌سازی سری زمانی مانند AR، ARMA و ARX به زمان محاسباتی بسیار بالایی برای استخراج ویژگی نیاز دارند. درحالی‌که CAE با توجه به پیکربندی موازی‌پذیر خود در پردازنده‌های گرافیکی، زمان آموزش بسیار کمتری داشته است.

^۱ Kauss et al.

2024 (in Persian). doi: [10.22034/jmeut.2024.60099.3368](https://doi.org/10.22034/jmeut.2024.60099.3368)

[2] M. Azimi, A. Dadras Eslamlou, and G. Pekcan, "Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: A state-of-the-art review," *Sensors*, Vol. 20, No. 10, p. 2778, 2020. doi: [10.3390/s20102778](https://doi.org/10.3390/s20102778)

[3] Z. Yuan, S. Zhu, C. Chang, X. Yuan, Q. Zhang, and W. Zhai, "An unsupervised method based on convolutional variational auto-encoder and anomaly detection algorithms for light rail squat localization," *Construction and Building Materials*, Vol. 313, p. 125563, 2021. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.125563](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125563)

[4] K. Eltouny and X. Liang, "Large-scale structural health monitoring using composite recurrent neural networks and grid environments," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 38, No. 3, pp. 271–287, 2023. doi: [10.1111/mice.12841](https://doi.org/10.1111/mice.12841)

[5] M. Z. Sarwar and D. Cantero, "Probabilistic autoencoder-based bridge damage assessment using train-induced responses," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 208, p. 111046, 2024. doi: [10.1016/j.ymssp.2024.111046](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111046)

[6] O. Avci, O. Abdeljaber, S. Kiranyaz, M. Hussein, M. Gabbouj, and D. Inman, "A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 147, p. 107077, 2021. doi: [10.1016/j.ymssp.2020.107077](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077)

[7] A. Asgharzadeh Bonab, G. Nasirpour, and A. Allahyari Pargo, "A comparative study and accurate approach for damage detection of frame structures based on deep neural network models," *Mechanical Engineering, University of Tabriz*, Vol. 54, No. 1, pp. 71–80, 2025 (in Persian). doi: [10.22034/jmeut.2025.63709.3467](https://doi.org/10.22034/jmeut.2025.63709.3467)

[8] S. Ghazimoghadam and S. A. A. Hosseinzadeh, "A novel unsupervised deep learning approach for vibration-based damage diagnosis using a multi-head self-attention LSTM autoencoder,"

استفاده از خطای بازسازی آن، با لایه‌های کانولوشنی متعدد، کاهش ابعاد مؤثر و ساختار متقارن، به‌خوبی تعادل بین یادگیری و بازسازی را برقرار نموده است. یافته‌ها نشان می‌دهد، مدل CAE با خطای ۰/۰۲۲۶ (دقت ۹۹/۷۷۴٪) نتایج دقیقی در تشخیص آسیب سناریوهای مختلف به همراه داشته‌است. همچنین مدل موردنظر از نظر تعداد پارامترهای آموزش (۲۳۱۹۴۰ پارامتر) و تلاش محاسباتی (نیاز به ۴/۵ دقیقه جهت آموزش روی داده‌های سازه مورد بررسی) عملکرد مطلوبی دارد. جهت اثبات کارایی مدل پیشنهادی، نتایج با پژوهش مشابه روی سازه مینا یکسان مقایسه گردیده‌است. مقایسه عملکرد CAE با الگوریتم‌های کلاسیک نشان داد، این مدل از دقت، تعمیم‌پذیری و سرعت بالاتری برخوردار است و در شرایط پیچیده مانند تغییرات بهره‌برداری، عملکردی پایدار دارد.

باوجود نتایج قابل توجه، این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه بوده است. مدل تنها با داده‌های وضعیت سالم آموزش‌دیده و فرض شده که تمامی داده‌های آموزشی، بدون آسیب هستند. در شرایط واقعی، ممکن است داده‌های آموزشی نیز شامل ناهنجاری‌های پنهان باشند. هرچند مدل در برابر تغییرات جزئی مقاوم بوده است، اما شرایط محیطی مانند دما و رطوبت، به‌صورت مستقیم در آموزش مدل لحاظ نشده‌اند. از طرفی در سناریوهای واقعی تشخیص آسیب، عدم قطعیت در اندازه‌گیری و برچسب‌گذاری اجتناب‌ناپذیر است و در این پژوهش لحاظ نشده است.

همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده موضوعاتی نظیر؛ الف) ادغام شرایط محیطی در فرایند یادگیری، ب) به‌کارگیری مدل برای شرایط برخط و سازه‌های واقعی و ج) استفاده از مدل‌های ترکیبی با امکان یادگیری چندوظیفه‌ای؛ بررسی بشود. درمجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از خودرمزگذار پیچشی، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های کلاسیک در سازه‌های پیچیده و غیرخطی باشد. با رفع محدودیت‌های موجود و گسترش کاربردهای مدل، می‌توان آن را در چارچوب‌های پیشرفته‌تر پایش سلامت سازه و تشخیص آسیب تعمیم داد.

۶- منابع

[1] A. Asgharzadeh Bonab, H. Kalb Khani, and S. Bijanvand, "A machine learning-based approach for linear and nonlinear damage detection in structures using combined deep temporal and time-frequency features," *Mechanical Engineering, University of Tabriz*, Vol. 54, No. 1, pp. 71–80,

- [17] K. O'Shea, "An introduction to convolutional neural networks," *arXiv preprint*, arXiv:1511.08458, 2015. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.08458>
- [18] G. Marcus, "Deep learning: A critical appraisal," *arXiv preprint*, arXiv:1801.00631, 2018. Available: doi: [10.48550/arXiv.1801.00631](https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.00631)
- [19] R. M. Schmidt, "Recurrent neural networks (RNNs): A gentle introduction and overview," *arXiv preprint*, arXiv:1912.05911, 2019. Available: doi: [10.48550/arXiv.1912.05911](https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.05911)
- [20] Y. J. Cha, R. Ali, J. Lewis, and O. Büyüköztürk, "Deep learning-based structural health monitoring," *Automation in Construction*, Vol. 161, p. 105328, 2024. doi: [10.1016/j.autcon.2024.105328](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105328).
- [21] D. Kwon, H. Kim, J. Kim, S. C. Suh, I. Kim, and K. Kim, "A survey of deep learning-based network anomaly detection," *Cluster Computing*, Vol. 22, pp. 949–961, 2019. doi: [10.1007/s10586-018-3081-1](https://doi.org/10.1007/s10586-018-3081-1)
- [22] S. Chen and W. Guo, "Auto-encoders in deep learning — A review with new perspectives," *Mathematics*, Vol. 11, No. 8, p. 1777, 2023. doi: [10.3390/math11081777](https://doi.org/10.3390/math11081777)
- [23] O. Abdeljaber, O. Avci, S. Kiranyaz, M. Gabbouj, and D. J. Inman, "Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 388, pp. 154–170, 2017. doi: [10.1016/j.jsv.2016.08.050](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.08.050)
- [24] S. Sharma and S. Sen, "One-dimensional convolutional neural network-based damage detection in structural joints," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 5, pp. 1057–1072, 2020. doi: [10.1007/s13349-020-00423-3](https://doi.org/10.1007/s13349-020-00423-3)
- [25] Z. Teng, S. Teng, J. Zhang, G. Chen, and F. Cui, "Structural damage detection based on real-time vibration signal and convolutional neural network," *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 14, p. 4720, 2020. doi: [10.3390/app10144720](https://doi.org/10.3390/app10144720)
- [9] A. Pollastro, G. Testa, A. Bilotta, and R. Prevete, "Semi-supervised detection of structural damage using variational autoencoder and a one-class support vector machine," *IEEE Access*, 2023. doi: [10.1109/ACCESS.2023.3291674](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291674)
- [10] A. Anaissi, S. M. Zandavi, B. Suleiman, M. Naji, and A. Braytee, "Multi-objective variational autoencoder: An application for smart infrastructure maintenance," *Applied Intelligence*, Vol. 53, No. 10, pp. 12047–12062, 2023. doi: [10.1007/s10489-022-04321-z](https://doi.org/10.1007/s10489-022-04321-z)
- [11] D. Terzis, "Monitoring innovation metrics in construction and civil engineering: Trends, drivers and laggards," *Developments in the Built Environment*, Vol. 9, 2022. doi: [10.1016/j.dibe.2022.100054](https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100054)
- [12] H. Dang, M. Tatipamula, and H. Nguyen, "Cloud-based digital twinning for structural health monitoring using deep learning," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, Vol. 18, No. 6, pp. 3820–3830, 2021. doi: [10.1109/TII.2021.3064907](https://doi.org/10.1109/TII.2021.3064907)
- [13] E. Figueiredo, G. Park, J. Figueiras, C. Farrar, and K. Worden, "Structural health monitoring algorithm comparisons using standard data sets," Los Alamos National Lab, 2009. doi: [10.2172/947958](https://doi.org/10.2172/947958)
- [14] R. Chalapathy and S. Chawla, "Deep learning for anomaly detection: A survey," *arXiv preprint*, arXiv:1901.03407, 2019. Available: doi: [10.48550/arXiv.1901.03407](https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.03407)
- [15] S. Samudra, M. Barbosh, and A. Sadhu, "Machine learning-assisted improved anomaly detection for structural health monitoring," *Sensors*, Vol. 23, No. 7, p. 3365, 2023. doi: [10.3390/s23073365](https://doi.org/10.3390/s23073365)
- [16] C. Farrar, S. Doebling, and D. Nix, "Vibration-based structural damage identification," *Philos. Trans. R. Soc. A*, Vol. 359, No. 1778, pp. 131–149, 2001. doi: [10.1098/rsta.2000.0735](https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0735)

- [29] L. Balsamo, R. Betti, and H. Beigi, "A structural health monitoring strategy using cepstral features," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 19, pp. 4526–4542, 2014. doi: [10.1016/j.jsv.2014.05.040](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.05.040)
- [30] K. Kauss, V. Alves, F. Barbosa, and A. Cury, "Semi-supervised structural damage assessment via autoregressive models and evolutionary optimization," *Structures*, Vol. 59, p. 105762, 2024. doi: [10.1016/j.structures.2024.105762](https://doi.org/10.1016/j.structures.2024.105762)
- [26] K. Berahmand, F. Daneshfar, E. Salehi, Y. Li, and Y. Xu, "Autoencoders and their applications in machine learning: A survey," *Artificial Intelligence Review*, Vol. 57, No. 2, p. 28, 2024. doi: [10.1007/s10462-023-10478-w](https://doi.org/10.1007/s10462-023-10478-w)
- [27] U. Michelucci, "An introduction to autoencoders," *arXiv preprint*, arXiv:2201.03898, 2022. Available: doi: [10.48550/arXiv.2201.03898](https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.03898)
- [28] A. Santos, E. Figueiredo, M. Silva, C. Sales, and J. Costa, "Machine learning algorithms for damage detection: Kernel-based approaches," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 363, pp. 584–599, 2016. doi: [10.1016/j.jsv.2016.05.033](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.05.033)



Mathematical modeling of a thermally driven multistage desalination system (MED) for industrial applications

Sayyed Aboozar Fanaee ^{*1} , Meysam Mahmoudi ²

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, birjand, Iran

2. PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, birjand, Iran

Abstract

Multi-Effect Distillation (MED) systems are advanced technologies for seawater desalination, valued for their high energy efficiency and heat recovery capabilities in industrial and potable water applications. This study developed a mathematical model based on mass, energy, and thermodynamic balances to analyze system performance. By solving the governing equations, the impact of key parameters—number of distillation stages, inlet steam temperature, and brine concentration—on the Gain Output Ratio (GOR) was quantitatively evaluated. Results show a linear positive correlation between the number of stages and GOR improvement, with a maximum GOR of 12.049 achieved in a 12-stage configuration at an 80°C feed temperature. Each additional stage increases GOR by approximately 15%. However, the motive-to-sucked steam ratio grows exponentially with more stages, significantly increasing motive steam consumption. These findings provide an analytical framework for optimizing industrial MED systems, enhancing energy efficiency and economic savings.

Keywords

Multi-stage desalination plant
performance coefficient
brackish water
mathematical modeling
industrial applications

Received: 03.05.2025

Revised: 02.09.2025

Accepted: 07.09.2025

*Corresponding Author

Sayyed Aboozar Fanaee

Email

sab.famech@birjand.ac.ir

1- Introduction

Amid global water scarcity and increasing demand for sustainable freshwater, efficient desalination technologies like Multi-Effect Distillation (MED) are critical. As a leading thermal desalination method, MED uses thermal energy to evaporate seawater across multiple stages, condensing the vapors to produce fresh water. Thermocompressors, preferred for their lower construction, maintenance, and energy costs compared to mechanical compressors, recover thermal energy to enhance efficiency [1]. In an MED system, motive steam from the boiler and condenser steam are processed by the thermocompressor to heat the first stage's

tubes, where sprayed seawater undergoes flash evaporation. Condensed liquid partially returns to the boiler, with the remainder as the first stage's product. Brine and vapor move to subsequent stages, with only the first stage requiring external energy. Progressively reduced pressure optimizes energy use across stages, and final stage vapor condenses in the condenser, where preheated seawater splits into feed and discharge, improving efficiency [1]. Research highlights include Desouky et al.'s thermodynamic models for performance prediction [2], Al-Juwayhel et al.'s findings on energy savings versus higher costs with more stages

How to Cite this Article:

[1] S. A. Fanaee and M. Mahmoudi, "Mathematical modeling of a thermally driven multistage desalination system (MED) for industrial applications," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 83–97, 2025. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.520824.1127> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

[3], and Darwish et al.'s economic optimizations using ASPEN Plus [4]. Khalifa et al. enhanced stability with MATLAB models [5], while Sayed et al. and Sharonov et al. improved MED-TVC efficiency [6,7]. Wang et al. and Zhang et al. reduced costs in petrochemical and food industries using waste steam [8,9]. Abdi Khanghah et al. optimized MED-TVC for the Persian Gulf [10], and Ghorbani et al. boosted output with higher steam temperatures [12]. Zhang et al. advanced AI-optimized RO-MED hybrids [13], and others like Sayyadi, Zaman, and Al-Saeed enhanced efficiency and sustainability [14–17]. Mathematical modeling optimizes MED systems by evaluating stage count, steam temperature, and salinity impacts on efficiency [10,11]. This study introduces a precise mathematical model for industrial MED applications, integrating advanced algebraic calculations for improved performance prediction. Validated through MATLAB simulations and reference data, it ensures reliability for industrial use, advancing sustainable desalination.

2- Research Methods

Figure 1 presents the proposed multi-effect, multi-stage MED desalination system, with specifications and flows detailed in Table 1, including input and output flows for a single stage. Key parameters are the number of effects (N), seawater salinity (X_f), seawater temperature (T_{cw}), feedwater temperature (T_f), feedwater flow rate (M_f), motive steam pressure (P_m), and motive steam flow rate (M_m).

A mathematical model based on mass, energy, and thermodynamic principles describes the MED system's behavior [10]. The performance ratio (PR), defined as the ratio of fresh water produced to steam input in the first stage [13], is a key efficiency metric. The model includes mass and energy balances, heat transfer equations, and water properties, solved for each stage, the system, and the condenser to assess parameter impacts. Energy consumption and efficiency equations are derived, considering thermomechanical and chemical energy components of the water-salt fluid. The model is presented in two forms: one using waste energy and

another with an integrated boiler. Assumptions include uniform feedwater flow, negligible heat losses, salt-free vapor, no friction-induced temperature drops, negligible boiling point elevation, steady-state operation, equal effect surface areas, and a uniform temperature difference (ΔT) between stages, calculated as (inlet steam temperature minus feedwater temperature)/(N-1). Brine from prior stages reheats subsequent stages, with the first stage's balances treated separately. Input parameters are N, X_f , T_{cw} , T_f , M_f , P_m , and M_m , with brine salinity at 42,000 ppm, meeting discharge limits.

Table 1: Specifications of the MED system for the present problem)

Given value	Parameter
4-12	N
100 °C	T_s
1Kg/s	M_d
42000 ppm	X_f
2 °C	T_{loss}
25 °C	T_{cw}

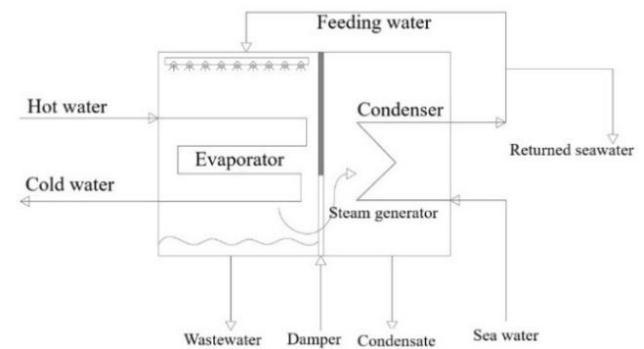


Figure 1: Schematic of the present problem for one work (stage)

In the MED system, the inter-stage temperature difference is assumed constant. The temperature of each stage decreases relative to the previous stage by an amount ΔT . The outlet steam temperature of each stage is calculated taking into account the Boiling Point Elevation (BPE). The inlet water flow is divided equally among the stages, and the brine is transferred between stages. The energy balance equations for each stage determine the amount of steam produced and, ultimately, the quantity of desalinated water produced.

3- Results and Conclusion

To validate the developed program, its results were compared with the modeling in reference [2]. Table 2 shows close agreement between the algebraic calculations of this study and reference data for stage temperatures. The design implemented here increases the temperature of water exiting the first condenser due to optimized flow rates and temperatures of water and waste steam. The governing MED equations, validated against reference [2], were solved using MATLAB to model the system. The performance ratio (PR), a key efficiency metric, was analyzed for various process parameters, particularly the number of stages. However, more stages increase maintenance costs and exponentially raise the motive-to-sucked steam ratio, complicating thermocompressor design (optimal ratio: 1–1.5 [19–20]).

Table 3 shows PR variations with inlet steam temperature across different stage counts. Higher inlet steam temperatures (e.g., 80°C for 12 stages, PR = 12.049) boost PR by increasing inter-stage temperature differences, with each additional stage improving PR by approximately 15%, consistent with reference [2]. Table 4 indicates that higher concentration factors (brine-to-seawater salinity ratio) increase PR by enhancing vapor production per stage at constant feed flow [11]. Figure 2 highlights the exponential rise in the motive-to-sucked steam ratio with more stages.

MED systems achieve high efficiency (PR 10–12) and low energy consumption, making them vital for industries like power, petrochemical, and shipbuilding. Utilizing low-grade steam or industrial waste heat reduces costs and enables desalination of high-salinity seawater, outperforming other thermal methods. Maintaining feedwater at 70–80°C and integrating thermocompressors and pretreatment prevents scaling and ensures long-term stability, making MED ideal for arid regions. These features align with sustainable development by reducing fossil fuel use. Key Findings: PR increases linearly with the number of stages, Each additional stage boosts

PR by approximately 15%, The highest PR (12.049) is achieved with 12 stages at 80°C, Higher concentration factors enhance PR, More stages exponentially increase the motive-to-sucked steam ratio, challenging thermocompressor design.

MED systems, optimized through thermodynamic models and simulations, improve efficiency and reduce costs, with ongoing development of smarter models critical for meeting industrial water demands.

Table 2: Comparison of data extracted from algebraic calculations of the present problem with reference data [2]

.No	1	2	3	4	5	6
T (°C)	91.237	82.013	72.304	62.082	51.324	39.998
This Study	0	3	0	9	5	9
T (°C)	91.237	82.013	72.303	62.083	51.324	40
References	2	2	7	1	7	

Table 3: Values of feed temperature changes on efficiency ratio

PR	Ts			
	80	90	100	110
N=4	3.912	3.940	3.968	3.995
N=6	5.892	5.931	5.969	6.006
N=8	7.875	7.925	7.973	8.019
N=12	11.850	11.918	11.985	12.049

Table 4: Effect of concentration parameter Xb/Xf on efficiency ratio for a case of fixed impact number N=6

Xb/Xf	PR
1.2	4.6
1.4	4.9
1.5	5.1
1.8	5.2
2	5.3
3	5.4

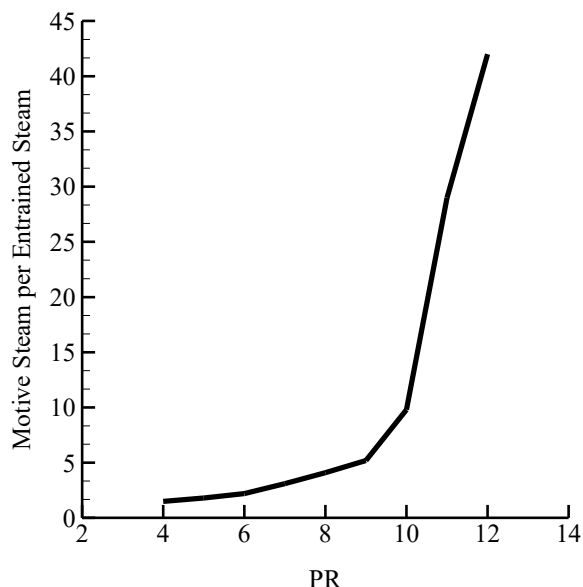


Figure 2: Effect of number of stages on the ratio of motive steam to suction steam

5- References

- [1] M. Al-Shammiri and M. Šafář, "Multi-effect distillation plants: state of the art," *Desalination*, Vol. 126, pp. 45–59, 1999. doi: [10.1016/S0011-9164\(99\)00154-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00154-X)
- [2] H. T. El-Dessouky and H. M. Ettouney, "Fundamentals of Salt Water Desalination," *Elsevier*, 2002.
- [3] F. Al-Juwayhel, H. El-Dessouky, and H. Ettouney, "Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps," *Desalination*, Vol. 114, No. 3, pp. 253–275, 1997. doi: [10.1016/S0011-9164\(98\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00017-4)
- [4] M. A. Darwish, N. M. Al-Najem, and N. Lior, "Thermal analysis of ME-TVC+MEE desalination systems," *Desalination*, Vol. 204, No. 1–3, pp. 354–373, 2006.
- [5] A. E. Khalifa, H. Alawadhi, and M. Ahmad, "Dynamic modeling of multi-effect desalination plants," *Desalination*, Vol. 250, No. 3, pp. 928–935, 2010.
- [6] M. A. Sayed, H. T. El-Dessouky, and H. M. Ettouney, "Thermodynamic analysis of a hybrid MED-TVC desalination system," *Desalination*, Vol. 365, pp. 55–71, 2015.
- [7] A. Sharonov et al., "Optimization of MED-TVC desalination systems using thermodynamic models," *Desalination*, Vol. 435, pp. 45–58, 2018.
- [8] Y. Wang et al., "Modeling and optimization of MED systems for petrochemical industries," *Desalination*, Vol. 456, pp. 78–90, 2019.
- [9] L. Zhang et al., "Dynamic modeling of MED systems for food industry applications," *Desalination*, Vol. 500, pp. 114–125, 2021.
- [10] M. Abdi-Khanghah, B. Bazooyar, M. Gonbadi, and K. C.-W. Wu, "Design and optimization of MED-TVC desalination plant using mathematical modeling coupled with response surface methodology," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, Vol. 153, p. 105187, 2023. doi: [10.1016/j.jtice.2023.105187](https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105187) (in Persian)
- [11] M. Arjmandi and M. Pakizeh, "Design and mathematical modeling of a multi-stage desalination system applicable to steam power plants and similar industries," *Farayand-e No Journal*, Vol. 41, No. 8, pp. 36–49, 2013. (in Persian)
- [12] S. Ghorbani, M. Deymi-Dashtebayaz, and E. Tayyeban, "Parametric investigation and performance optimization of a MED-TVC desalination system based on 1-D ejector modeling," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 288, p. 117131, 2023. doi: [10.1016/j.enconman.2023.117131](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117131) (in Persian)
- [13] Y. Zhang, X. Liu, W. Chen et al., "Advancing Water Security: China's Latest Seawater Desalination Technologies in 2025," *Desalination*, Vol. 560, pp. 115–130, Jan. 2025.
- [14] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Thermoeconomic optimization of multi-effect distillation desalination systems," *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 1122–1133, 2010. doi: [10.1016/j.apenergy.2009.05.023](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.023) (in Persian)
- [15] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Various approaches in optimization of multi-effects distillation desalination systems using a hybrid meta-heuristic optimization tool," *Desalination*, pp. 138–148, 2010. (in Persian)
- [16] M. Zamen, M. Kahani, J. Yazdanpanahi, R. Abedini, and M. H. Ahmadi, "Modeling of a

direct-contact humidification-dehumidification desalination unit in a 256 MW steam power plant using effluent streams: Case study," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 45, p. 102966, 2023. doi: [10.1016/j.csite.2023.102966](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102966) (in Persian)

[17] K. Elsaid, E. T. Sayed, and A. G. Olabi, "Sustainable multi-effect distillation powered by green hydrogen: A techno-economic feasibility study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 189, p. 114789, 2025.

[18] O. A. Hamed, "Thermal Assessment of a Multiple Effect Boiling (MEB) Desalination

System," *Desalination*, Vol. 86, pp. 325–339, 1992. doi: [10.1016/0011-9164\(92\)80042-8](https://doi.org/10.1016/0011-9164(92)80042-8)

[19] N. H. Aly, A. Karameldin, and M. M. Shamloul, "Modelling and simulation of steam jet ejectors," *Desalination*, Vol. 123, pp. 1–8, 1999. doi: [10.1016/S0011-9164\(99\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00053-3)

[20] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, and G. Al-Nuwaibit, "Evaluation of steam jet ejectors," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 41, pp. 551–561, 2002. doi: [10.1016/S0255-2701\(01\)00176-3](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(01)00176-3)



مدل سازی یک آب شیرین کن حرارتی نوع چندمرحله ای (MED) برای مصارف صنعتی

سید ابوذر فنایی^{۱*}، میثم محمودی^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

سیستم های آب شیرین کن چندمرحله ای (MED) به دلیل بازدهی انرژی بالا و قابلیت بازیافت حرارت، فناوری پیشرویی در نمک زدایی آب دریا برای مصارف صنعتی و شرب هستند. در این پژوهش، به منظور تحلیل عملکرد این سیستم ها، یک مدل ریاضی مبتنی بر موازنه های جرم، انرژی و رابطه های ترمودینامیکی اجزای سیستم توسعه داده شد. با حل معادلات حاکم سیستم، تأثیر پارامترهای کلیدی از جمله تعداد مراحل تقطیر، دمای بخار ورودی و غلظت آب شور بر شاخص بهره وری سیستم (GOR) مورد ارزیابی کمی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که افزایش تعداد مراحل تقطیر، رابطه خطی مثبتی با بهبود شاخص (GOR) دارد؛ به طوری که در پیکربندی ۱۲ مرحله ای با دمای تغذیه ۸۰ درجه سانتی گراد، بیشینه بازدهی معادل ۱۲/۰۴۹ حاصل شد. همچنین، افزودن هر مرحله به فرایند، موجب افزایش حدود ۱۵ درصدی در شاخص بهره وری گردید. از سوی دیگر، تحلیل رفتار نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده نشان می دهد که این پارامتر به صورت نمایی به تعداد مراحل وابسته است؛ به گونه ای که با افزایش تعداد مراحل تقطیر، مصرف بخار محرک به طور تصاعدی افزایش می یابد. یافته های این پژوهش، چارچوبی تحلیلی برای طراحی بهینه آب شیرین کن های صنعتی ارائه می کند که می تواند به کاهش مصرف انرژی و افزایش صرفه جویی اقتصادی منجر شود.

کلمات کلیدی

آب شیرین کن چندمرحله ای

ضریب عملکرد

آب شور

مدل سازی ریاضی

مصارف صنعتی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

*نویسنده مسئول

سید ابوذر فنایی

ایمیل

sab.famech@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

نقش کلیدی در بازیابی و استفاده مجدد از انرژی حرارتی بخار دارند و به کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی سیستم کمک می کنند. مزیت عمده ترموکمپرسور به کمپرسور مکانیکی، هزینه های پایین ساخت، نگهداری، تعمیرات و انرژی کم مصرفی آن است [۱]. در یک تبخیرکننده از نوع MED، بخار خروجی از بویلر (بخار محرک) و بخشی از بخار ورودی به کندانسور، توسط ترموکمپرسور مکش می شوند. ترموکمپرسور، بخار را از فشار کندانسور به فشار بخار ورودی به مرحله اول می رساند. این عمل به کمک بخار با فشار بالاتر تأمین می گردد. مخلوط این دو بخار بعنوان مینع حرارتی وارد لوله های اولین مرحله می شود که بالاترین دما را در بین مراحل دارد. خوراک ورودی نیز توسط نازل بر روی این دسته لوله ها پاشیده می شود که به

با توجه به بحران جهانی کم آبی و نیاز فزاینده به منابع آب شیرین پایدار، توسعه سیستم های کارآمد جهت شیرین سازی آب دریا، به ویژه روش های حرارتی مانند تقطیر چندمرحله ای (MED)، از اهمیت راهبردی برخوردار است. فرآیند تبخیر چندمرحله ای (MED) یکی از نخستین و پرکاربردترین فناوری های نمک زدایی آب دریا است که با بهره گیری از انرژی گرمایی، امکان تولید حجم قابل توجهی آب خالص را فراهم می کند. در این روش، آب دریا طی چند مرحله متوالی تبخیر شده و بخارات حاصل در هر مرحله متراکم می شوند. چگالش این بخارات منجر به تولید آب شیرین می شود. برای تسهیل فرآیند تبخیر و افزایش بازدهی، از کمپرسورهایی استفاده می شود که می توانند به دو صورت حرارتی (ترموکمپرسور) یا مکانیکی عمل کنند. این کمپرسورها

How to Cite this Article:

[1] S. A. Fanaee and M. Mahmoudi, "Mathematical modeling of a thermally driven multistage desalination system (MED) for industrial applications," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 83-97, 2025. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.520824.1127> (in Persian).



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

خاطر دمای داغ دسته لوله ها تبخیر ناگهانی صورت می گیرد و بخار داخل دسته لوله ها، کندانس می شود. قسمتی از این مایع کندانس شده، به بویلر بازگردانده می شود و بقیه آن به عنوان محصول مرحله اول در نظر گرفته می شود [۱]. در فرآیند جداسازی مایع شور (پساب)، جریان مایع می تواند به مرحله ی بعدی انتقال یابد تا از دمای بالای آن بهره برداری شود. بخاری که در اثر تبخیر سریع خوراک تولید می شود، پس از عبور از مه زدایی، وارد مرحله ی دوم می شود. به عبارت دیگر، تنها در مرحله ی اول، انرژی خارجی وارد سیستم شده است تا آب دریا تبخیر گردد. این امر نشان می دهد که با یک بار وارد کردن حرارت تولید شده از بخار بویلر، می توان فرآیند تبخیر را در چند مرحله انجام داد. برای این کار نیاز است که در هر مرحله فشار کاهش یابد، به طوری که فشار مرحله ی بعدی کمتر از فشار مرحله ی قبلی باشد. این روش امکان پذیر است و مزیت آن صرفه جویی در مصرف انرژی است، زیرا با تکرار فرآیند در چندین مرحله، از حرارت موجود به شکل بهینه تری بهره برداری می شود. در هر یک از مراحل دوم تا انتها، بخاری که از مرحله ی قبلی تولید شده است، وارد لوله های مرحله ی بعدی می شود. در این بخش، بخار ضمن فرآیند کندانس، باعث تبخیر ناگهانی خوراک ورودی به همان مرحله می شود. مایع کندانس شده که در هر مرحله به دست می آید، به عنوان محصول نهایی آن مرحله محسوب می شود. بخار حاصل از آخرین مرحله نیز به سمت کندانسور هدایت می شود. بخشی از این بخار توسط ترموکمپرسور مکش می شود و قسمت دیگری وارد بخش ته نشین کننده (کندانسور) می گردد. در این فرآیند، آب دریا برای عملیات پیش گرمایش وارد لوله های کندانسور شده و باعث می شود بخاری که روی سطح لوله ها قرار دارد، کندانس شده و تبدیل به مایع شود. پس از گرم شدن، آب دریا در خروجی کندانسور به دو مسیر تقسیم می شود: بخشی به عنوان خوراک مرحله بعدی به مسیر انتقال داده می شود و بخش دیگر به دریا بازگردانده می شود تا ضمن کنترل مصرف انرژی، امکان استفاده مجدد از آن در فرآیند فراهم گردد. این تقسیم بندی هوشمندانه به بهینه سازی عملکرد سیستم و صرفه جویی در منابع کمک می کند [۱].

در ادامه به مرور برخی از پژوهش های انجام گرفته در زمینه مدل سازی آب شیرین کن های حرارتی MED می پردازیم:

دسوک و همکاران بررسی ترمودینامیکی و انتقال حرارت در سیستم های تقطیر چنداثره را به طور جامع بررسی کردند. آن ها مدل های ریاضی برای پیش بینی عملکرد سیستم های MED ارائه دادند و تأثیر پارامترهایی مانند دما، فشار و تعداد اثرها را بر بازدهی

سیستم تحلیل کردند [۲]. الجویحل و همکاران استفاده از روش های عددی، مدل های دینامیکی برای سیستم های MED را توسعه دادند. آن ها نشان دادند که افزایش تعداد اثرها باعث کاهش مصرف انرژی ویژه می شود، اما هزینه های سرمایه گذاری را افزایش می دهد [۳]. درویش و همکاران از نرم افزارهای شبیه سازی مانند ASPEN Plus و EES برای مدل سازی سیستم های MED استفاده کردند. آنها تأثیر پارامترهای عملیاتی مانند دما و فشار بخار ورودی را بر عملکرد سیستم بررسی کردند و بهینه سازی اقتصادی سیستم را انجام دادند [۴]. خلیفه و همکاران با استفاده از نرم افزار MATLAB، مدل های دینامیکی برای سیستم های MED توسعه دادند. آن ها تأثیر تغییرات بار حرارتی و دبی آب دریا بر عملکرد سیستم را بررسی کردند و راهکارهایی برای بهبود پایداری سیستم ارائه دادند [۵]. سید و همکاران سیستم های هیبریدی MED-TVC (Thermal Vapor Compression) را مدل سازی کردند. آن ها نشان دادند که ترکیب MED با سیستم های فشرده سازی بخار (TVC) باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش بازدهی سیستم می شود [۶]. شارونوف و همکاران با استفاده از مدل های ترمودینامیکی، بهینه سازی سیستم های MED-TVC را انجام دادند. آنها تأثیر پارامترهای طراحی مانند نسبت بازیابی انرژی و تعداد اثرها را بر عملکرد سیستم بررسی نمودند [۷]. وانگ و همکاران مدل های ریاضی برای سیستم های MED در صنایع پتروشیمی توسعه دادند. آنها نشان دادند که استفاده از بخار ضایعاتی (Waste Steam) در این صنایع می تواند هزینه های عملیاتی را به طور قابل توجهی کاهش دهد [۸]. ژانگ و همکاران با استفاده از مدل های شبیه سازی دینامیکی، عملکرد سیستم های MED در صنایع غذایی را بررسی کردند. آنها تأثیر تغییرات کیفیت آب ورودی و دما بر بازدهی سیستم را تحلیل نمودند [۹]. عبدی خانقاه و همکاران با استفاده از مدل سازی ریاضی، طراحی و بهینه سازی آب شیرین کن MED-TVC برای نصب در خلیج فارس را انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد افزایش فشار بخار محرک باعث کاهش GOR می شود، با این وجود، افزایش دمای خوراک آب و نرخ جریان بخار محرک باعث افزایش GOR سیستم می شود [۱۰]. قربانی و همکاران تحلیل پارامتریک و بهینه سازی چند هدفه یک سیستم نمک زدایی با سه مرحله همراه با اجکتور بخار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که افزایش دمای بخار ورودی باعث افزایش تولید آب شیرین و بازده انرژی سیستم می شود [۱۲]. ژانگ و همکاران پیشرفت های اخیر در فناوری های نمک زدایی آب دریا در چین پرداختند که شامل توسعه سیستم های مدولار

مقایسه با داده های مرجع معتبر، و شبیه سازی در محیط نرم افزار متلب، صحت نتایج آن را برای کاربردهای صنعتی تضمین می کند.

۲- معرفی مسئله

در شکل ۱ طرح سیستم آب شیرین کن نوع حرارتی تقطیری برای یک اثر (مرحله) با جریان های ورودی و خروجی آن نشان داده شده است. مطابق شکل اجزای اصلی این نوع آب شیرین کن تبخیر کننده و کندانسور می باشند. تبخیر کننده با استفاده از یک منبع حرارتی خارجی (مانند بخار یا مایع داغ)، انرژی را به آب دریا منتقل می کند. در این فرآیند، آب دریا بر روی دسته لوله های داغ پاشیده شده و لایه نازکی تشکیل می دهد. این کار باعث گرم شدن و تبخیر بخشی از آب دریا می شود. بخار تولید شده به سمت کندانسور هدایت می شود تا با انتقال گرمای نهان خود به آب سرد دیگری که در لوله های کندانسور جریان دارد، به مایع تبدیل شود در نهایت، دو محصول شامل میعانات (آب شیرین) و پساب غلیظ شده (آب شور باقیمانده) حاصل می گردد. مطابق شکل ۱ المان مهم به نام دمپر از ورود قطرات آب شور به همراه بخار به کندانسور جلوگیری می کند، این کار مانع تماس نمک ها با لوله های کندانسور شده و از مشکلاتی مانند خوردگی و رسوب گذاری که بازده انتقال حرارت را کاهش می دهند، پیشگیری می کند. در این سیستم، آب شور باقیمانده (پساب) معمولاً به دریا بازگردانده می شود. بخار آب تولید شده در هر مرحله، با دمایی پایین تر از مرحله قبل، به عنوان منبع حرارتی برای مرحله بعدی استفاده می شود. بخاری که در داخل لوله های مراحل دوم به بعد میعان می کند، محصول نهایی یعنی آب شیرین را تشکیل می دهد. در نهایت، بخار آخرین مرحله در کندانسور پایانی توسط آب دریا سرد شده و به مایع تبدیل می شود که این عمل، آب ورودی را نیز کمی پیش گرم می کند. بهینه سازی انرژی در این سیستم از طریق حرکت همزمان میعانات (آب شیرین) و پساب (آب شور غلیظ شده) به سمت مراحل بعدی انجام می پذیرد. از آنجایی که دمای این جریان ها از دمای اشباع مرحله بعدی بالاتر است، با ورود به مرحله بعد، بخشی از آن ها به طور خودبه خود تبخیر شده و بخار بیشتری تولید می کند. همچنین مشخصات مفروض سیستم مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است که در آن تعداد اثرها (N)، شوری آب دریا (X_f)، دمای آب دریا (T_{cw})، دمای آب تغذیه (T_f)، دبی آب تغذیه (M_f)، فشار جریان بخار محرک (P_m)، دبی جریان بخار محرک (M_m) می باشند.

MED و استفاده از حرارت زائد نیروگاه های صنعتی است. همچنین، کاربرد هوش مصنوعی برای بهینه سازی عملکرد هیبریدی RO-MED در مقیاس بزرگ را مورد توجه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد این فناوری ها نقش مهمی در تأمین پایدار آب صنعتی و شهری ایفا می کنند [۱۳].

صیادی و صفری نیز مدلی از آب شیرین کن (MED-TVC) را توسعه داده و با استفاده از تحلیل ترمودینامیک آن را بهینه کردند مدل توسعه یافته مربوط به یکی از آب شیرین کن های جزیره کیش بوده است که جهت انجام مطالعه آن ها انتخاب شده بود [۱۴ و ۱۵]. ضامن و همکاران به مدل سازی ترمودینامیکی و تحلیل انرژی سیستم (MED) متصل به نیروگاه بخار پرداخته است. با بازیافت حرارت از جریان های پساب (کندانسور)، دمای بهینه بخار محرک را تعیین نمودند که منجر به افزایش بازده نرخ تولید (GOR) تا مقدار قابل توجهی و کاهش ۱۸ درصدی هزینه آب تولیدی گردید [۱۶]. السعید و الابی استفاده از هیدروژن سبز به عنوان منبع انرژی برای سیستم های (MED) را بررسی کرده نموده اند. نتایج آن ها نشان می دهد که این روش می تواند انتشار کربن را تا ۹۰ درصد کاهش دهد، اما هزینه تولید آب در حال حاضر ۱/۲ دلار بر مترمکعب است که نسبت به سیستم های متعارف بالاتر است. با این حال، با کاهش قیمت هیدروژن سبز در آینده، این فناوری می تواند به گزینه ای پایدار تبدیل شود [۱۷]. مدل سازی نقش مهمی در طراحی، بهینه سازی و کنترل سیستم های آب شیرین کن حرارتی نوع MED ایفا می کند [۱۰]. مدل سازی ریاضی آب شیرین کن حرارتی MED کمک می کند تا تأثیر عوامل مهمی مانند تعداد مراحل، دمای بخار ورودی و فاکتور غلظت بر راندمان و نسبت بهره وری سیستم به طور دقیق ارزیابی شود و در نتیجه طراحی سیستم های کارآمدتر با مصرف انرژی کمتر امکان پذیر گردد [۱۱]. با توجه به اهمیت موضوع و بهره برداری از این نوع آب شیرین کن های حرارتی برای مصارف صنعتی مختلف، در کار حاضر به مدل سازی ریاضی یک سیستم آب شیرین کن تقطیر چند اثره و بهینه آن جهت بهره برداری در صنایع گوناگون معرفی می گردد. پژوهش حاضر با ارائه مدل ریاضی جامعی برای شبیه سازی این سیستم ها، گامی مهم در بهبود دقت و قابلیت اعتماد فناوری برداشته است. نوآوری محوری این کار در ترکیب دقیق معادلات حاکم با محاسبات جبری پیشرفته منجر به پیش بینی عملکردی به مراتب دقیق تر نسبت به مدل های پیشین شده است. اعتبار سنجی قوی مدل از طریق محاسبات جبری،

شده در صورتی که انرژی مصرفی را از انرژی دورریز سیستمی دیگر دریافت نماید یا اینکه مدل همراه با دیگ بخار طراحی شود و دیگ بخار جزئی از سیستم تحلیل انرژی گردد. برای این منظور ابتدا فرضیات حاکم بر مسئله و سپس معادلات حاکم بر سیستم نوشته می‌شود:

- آب تغذیه با دبی یکسان وارد هر تأثیر می‌شود.
- در هر مرحله از افت حرارتی سیستم صرف‌نظر می‌شود.
- بخارهایی که در هر مرحله تولید می‌شوند بدون نمک هستند.
- از افت دما ناشی از اصطکاک در لوله‌های رابط و اصطکاک در کندانسور صرف‌نظر شده است.
- از بالا رفتن نقطه جوش صرفه نظر می‌شود.
- سیستم به صورت پایدار است.
- سطح اثرها برای یک دستگاه مساوی است.
- اختلاف دمای هر دو مرحله مجاور یکسان و برابر ΔT در نظر گرفته می‌شود. ΔT برابر است با اختلاف دمای بخار ورودی به اولین مرحله منهای دمای خوراک ورودی تقسیم بر تعداد مراحل منهای یک.

از آنجاکه جهت گرمایش بیشتر آب دریا در هر مرحله به‌منظور سهولت در تبخیر، پساب شور مراحل قبلی وارد مراحل بعدی می‌شود و مرحله اول دارای چنین ورودی نیست پس موازنه‌های جرم و انرژی مرحله اول به‌صورت جداگانه نسبت به بقیه مراحل نوشته خواهد شد. پارامترهای ورودی به مسئله عبارت‌اند از:

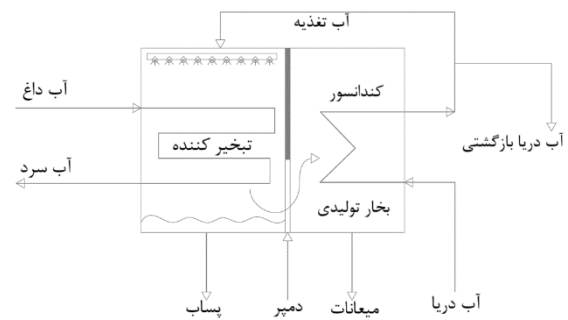
تعداد اثرها (N)، شوری آب دریا (X_f)، دمای آب دریا (T_{cw})، دمای آب تغذیه (T_f)، دبی آب تغذیه (M_f)، فشار جریان بخار محرک (P_m)، دبی جریان بخار محرک (M_m) غلظت نمک موجود در پساب تولیدی در هر مرحله برابر با مقدار غلظت مجاز نمک برای تخلیه در آب دریا (42000 ppm) است.

۴- معادلات حاکم

باتوجه به اختلاف دما یکسان بین هر دو تأثیر، این مقدار به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_n}{N - 1} \quad (1)$$

دمای هر تأثیر که هم دما با دمای آب دورریز در آن است، به‌اندازه ΔT از تأثیر قبل کمتر است؛ بنابراین اگر فرض شود، دما در تأثیر i ام، T_i است، دما در تأثیر $i+1$ ام از رابطه زیر محاسبه می‌شود:



شکل ۱: شماتیک مساله حاضر برای یک اثر (مرحله)

جدول ۱: مشخصات سیستم MED مساله حاضر

پارامتر	مقدار مفروض
N	۴-۱۲
T_s	100°C
M_d	1 kg/s
X_f	42000 ppm
T_{loss}	2°C
T_{cw}	25°C

۳- مدل ریاضی

مدل سازی ریاضی شامل توسعه معادلات حاکم بر اساس جرم، انرژی و اصول ترمودینامیکی برای توصیف رفتار سیستم MED است [۱۰]. یکی از فاکتورهایی که توسط آن می‌توان عملکرد و بازده حرارتی مراحل شیرین سازی آب دریا را ارزیابی نمود، نسبت بهره وری (PR) است. این فاکتور برای یک تبخیرکننده چند مرحله‌ای از نوع MED، به صورت نسبت مقدار آب شیرین تولید شده به مقدار بخار ورودی به اولین مرحله، تعریف می‌شود [۱۹]. برای تعیین این نسبت، نیاز به مدل سازی ریاضی تبخیرکننده MED می‌باشد. مدل ریاضی حاضر از معادلات بقاء جرم، بقاء انرژی و معادلات انتقال حرارت همچنین شامل معادلاتی برای ضرایب انتقال حرارت و خواص فیزیکی آب استفاده شده است به منظور مدل سازی سیستم، معادلات بقای جرم و انرژی برای هر یک از مراحل، کل سیستم و همچنین کندانسور نوشته شده است و سپس با توجه به بعضی از معلومات و ثوابت، معادلات حاکم حل خواهد شد و نحوه تغییرات فاکتورهای مختلف مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت سپس روابطی برای محاسبه انرژی مصرفی و معیار کارایی سیستم ارائه می‌گردد. سیال مورد بررسی در سیستم از دو جزء آب خالص و نمک تشکیل شده است؛ بنابراین روابطی برای تحلیل انرژی سیستم در دو قسمت ترمو مکانیکی و شیمیایی ارائه می‌گردد. مدل به دو صورت ارائه می‌شود؛ مدل طراحی

$$D_1 = \frac{(M_m + M_{ev}) \cdot \lambda_s - F_1 \cdot C_p \cdot (T_1 - T_f)}{\lambda_1} \quad (9)$$

که در آن به ترتیب M دبی جریان بخار محرک، M_{iv} دبی جریان بخار اشباع مکش شده از آخرین تأثیر به اجکتور، λ_s گرمای m نهان تبخیر در دمای و (λ) گرمای نهان تبخیر در دمای T_1 است. اولین عبارت در صورت کسر، گرمای مورد نیاز از جانب اجکتور برای تبخیر کسری از آب تزریق ده به اولین تأثیر است در تأثیر دوم نیز با نوشتن معادله بقا انرژی می توان جرم بخار تولید شده را محاسبه نمود:

$$D_2 = \frac{D_1 \cdot \lambda_1 - F_2 \cdot C_p \cdot (T_2 - T_f) + B_1 \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)}{\lambda_2} \quad (10)$$

برای تأثیر بعدی تا آخرین آن به صورت زیر است:

$$D_i = \frac{(D_{i-1} \cdot \lambda_{i-1} + d_{i-1} \cdot \lambda_{i-1} + d'_{i-1} \cdot \lambda'_{i-1}) + F \cdot C_p (T_i - T_f) + i \cdot p \cdot (i - f)}{\lambda_i} + \frac{B_{i-1} \cdot C_p \cdot (T_{i-1} - T_i)}{\lambda_i} \quad (11)$$

$$i = 2, \dots, N$$

در روابط بالا مقادیر D_1 و D_i به ترتیب، دبی بخار آب اشباع در اثر تبخیر ناگهانی در جریان آب دور ریز و آب تقطیر شده در هر مرحله می باشد (از تأثیر دوم بعد) که روابط آن به صورت رابطه ۱۲ و ۱۳ است [۲۰]:

$$d_i = \frac{B_{i-1} \cdot C_p \cdot (T_{i-1} - T'_i)}{\lambda'_i} \quad (12)$$

$$i = 2, \dots, N$$

$$d'_i = D_i \cdot C_p \cdot \left(\frac{T_{Ci-1} - T_i}{\lambda'_i} \right) \quad (13)$$

$$i = 2, \dots, N$$

در رابطه (۱۳) دمای آب دور ریز در تأثیر i ام است که وقتی از تأثیر وارد تأثیر i ام می شود λ'_i گرمای نهان تبخیر در دمای T'_i است که کافی است در رابطه (۹) قرار گیرد [۲۳].

$$T'_i = T_i + NEA_i \quad (14)$$

حد مجاز غیر تعادلی یک پارامتر برای اندازه گیری بازه فرایند تبخیر ناگهانی است NEA داریم [۲۴]:

$$T_i = T_{i+1} + \Delta T \quad (2)$$

دمای بخار تولید شده در تأثیر i ام، T_{vi} است که این مقدار به اندازه افزایش نقطه جوش (BPE)، از دمای اشباع برای آب شور کمتر است. در این مدل، BPE تابعی از دما و شوری آب تغذیه در هر تأثیر است که رابطه های آن به صورت زیر محاسبه می شود [۸]:

$$BPE = A \cdot X + B X^2 + C \cdot X^3$$

$$A = 80325 \cdot 10^{-2} + 1.883 \cdot 10^{-4} \cdot T + 4.02 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (3)$$

$$B = -7.625 \cdot 10^{-4} + 9.02 \cdot 10^{-5} \cdot T - 5.2 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$$

$$T_{vi} = T_i - BPE \quad (4)$$

با در نظر گرفتن قطره گیر در هر تأثیر، آب تغذیه بعد از تبخیر از آن عبور می کند که موجب افت فشار و به تبع آن، دچار افت دما می شود. آب بعد از این مرحله وارد تأثیر بعد می شود [۲۳].

$$T_{evi} = T_{vi} - \Delta T_p \quad (5)$$

دبی آب تغذیه از دریا (M_f) به طور مساوی با F_i دبی بین تمامی تأثیرها تقسیم می شود.

$$F_i = \frac{M_f}{N} \quad (6)$$

آب دور ریز بعد از خروج از تأثیر i ام، وارد تأثیر $i+1$ می شود تا اینکه به تأثیر N ام رسیده و از آن خارج می شود. مقدار دبی آب دور ریز از اولین تأثیر تا آخرین تأثیر آن، در روابط زیر آمده است:

$$B_1 = F_1 - D_1$$

$$B_{i+1} = \sum_{i=1}^{i+1} F_i - D_i \quad (7)$$

$$(i = 1, \dots, N - 1)$$

برای نوشتن معادلات بقای انرژی به محاسبه گرمای نهان نیاز است. گرمای نهان با استفاده از روابط تجربی تابع دما محاسبه می شود [۲۱]:

$$\lambda = 2501.9 - 2.407 \cdot T + 0.00119 \cdot T^2 - 1.5863 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (8)$$

با نوشتن معادلات بقای انرژی در اولین تأثیر و مرتب کردن آن، می توان بخار تولید شده به واسطه جوشش را به دست آورد:

۵- روش حل، بحث و نتایج

جهت حصول اطمینان کافی از صحت برنامه نوشته شده، مقایسه‌ای با مدل‌سازی انجام شده توسط مرجع [۲] انجام شد. جدول ۲ مقایسه داده‌های استخراجی از محاسبات جبری مساله حاضر با داده‌های مرجع را نشان می‌دهد. همچنین دمای آب خروجی از کندانسور اول و با طرحی که در کار حاضر روی فرآیند اعمال شد دمای نهایی این آب قبل از ورود به مراحل با توجه به دبی و دماهای دو جریان آب و بخارهای پرت افزایش می‌یابد پس از استخراج معادلات حاکم بر MED، به منظور اعتبارسنجی محاسبات تغییرات دما و بررسی صحت کد معادلات ذکر شده در مرجع معتبر [۲] در محاسبات MED مورد قبول است، استفاده می‌گردد. از سویی قابل توجه است که بخار ورودی در این مسئله به صورت فشرده‌شده با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دبی خروجی آب شیرین‌کن نیز برابر با ۱ kg/s می‌باشد.

جدول ۲: مقایسه داده‌های استخراجی از محاسبات جبری مساله حاضر با داده‌های مرجع [۲]

No	1	2	3	4	5	6
T (°C) مطالعه حاضر	91.2370	82.0133	72.3040	62.0829	51.3245	39.9989
T (°C) مرجع [۲]	91.2372	82.0132	72.3037	62.0831	51.3247	40

بهره‌وری بیشتری می‌شود، اما از سوی دیگر هزینه تعمیر و نگهداری مجموعه یک چالش جدی است. علت آن است که با توجه به معادله (۱)، در اثر افزایش تعداد مراحل، اختلاف دمای بین مراحل کاهش و دمای مراحل افزایش می‌یابد. نتیجه این تغییرات، کاهش مقدار بخار مصرفی و در نهایت افزایش نسبت بهره‌وری است. مقدار دمای بخار ورودی به اولین مرحله باید بتواند آب دریای پاشیده شده بر روی دسته لوله‌ها را تبخیر کند. از طرفی برای تأمین این بخار از بویلرهای موجود در محل (صنایع مورد نظر) استفاده می‌شود.

$$NEA_i = \frac{0.33 \cdot (T_{i-1} - T_i)}{T_{vi}} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) دمای آب تقطیر وارد محفظه تبخیر ناگهانی آن می‌شود و به‌صورت رابطه ۱۶ قابل محاسبه است:

$$T'_i = T_{vi} + NEA_i \quad (16)$$

مقدار شوری آب خروجی از هر تأثیر اول و تأثیرهای دوم. تا آخرین آن، به‌صورت زیر است:

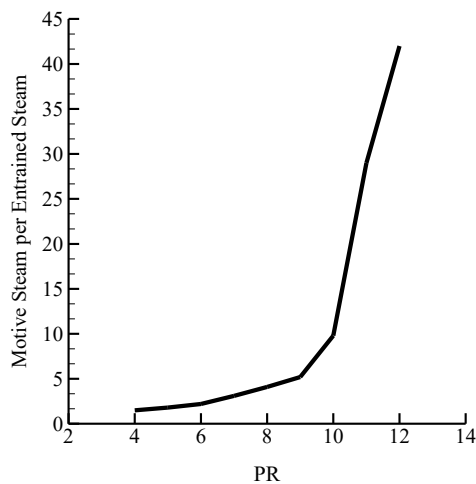
$$X_{b1} = \frac{F_1}{B_1} \cdot X_f \quad (17)$$

در نهایت مقدار آب شیرین تولیدشده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_d = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{i=2}^n d_i \quad (18)$$

لذا در مساله حاضر به کمک نرم افزار متلب به عنوان محیطی برای حل مدل ریاضی ویژگی‌های توصیفی آب‌شیرین‌کن MED مدل سازی و طراحی می‌گردد. به منظور تحلیل عملکرد یک آب‌شیرین‌کن MED، اثر متغیرهای فرایندی مختلف بر روی نسبت بهره‌وری موردبررسی قرارگرفت. یکی از پارامترهای مؤثر بر نسبت بهره‌وری سیستم، تعداد مراحل آب‌شیرین‌کن است. حداقل تعداد مراحل آب‌شیرین‌کن با توجه به ظرفیت، ملاحظات اقتصادی، ساخت و طراحی سیستم تعیین می‌گردد. شکل ۲ نحوه تغییرات نسبت بهره‌وری را با تعداد مراحل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نسبت بهره‌وری با افزایش تعداد مراحل سیستم آب‌شیرین‌کن در هر دمای تغذیه دلخواهی ثابت به صورت خطی افزایش می‌یابد. علت آن این است که در اثر افزایش تعداد مراحل، اختلاف دمای بین مراحل کاهش و دمای مراحل افزایش می‌یابد. نتیجه این تغییرات، کاهش مقدار بخار مصرفی و در نهایت افزایش نسبت بهره‌وری است [۲۳]. از بررسی تأثیر تعداد اثر در یک مجموعه MED می‌توان مشاهده نمود که هر چه تعداد اثر بیشتر شود مقدار نسبت بهره‌وری نیز افزایش می‌یابد. هر چند که افزایش تعداد محفظه‌های یک مجموعه MED موجب

افزایش تعداد مراحل بصورت نمایی رشد می کند از طرفی یکی از پارامترهای مهم طراحی ترموکمپرسور، نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده است که مقدار بهینه آن حدود ۱/۵-۱ می باشد [۱۹ و ۲۰]. جدول ۴ نشان دهنده مقادیر تغییرات PR بر حسب فاکتور غلظت (نسبت غلظت پساب به غلظت آب دریا) است. فاکتور غلظت، نسبت مستقیمی با مقدار خوراک ورودی و مقدار محصول دارد [۱۱]. اگر مقدار خوراک، ثابت در نظر گرفته شود، طبق معادله با افزایش فاکتور غلظت (یا کاهش غلظت آب دریا)، مقدار بخار تولیدی هر مرحله افزایش می یابد. با توجه به تعریف نسبت بهره وری، این افزایش سبب بالا رفتن مقدار PR می شود.

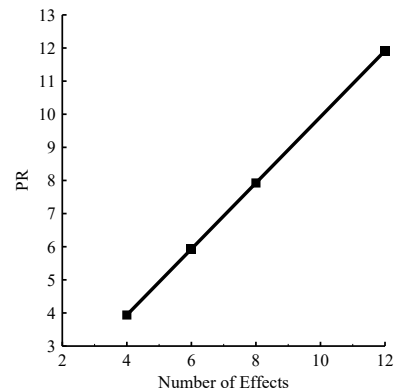


شکل ۳: اثر تعداد مراحل بر نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده

جدول ۴: اثر پارامتر غلظت Xb/Xf بر روی نسبت بهره وری برای یک حالت از تعداد تأثیر ثابت $N=6$

Xb/Xf	PR
1.2	4.6
1.4	4.9
1.5	5.1
1.8	5.2
2	5.3
3	5.4

بنابراین، با بررسی نتایج ارائه شده نشان داده شد که سیستم های آب شیرین کن تقطیر چنداثره با قابلیت تولید آب شیرین با بازدهی بالا (نسبت عملکرد ۱۰-۱۲) و مصرف انرژی بهینه، نقش حیاتی در صناعی مانند نیروگاهی، پتروشیمی و کشتی سازی می توانند ایفا کنند. این سیستم ها با بهره گیری از بخار کم دما تر یا گرمای اتلافی صنعتی، هزینه های عملیاتی را کاهش داده و امکان شیرین سازی آب دریا با شوری بسیار بالا را فراهم می سازند، در حالی که سایر روش های حرارتی در چنین شرایطی کارایی کمتری دارند. کنترل دمای آب تغذیه در



شکل ۴: اثر تعداد مراحل بر روی نسبت بهره وری برای سیستم آب شیرین کن حاضر در یک دمای تغذیه ثابت

برای بررسی اثر تغییرات دمای بخار ورودی به اولین مرحله، در تعداد مراحل مختلف، نسبت بهره وری بر حسب این پارامتر در مقادیر آن در جدول ۳ ارائه گردید است. با افزایش دمای بخار ورودی به اولین مرحله، اختلاف دمای بین مراحل افزایش می یابد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دمای تغذیه در تعداد تأثیر بیشتر منجر به افزایش نسبت بهره وری شده است. با افزایش دمای هر محفظه نسبت به اثر قبلی می گردد بطوری که اختلاف دمای بین دو محفظه را جبران می کند و از طرفی افزایش دمای محفظه سبب تقویت نسبت بهره وری مجموعه MED می شود. بهترین نسبت عملکرد در مجموعه ۱۲ محفظه ای با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مقدار ۱۲/۰۴۹ می باشد. بر اساس تحلیل تغییرات PR در جدول ۳ و با در نظر گرفتن دمای تغذیه ۸۰ درجه سانتی گراد، هر مرحله از فرآیند، باعث افزایش بهره وری به میزان تقریبی ۱۵ درصد می شود. این برآورد بر پایه روند تغییرات خطی و میانگین گیری است که در شکل ۲ نشان داده شده است. این نتیجه کاملاً با اصل کاهش انرژی ویژه، که در مطالعات پایه مرجع معتبر [۲] هم مورد تأیید قرار گرفته است، هماهنگ است.

جدول ۳: مقادیر تغییرات دمای تغذیه بر روی نسبت بهره وری در تعداد مراحل مختلف

PR	Ts			
	80	90	100	110
N=4	3.912	3.940	3.968	3.995
N=6	5.892	5.931	5.969	6.006
N=8	7.875	7.925	7.973	8.019
N=12	11.850	11.918	11.985	12.049

شکل ۳ اثر تعداد مراحل بر نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده را نشان می دهد. نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده بسیار متأثر از تعداد مراحل می باشد بدین معنا که مقدار این پارامتر با

Vol. 126, No. 1-3, pp. 45-59, 1999. doi: [10.1016/S0011-9164\(99\)00154-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00154-X)

[2] H. El-Dessouky and H. Ettouney, "Fundamentals of Salt Water Desalination," Elsevier, 2002.

[3] F. Al-Juwayhel, H. El-Dessouky, and H. Ettouney, "Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps," *Desalination*, Vol. 114, No. 3, pp. 253-275, 1997.

[4] F. N. Alasfour, M. A. Darwish, and A. O. Bin Amer, "Thermal analysis of ME-TVC + MEE desalination systems," *Desalination*, Vol. 174, No. 1, pp. 39-61, 2005. doi: [10.1016/j.desal.2004.08.039](https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.039)

[5] A. E. Khalifa, H. Alawadhi, and M. Ahmad, "Dynamic modeling of multi-effect desalination plants," *Desalination*, Vol. 250, No. 3, pp. 928-935, 2010.

[6] M. A. Sayed, H. T. El-Dessouky, and H. M. Ettouney, "Thermodynamic analysis of a hybrid MED-TVC desalination system," *Desalination*, Vol. 365, pp. 55-71, 2015.

[7] A. Sharonov et al., "Optimization of MED-TVC desalination systems using thermodynamic models," *Desalination*, Vol. 435, pp. 45-58, 2018.

[8] Y. Wang et al., "Modeling and optimization of MED systems for petrochemical industries," *Desalination*, Vol. 456, pp. 78-90, 2019.

[9] L. Zhang et al., "Dynamic modeling of MED systems for food industry applications," *Desalination*, Vol. 500, pp. 114-125, 2021.

[10] M. Abdi-Khanghah, B. Bazooyar, M. Gonbadi, and K. C.-W. Wu, "Design and optimization of MED-TVC desalination plant using mathematical modeling coupled with response surface methodology," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, Vol. 153, p. 105187, 2023.

[11] M. Arjmandi and M. Pakizeh, "Design and mathematical modeling of a multi-effect desalination system with applicability in steam power plants and similar industries (MED)," *Farayand-e No (Process No)*, Vol. 8, No. 41, pp. 36-49, 2013 (in Persian).

محدوده ۷۰-۸۰ درجه سانتیگراد و ادغام فناوری‌هایی مانند ترموکمپرسور و پیش‌تصفیه آب، نه تنها از رسوب‌گذاری جلوگیری می‌کند، بلکه پایداری فرایند را در طولانی‌مدت تضمین می‌نماید. این ویژگی‌ها MED را به گزینه‌ای کلیدی در مناطق خشک با محدودیت منابع آب و انرژی تبدیل کرده و همسو با اهداف توسعه پایدار، به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و مدیریت منابع کمک بسیار زیادی می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری کلی

اثر متغیرهای فرایندی مختلف مانند تعداد مراحل، دمای بخار ورودی به مرحله اول و فاکتور غلظت بر روی پارامتر مهم مانند نسبت بهره‌وری آب شیرین کن MED، مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی نشان داد که تغییرات نسبت بهره‌وری ارتباط مستقیمی با تغییر تعداد مراحل دارد. با افزودن یک مرحله به تعداد مراحل نسبت بهره‌وری حدود ۱۵٪ افزایش می‌یابد. اما افزایش تعداد مراحل، سبب رشد نمایی نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده، می‌شود و طراحی و ساخت ترموکمپرسور را با مشکل مواجه می‌کند همچنین با افزایش فاکتور غلظت، مقدار این نسبت زیاد می‌شود. این نکته نشان می‌دهد که سیستم MED با تعداد مراحل ثابت، در مناطقی با شوری کمتر آب دریا دارای نسبت بهره‌وری بالاتری است. مهم‌ترین نتایج حاصل عبارت‌اند از:

۱. نسبت بهره‌وری با افزایش تعداد مراحل سیستم رابطه مستقیم و خطی دارد.
۲. افزایش یک مرحله به سیستم، موجب افزایش ۱۵٪ در نسبت بهره‌وری می‌شود.
۳. بهترین عملکرد در پیکربندی ۱۲ مرحله‌ای با دمای تغذیه ۸۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد.
۴. آب شیرین کن تقطیر چنداثره ابزاری مهم برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های صنعتی است. تحقیقات نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌های ترمودینامیکی و شبیه‌سازی‌ها می‌تواند بهره‌وری این سیستم‌ها را افزایش دهد. با رشد نیاز به آب شیرین، توسعه مدل‌های دقیق‌تر و هوشمندتر در این حوزه از اهمیت بالایی برخوردار است.

۷- منابع

[1] M. Al-Shammiri and M. Šafář, "Multi-effect distillation plants: state of the art," *Desalination*,

- [18] H. O. A. Hamed, "Thermal assessment of a Multiple Effect Boiling (MEB) desalination system," *Desalination*, Vol. 86, pp. 325-339, 1992.
- [19] N. H. Ali Karameldin and M. M. Shamloul, "Modeling and simulation of steam jet ejectors," *Desalination*, Vol. 123, pp. 1-8, 1999.
- [20] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, and G. Al-Nuwaibit, "Evaluation of steam jet ejectors," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 41, pp. 551-561, 2002.
- [21] I. S. Al-Mutaz and I. Wazeer, "Development of a steady-state mathematical model for MED-TVC desalination plants," *Desalination*, Vol. 351, pp. 9-18, 2014. doi: [10.1016/j.desal.2014.07.018](https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.018)
- [22] M. L. Elsayed, O. Mesalhy, R. H. Mohammed, and L. C. Chow, "Exergy and thermo-economic analysis for MED-TVC desalination systems," *Desalination*, Vol. 447, pp. 29-42, 2018. doi: [10.1016/j.desal.2018.06.008](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.008)
- [23] N. Eshoul, A. Almutairi, R. Lamidi, H. Alhajeri, and A. Alenezi, "Energetic, exergetic, and economic analysis of MED-TVC water desalination plant with and without preheating," *Water*, Vol. 10, No. 3, p. 305, 2018. doi: [10.3390/w10030305](https://doi.org/10.3390/w10030305)
- [24] H. B. Harandi, A. Asadi, M. Rahn timer, Z.-G. Shen, and P.-C. Sui, "Modeling and multi-objective optimization of integrated MED-TVC desalination system and gas power plant for waste heat harvesting," *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 149, p. 107294, 2021.
- [12] S. Ghorbani, M. Deymi-Dashtebayaz, and E. Tayyeban, "Parametric investigation and performance optimization of a MED-TVC desalination system based on 1-D ejector modeling," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 288, p. 117131, 2023.
- [13] Y. Zhang, X. Liu, W. Chen et al., "Advancing Water Security: China's Latest Seawater Desalination Technologies in 2025," *Desalination*, Vol. 560, pp. 115-130, Jan. 2025.
- [14] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Thermoeconomic optimization of multi-effect distillation desalination systems," *Applied Energy*, Vol. 87, No. 4, pp. 1122-1133, 2010. doi: [10.1016/j.apenergy.2009.05.023](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.023)
- [15] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Various approaches in optimization of multi-effects distillation desalination systems using a hybrid meta-heuristic optimization tool," *Desalination*, Vol. 254, pp. 138-148, 2010. doi: [10.1016/j.desal.2009.11.045](https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.045) (in Persian)
- [16] M. Zamen, M. Kahani, J. Yazdanpanahi, R. Abedini, and M. H. Ahmadi, "Modeling of a direct-contact humidification-dehumidification desalination unit in a 256 MW steam power plant using effluent streams: Case study," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 45, p. 102966, 2023.
- [17] K. Elsaid, E. T. Sayed, and A. G. Olabi, "Sustainable multi-effect distillation powered by green hydrogen: A techno-economic feasibility study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 189, p. 114789, 2025.



Geometrical Optimization of a Railway Rail Using Modal Analysis to Improve Vibrational and Stress Responses

Mohammad Javad Khoshgoftar^{*1} , Mohammad Sahraei²

1. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

2. M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

Abstract

The passage of trains over railway rails induces significant vibrations in the rail structure—a phenomenon that has gained increasing importance with the development of high-speed rail systems. Severe vibrations can lead to increased fatigue stresses, reduced rail lifespan, and potential structural instability. One effective approach to mitigating these issues is to increase the gap between the natural frequency of the rail and the excitation frequency, thereby preventing resonance. In this study, the geometric dimensions of the railway rail are optimized with the aim of enhancing vibrational performance and reducing fatigue-induced stresses. To achieve this, a combined methodology involving Response Surface Methodology (RSM) and Genetic Algorithm (GA) is employed. A numerical model of the rail is developed and simulated using ANSYS software. The analyses focus on extracting natural frequencies and evaluating stress responses under torsional, bending, and combined vibration modes. The results indicate that increasing the excitation speed leads to a reduction in the optimal width of the rail's bottom flange for similar vibration modes. Additionally, increasing the width of the rail head from 40 to 80mm significantly reduces local stresses. These findings provide a practical basis for intelligent and resilient design of railway rails under dynamic loading conditions.

Keywords

Railway rail

Geometrical optimization

Genetic algorithm

Response surface methodology

Modal analysis

Received: 17.07.2025

Revised: 07.08.2025

Accepted: 10.09.2025

***Corresponding Author**

Mohammad Javad Khoshgoftar

Email

m-khoshgoftar@araku.ac.ir

1- Introduction

Increasing highway congestion worldwide has made railways a leading mode of mass, clean, and efficient transportation, fueling demand for faster, more reliable trains. This has driven rail engineers to develop advanced high-speed systems, where track design—particularly rail geometry and vibrational modes (torsional, bending, combined)—directly governs structural strength and dynamic performance. Optimal design thus depends on precise tuning of these parameters.

A typical track consists of concrete sleepers supporting two parallel steel rails via pads, over ballast and sub-ballast layers. Rails bear and

distribute train loads while guiding wheels to supports. Forces transmit through wheel-rail contact to fastenings and substructure, forming resilient panels that resist bending, shear, motion-induced vibrations, and thermal expansion [1].

Extensive prior work includes Zhiping et al. (2019) [2], who tested full-scale low-vibration tracks and demonstrated reduced acceleration, faster decay, and significant ground vibration attenuation; Wei et al. (2017) [3], revealing non-uniform contact forces causing wear; Germonpré et al. (2018) [4], showing track irregularity outweighs stiffness variation in vibration generation; and Ji Jin et al. (2020) [5],

How to Cite this Article:

[1] M. J. Khoshgoftar and M. Sahraei, "Geometrical optimization of a railway rail using modal analysis to improve vibrational and stress responses," Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 99–111, 2026. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535239.1146>. (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

validating tuned impact dampers for broadband rail vibration and noise control.

Geometric optimization via modal analysis is essential for minimizing contact stresses and enhancing durability. Methods include B-spline joint parameterization, genetic algorithms with finite elements to reduce stress concentrations (e.g., at insulated joints), wheel-rail excitation for natural frequency detection, and robust optimization under wear and misalignment—despite persistent challenges from real-world variability.

Resonance poses a critical risk; design must maximize separation between excitation and natural frequencies to prevent catastrophic amplification.

This research investigates the influence of geometric dimensions on rail vibro-stress response under cyclic fatigue loading in domestic rail systems. Using ANSYS finite element modeling integrated with genetic algorithms and response surface methodology, optimal profiles are derived to improve dynamic stability, reduce fatigue stresses, and extend service life.

2- Modeling

Rail design prioritizes material selection for high strength-to-weight ratio to optimize structure and dynamics under severe loads. AISI 1084 stainless steel was chosen for its high manganese content, enabling deep heat treatment that enhances tensile strength, hardness, and fatigue life by reducing surface crack propagation. Chemical, physical, and mechanical properties were input into simulations.

3D geometry was modeled in SolidWorks and imported to ANSYS (Figure 1). Analysis proceeds through applying torsional ($0-5^\circ$) and bending ($0-5\text{mm}$) preloads separately and combined, followed by modal analysis to extract natural frequencies, and finally transient vibrational analysis under cyclic loading. Meshing used 32,000 quadratic hexahedral elements via multi-zone method for accuracy and efficiency. Boundary conditions include fixed supports at 60cm intervals (sleeper locations), symmetric constraints, and a fully fixed base assumption for reference consistency.

Optimization variables are upper length a_f and lower length b_f , selected for their strong influence on vibrational behavior. The bi-objective function maximizes $|\omega_n - \omega_e|$ to avoid resonance while minimizing stress σ . Genetic algorithm with RSM converged after 54 (torsional), 20 (bending), and 78 (combined) generations, with no fitness change in 10 consecutive generations as the stopping criterion. Fluctuations after generation 30 remained within 5–15% engineering error. Equal weighting was applied (Figure 2).

Parametric modal analysis in ANSYS varied support stiffness via sleeper velocity to capture real dynamics. Elastic and shear moduli were derived from the global stiffness matrix. Larger rails ($80 \times 140\text{ mm}$) exhibited lower modulus at 200 mm/min—favorable for torsional and bending modes—but axial failure strain dropped from 3.2% to 1.9%, necessitating trade-off consideration in optimization.

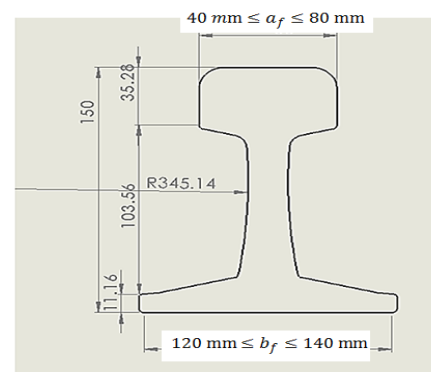


Figure 1: Geometric variables (a_{fa_faf} , b_{fb_fbf})

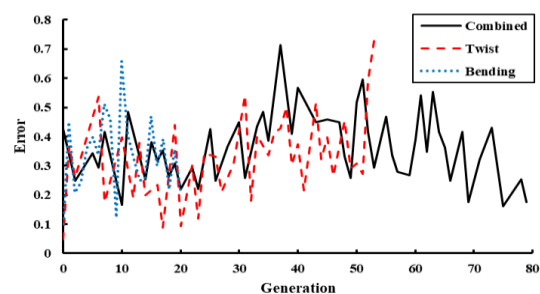


Figure 2: Genetic algorithm convergence trend

3- Results

The genetic algorithm optimization identified optimal rail dimensions of $a_f=80\text{mm}$ and

$b_f=140\text{mm}$, yielding the best vibrational and stress performance. Table 1 lists optimized objective functions—strain-free elastic modulus (E_{NC}), shear modulus (G_{NC}), bending failure strain (FSA), and torsional failure strain (FSF)—at various excitation velocities.

Parametric analysis shows all objectives degrade gradually with increasing excitation velocity. At lower speeds (especially 100mm/min), E_{NC} and G_{NC} reach peak values, alongside maximum failure strains: $\text{FSA} = 3.5\%$ and $\text{FSF} = 4.7\%$. This reflects superior mechanical behavior in low-frequency ranges.

As velocity increases to 300mm/min , both moduli drop significantly, indicating reduced resistance to cyclic dynamic loads. Failure strains also decline, suggesting elevated fatigue and localized cracking risk under higher frequencies. Responses converge at 250 and 300mm/min , signaling vibrational stabilization at high speeds—a key indicator for long-term fatigue assessment in high-traffic lines.

Overall, larger dimensions within the defined range improve vibrational response and reduce induced stresses, whereas higher excitation velocities degrade mechanical performance and increase structural failure risk. Achieving balance between optimal geometry and dynamic operating conditions is essential for safe rail operation.

Table 1: Optimized objective functions for rail dimensions $80 \times 140\text{mm}$

Excitation Velocity (mm/min)	E_{NC}	G_{NC}	FSA (%)	FSF (%)
100	3.5	4.7	3.5	4.7
150	3.4	4.4	1.9	2.3
200	3.1	4.2	1.8	2.1
250	3.8	3.8	2.2	2.0
300	3.8	3.8	2.0	1.9

Response Surface Methodology (RSM) was employed to model relationships between design variables (a_f , b_f) and objectives. Figure 3 and Figure 4 present 3D response surfaces for frequency difference $\Delta\omega$ and critical stress σ , providing

quantitative and qualitative insight into parameter effects on structural behavior.

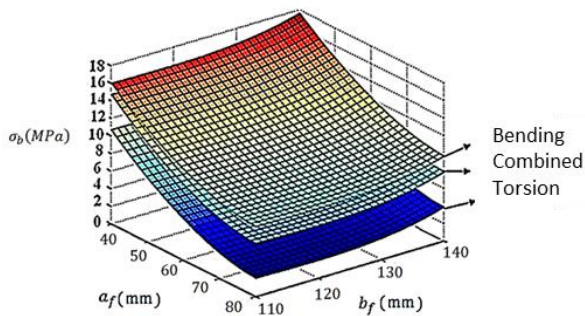
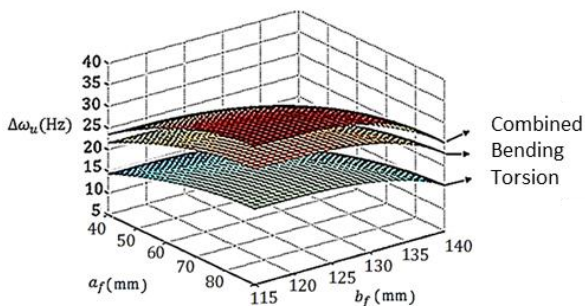
Numerical results reveal higher stresses under bending than torsional excitation, but combined loading maximizes $\Delta\omega$, enhancing resonance resistance—a significant mechanical advantage. Increasing upper rail width from 40 to 80mm substantially reduces critical stress due to enhanced bending stiffness and moment of inertia. Lower width variation has minimal stress impact but gradually increases $\Delta\omega$, prioritizing vibrational safety.

RSM surfaces demonstrate smoothness and continuity, crucial for successful metaheuristic convergence and stable optimization paths. These models offer deep understanding of dynamic response under variable loads and serve as a reliable foundation for design optimization.

Bi-objective RSM modeling simultaneously targeted maximizing $\Delta\omega$ to prevent resonance and minimizing σ . Genetic algorithm optimization on these models analyzed dynamic responses at 100 , 200 , and 300mm/min excitation velocities.

Results indicate optimal upper width decreases with rising velocity, reflecting reduced need for high bending inertia and increased vibrational sensitivity at speed. This suggests smaller profiles may enhance dynamics at high velocities, provided stress remains acceptable. Fitness values cluster near 0.7 , indicating balanced trade-off between conflicting objectives and reliable convergence.

Torsional mode produces lower stress but weaker frequency separation. Combined mode, despite higher stress, achieves maximum $\Delta\omega$, promoting greater dynamic stability. Final geometry and loading selection depend on design priorities—resonance avoidance or stress control. For critical 300mm/min operation, combined mode with $\Delta\omega=38.71\text{ Hz}$ delivers optimal vibrational safety despite elevated stress, making it preferable in high-risk scenarios.

Figure 3: 3D RSM surface for $\Delta\omega$ Figure 4: 3D RSM surface for critical stress σ

4- Conclusion

This study conducted modal and vibrational analysis of railway rails to investigate and optimize dynamic behavior using numerical modeling in ANSYS. A precise 3D CAD model was developed and transferred to the finite element environment to evaluate the impact of geometric dimensions on vibrational characteristics.

Analyses covered three primary vibrational modes—torsional, bending, and combined—computing natural frequencies and their differences with excitation frequencies. This frequency gap served as a critical indicator for assessing resonance risk. Critical region stresses, particularly at supports, were also monitored to ensure they remained below the yield strength of the selected material (AISI 1084 steel).

Multi-objective optimization was performed using a genetic algorithm, simultaneously maximizing the natural-excitation frequency difference while enforcing a stress constraint to prevent exceeding the material's allowable yield limit.

Numerical and optimization results revealed that optimal geometric dimensions vary with loading

conditions, vibrational mode, and excitation velocity; no single cross-section is universally ideal. However, the systematic integration of modeling, modal analysis, and multi-objective optimization yielded a robust range of recommended dimensions, enabling designs with enhanced vibrational performance and improved safety margins.

Overall, these findings provide a scientific foundation for optimization-driven rail design in the rail industry, contributing to reduced vibrational effects, extended service life, and superior dynamic performance under real-world operating conditions.

5- References

- [1] M. A. Sayeed and M. A. Shahin, "Design of ballasted railway track foundations using numerical modelling. Part I: Development," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 55, No. 3, pp. 353–368, Mar. 2018, doi: [10.1139/cgj-2016-0633](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0633) (in Persian)
- [2] Z. Zeng, Z. Wang, N. Zhang, Y. Wang, and J. Zhang, "Experimental investigation on the vibration reduction characteristics of an optimized heavy-haul railway low-vibration track," *Shock and Vibration*, Vol. 2019, Art. No. 1539564, Jun. 2019, doi: [10.1155/2019/1539564](https://doi.org/10.1155/2019/1539564)
- [3] Z. Wei, I. Nuñez, A. Nuñez, R. Dollevoet, and Z. Li, "Wheel–rail impact at crossings: Relating dynamic frictional contact to degradation," *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 12, No. 4, Art. No. 041017, Jul. 2017, doi: [10.1115/1.4035649](https://doi.org/10.1115/1.4035649)
- [4] M. Germonpré, L. Van Hoorebeeck, and G. Degrande, "Contributions of longitudinal track unevenness and track stiffness variation to railway induced vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 437, pp. 292–307, Dec. 2018, doi: [10.1016/j.jsv.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.09.027)
- [5] J. Jin, L. Jiang, M. Sun, X. Li, and Y. Wen, "Development of tuned particle impact damper for reduction of transient railway vibrations," *Applied Acoustics*, Vol. 169, Art. No. 107487, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.apacoust.2020.107487](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107487)



بهینه‌سازی ابعاد ریل راه‌آهن با استفاده از تحلیل مودال به منظور بهبود پاسخ ارتعاشی-تنشی

محمدجواد خوش‌گفتار^۱، محمد صحرایی^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

ریل راه‌آهن
بهینه‌سازی هندسی
الگوریتم ژنتیک
روش سطح پاسخ
تحلیل مودال

عبور قطار از روی ریل موجب ایجاد ارتعاشات گسترده در سازه ریل می‌شود؛ پدیده‌ای که با توسعه قطارهای سریع‌السیر، اهمیت بیشتری یافته است. ارتعاشات شدید می‌توانند منجر به افزایش تنش‌های خستگی، کاهش عمر مفید ریل و بروز ناپایداری‌های سازه‌ای شوند. یکی از راهکارهای مؤثر برای مقابله با این چالش، افزایش فاصله بین فرکانس طبیعی ریل و فرکانس تحریک به‌منظور جلوگیری از وقوع پدیده تشدید است. در این پژوهش، بهینه‌سازی ابعاد هندسی ریل راه‌آهن باهدف ارتقای پاسخ ارتعاشی و کاهش تنش‌های خستگی مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف، از ترکیب روش تحلیل سطح پاسخ (RSM) و الگوریتم ژنتیک استفاده شده و مدل عددی ریل در محیط نرم‌افزار ANSYS طراحی و شبیه‌سازی شده است. تحلیل‌ها شامل استخراج فرکانس‌های طبیعی و ارزیابی رفتار تنش‌ی در موده‌های ارتعاشی پیچشی، خمشی و ترکیبی بوده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش سرعت تحریک باعث کاهش عرض بهینه مقطع پایینی ریل در موده‌های یکسان می‌شود. همچنین، افزایش عرض مقطع بالایی از ۴۰ به ۸۰ میلی‌متر موجب کاهش محسوس تنش‌های موضعی می‌گردد. این نتایج می‌تواند مبنایی برای طراحی هوشمندانه و مقاوم ریل‌های راه‌آهن در مواجهه با بارهای دینامیکی فراهم سازد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

*نویسنده مسئول

محمدجواد خوش‌گفتار

ایمیل

m.khoshgoftar@araku.ac.ir

۱- مقدمه

که بر استحکام و رفتار ارتعاشی تجهیزات مرتبط تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین، شرط طراحی بهینه سازه، انتخاب دقیق این پارامترها است. مسیر راه‌آهن، مطابق شکل ۱، شامل تراورس بتنی، دو ریل که به تراورس‌ها متصل می‌شوند، بالاست و زیر بالاست است. ریل‌ها از فولاد نورد شده ساخته می‌شوند و به صورت موازی روی ریل‌بندها نصب می‌گردند. بخش اصلی خط‌آهن، ریل است که دو وظیفه تحمل بار قطار و هدایت آن به سمت تکیه‌گاه‌ها را بر عهده دارد. بار ناشی از وزن قطار و حرکت آن از طریق چرخ‌ها به ریل و سپس از ریل به پارسنگ‌ها (بالات) و زیرسازی تراورس منتقل می‌شود. ریل و تراورس به وسیله مجموعه بست ریل به یکدیگر متصل شده و سازه‌ای واحد به نام بست خط یا پل را تشکیل می‌دهند. این سازه به گونه‌ای طراحی شده است

افزایش ترافیک سنگین در بزرگراه‌های بسیاری از کشورهای جهان باعث شده است که راه‌آهن به یکی از محبوب‌ترین وسایل حمل‌ونقل عمومی تبدیل شود. به همین دلیل، در سالیان اخیر تقاضا برای قطارهای سریع‌تر و کارآمدتر به طور چشمگیری افزایش یافته است. حمل‌ونقل ریلی به دلیل قابلیت ارائه حمل‌ونقل انبوه، پاک و کارآمد، به‌عنوان وسیله‌ای دوستدار محیط‌زیست موردتوجه قرار گرفته است. این تقاضای روبه‌افزایش، مهندسان و کارشناسان فعال در صنعت ریلی را به طراحی و ساخت قطارهای مدرن و سریع‌السیر ترغیب کرده است. طراحی مهندسی سازه ریل راه‌آهن شامل پارامترهایی است که با حصول آن‌ها، سازه می‌تواند بهترین عملکرد ارتعاشی را از خود نشان دهد. در خصوص ریل راه‌آهن، پارامترهایی مانند ابعاد هندسی و موده‌های ارتعاشی (پیچشی، خمشی و ترکیبی) از عوامل مهمی هستند

How to Cite this Article:

[1] M. J. Khoshgoftar and M. Sahraei, "Geometrical optimization of a railway rail using modal analysis to improve vibrational and stress responses," Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 99-111, 2026. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535239.1146>. (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

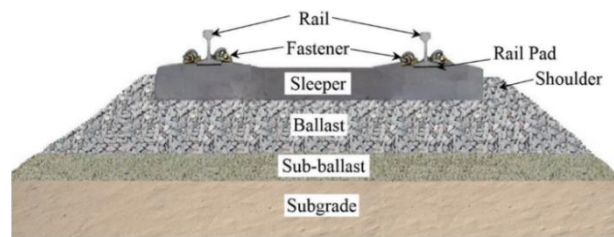
تجربی قابلیت کاهش ارتعاش آن را بررسی کردند. دمپر طراحی شده شامل مجموعه‌ای از توده‌های جاذب دینامیکی تنظیم‌شده فولادی، پایه‌های لاستیکی و توپ‌های ضربه‌ای آهنی است که با گیره‌های فنری به ریل متصل می‌شود. نتایج نشان داد دمپر قابلیت کاهش ارتعاش در یک باند فرکانسی خاص را با میرایی اضافی در محدوده فرکانس باند پهن دارد.

مسعودی نژاد و همکاران (۲۰۱۹) [۶] به بررسی نحوه شروع و انتشار ترک‌ها و مشخصات هندسی آن‌ها پرداختند. آن‌ها رفتار رشد ترک خستگی را با روش‌های عددی و تجربی مطالعه کردند، آزمایش‌های رشد ترک و سختی خستگی انجام دادند و مطالعات فراکتوگرافی روی نمونه‌های شکسته انجام دادند. با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی، رشد ترک خستگی تحت میدان تنش مدل‌سازی شد و نرخ رشد ترک با مدل پاريس اصلاح شده تخمین زده شد. نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشت. ترک‌های عرضی بیشتر در ناحیه اتصال تار به سر ریل مشاهده شد.

فنگ و همکاران (۲۰۲۱) [۷] مدل کوپلی از مسیر بدون بالاست و وسیله نقلیه را با در نظر گرفتن ترک با روش اجزای محدود ارائه دادند. آن‌ها از عناصر تیر اویلر ترک‌خورده برای مدل‌سازی دال بتنی و لایه پشتیبان با ترک‌های عرضی استفاده کردند و روش تکراری برای تخمین رشد ترک خستگی بتن تحت بار دینامیکی قطار پیشنهاد کردند. نتایج نشان داد با افزایش سختی ملاط، جابه‌جایی عمودی و ضریب شدت تنش نوک ترک کاهش می‌یابد و عمق اولیه ترک در لایه پشتیبان تأثیر مهمی بر عمر خستگی ترک دارد. روش تعاملی ارائه شده توانایی پیش‌بینی عمر باقیمانده اعضای بتنی ترک‌خورده را دارد. همچنین، فرکانس تحریک بار قطار تأثیر قابل‌توجهی بر نرخ رشد ترک دارد.

بهینه‌سازی هندسه ریل‌های راه‌آهن از طریق تحلیل مودال نقش حیاتی در بهبود عملکرد ارتعاشی و تنشی دارد. این فرآیند شامل تنظیم هندسه ریل و محل اتصال‌ها به منظور کاهش تنش‌های تماس و افزایش دوام سازه می‌باشد. استفاده از تحلیل مودال باعث درک بهتر رفتار دینامیکی سیستم‌های ریلی تحت شرایط کاری شده و منجر به اصلاحات طراحی مؤثرتر می‌گردد. روش‌های مختلف بهینه‌سازی شامل تنظیم پارامترهای هندسی مانند به‌کارگیری پارامترسازی-B اسپلاین در محل اتصال‌ها است که می‌تواند فشارهای تماس نرمال و سایش را به طور قابل توجهی کاهش دهد و عمر مفید نقاط اتصال را افزایش دهد [۸، ۹]. همچنین، بهینه‌سازی شکل پروفیل سر ریل با استفاده از

که در برابر تنش‌های خمشی، برشی، ارتعاشات ناشی از حرکت قطارها و همچنین تنش‌های حرارتی محیط مقاومت کند.



شکل ۱: برش عرضی از یک راه‌آهن معمول به همراه بالاست و لایه‌های زیرین [۱]

در مطالعات پیشین، تحقیقات گسترده‌ای در حوزه رفتارهای ارتعاشی ریل و اجزای مسیر انجام شده است. ژیبینگ و همکاران (۲۰۱۹) [۲] رفتار ارتعاشی دو نوع سیستم مسیر کم ارتعاش را برای راه‌آهن سنگین بررسی کردند. آن‌ها ابتدا دو مدل مسیر کم ارتعاش در مقیاس کامل شامل ریل، بست، بلوک یاتاقان، چکمه لاستیکی، دال مسیر و پایه فونداسیون را بر اساس نقشه‌های طراحی ساختند. سپس پاسخ‌های ارتعاشی اجزای مختلف مسیر تحت تحریک ضربه یک مجموعه چرخ را اندازه‌گیری و ویژگی‌های حوزه زمانی هر جزء مسیر را با منحنی‌های تاریخچه زمانی ارتعاش به دست آوردند و مقایسه کردند. توزیع دامنه فرکانس نیز تحلیل شد و عملکرد کاهش ارتعاش با نتایج تحلیل زمان-فرکانس به طور جامع ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که مسیر کم ارتعاش جدید دارای شتاب ارتعاش کمتر، مدت‌زمان کوتاه‌تر ارتعاش، فرکانس ارتعاش پایین‌تر اجزای مسیر و اثر قابل‌توجه کاهش ارتعاش بر روی زمین است.

وی و همکاران (۲۰۱۷) [۳] سایش و تغییر شکل پلاستیک ناشی از برخورد چرخ به ریل در تقاطع راه‌آهن را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. نتایج نشان داد نیروهای تماس عمودی و مماسی روی ریل هنگام ضربه ناهمگن هستند.

گرمونپره و همکاران (۲۰۱۸) [۴] نقش ناهمواری مسیر طولی و تغییر سفتی مسیر را در ایجاد ارتعاشات راه‌آهن بررسی کردند. آن‌ها مطالعه موردی یک خط راه‌آهن در فورت سوئد را انجام دادند و ارتعاشات میدان آزاد محاسبه شده را با داده‌های اندازه‌گیری شده تطبیق دادند. مشخص شد سهم تغییر سختی مسیر در نیروهای برهم‌کنش و ارتعاشات میدان آزاد بسیار کمتر از سهم ناهمواری مسیر طولی است.

جی جین و همکاران (۲۰۲۰) [۵] دمپر ضربه‌ای تنظیم‌شده‌ای برای کاهش صدای غلتش و ارتعاشات ریل پیشنهاد دادند و به‌صورت

۲- مدل‌سازی

در طراحی ریل‌های راه‌آهن، یکی از مهم‌ترین پارامترها انتخاب جنس مناسب است که باید علاوه بر استحکام کافی، وزن نسبتاً کمی داشته باشد تا بتواند به بهینه‌سازی ساختاری و عملکرد دینامیکی سیستم کمک کند. در این راستا، اولین گزینه استفاده از جنس فولادی است که نسبت استحکام به وزن بالایی دارد و به همین دلیل در بسیاری از پروژه‌های مهندسی راه‌آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد. باتوجه به اینکه ریل‌ها تحت بارگذاری‌های شدید دینامیکی و ارتعاشی قرار دارند، انتخاب آلیاژ مناسب می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش دوام و کاهش هزینه‌های نگهداری داشته باشد.

یکی از روش‌های مرسوم برای کاهش وزن و افزایش مقاومت، استفاده از مقاطع تقویتی یا به‌کارگیری فولادهای زنگ‌زن با خواص مکانیکی بالا است. در این پژوهش، فولاد زنگ‌زن AISI 1084 برای شبیه‌سازی ریل راه‌آهن انتخاب شده است. این نوع فولاد به دلیل ترکیبات شیمیایی خاص، به‌ویژه درصد بالای منگنز، قابلیت عملیات حرارتی عمیق‌تری دارد که منجر به افزایش خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی و سختی می‌شود. علاوه بر این، این عملیات حرارتی عمیق موجب کاهش احتمال گسترش ترک‌های سطحی در طول زمان بهره‌برداری می‌شود که یکی از عوامل کلیدی در افزایش عمر خستگی ریل‌ها است.

مشخصات ترکیبات شیمیایی، خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد AISI 1084 به‌عنوان ورودی‌های اصلی برای تعریف ماده در مدل‌های شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای ساخت مدل هندسی سه‌بعدی ریل، از نرم‌افزار سالی‌دورکس استفاده شده است و پس از تکمیل مدل، به نرم‌افزار انسیس جهت انجام تحلیل‌های عددی منتقل گردیده است. شکل ۲، مدل سه‌بعدی ریل راه‌آهن را به همراه نحوه مش‌بندی و انواع المان‌های به کار رفته نمایش می‌دهد.

تحلیل عددی مدل در سه مرحله اصلی صورت می‌گیرد: ابتدا اعمال پیش‌بارهای خمشی و پیچشی، سپس انجام تحلیل مودال به‌منظور استخراج فرکانس‌های طبیعی و در نهایت تحلیل گذرا و ارتعاشی جهت بررسی پاسخ دینامیکی سازه تحت بارگذاری‌های متناوب. پیش‌بارهای اعمال شده شامل پیش‌بار پیچشی در محدوده صفر تا ۵ درجه و پیش‌بار خمشی در محدوده صفر تا ۵ میلی‌متر است که به‌صورت جداگانه و ترکیبی بر روی ریل وارد می‌شوند [۸]. پس از اعمال این پیش‌بارها، تحلیل مودال برای تعیین فرکانس‌های طبیعی

الگوریتم‌های ژنتیک و روش اجزاء محدود، باعث کاهش تمرکز تنش‌ها به ویژه در نواحی حساس مانند اتصالات عایق شده می‌شود [۱۰]. در بخش تحلیل مودال، شناسایی فرکانس‌های طبیعی ریل با استفاده از تحریکات چرخ-ریل به عنوان روشی نوین، امکان تشخیص ویژگی‌های ارتعاشی و نقص‌های احتمالی در سیستم‌های ریلی پرسرعت را فراهم می‌آورد [۱۱]. علاوه بر این، بهینه‌سازی مقاوم با در نظر گرفتن تغییرات پروفیل چرخ و انحراف مسیر، تضمین می‌کند که طرح‌های بهینه تحت شرایط واقعی عملکرد مناسبی داشته باشند [۱۲]. تحلیل اجزاء محدود در تماس چرخ و ریل نیز به فهم بهتر توزیع تنش‌ها و تحلیل عمر خستگی کمک کرده است [۱۳]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، پیاده‌سازی عملی این روش‌ها همچنان با چالش‌هایی در مواجهه با شرایط عملیاتی و بارگذاری متغیر روبرو است.

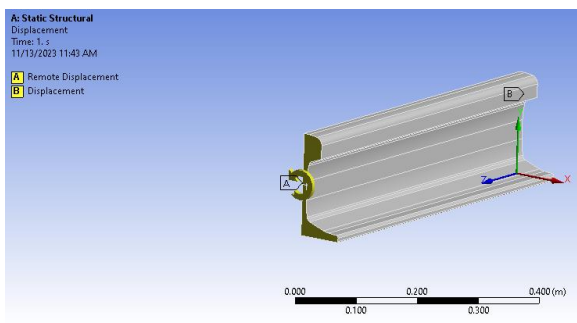
باتوجه به اهمیت بالای این مسائل، طراحی بهینه ریل راه‌آهن جهت جلوگیری از وقوع پدیده تشدید بسیار حیاتی است. ریل‌ها به دلیل شرایط کاری خاص خود، مستعد بروز تشدید هستند که در آن ارتعاشات سازه‌ای در فرکانس‌های طبیعی به حد بحرانی می‌رسد و منجر به خرابی‌های جدی می‌شود. در طراحی بهینه، تلاش بر این است که اختلاف بین فرکانس تحریک و فرکانس طبیعی ریل به حداقل مقدار ممکن برسد تا سازه در شرایط ایمنی پایدار کار کند.

هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر ابعاد هندسی بر رفتار ارتعاشی-تنشی ریل راه‌آهن و بهینه‌سازی هندسی آن تحت بارگذاری متناوب خستگی در صنایع ریلی کشور است. با استفاده از روش‌های عددی و الگوریتم ژنتیک همراه با روش سطح پاسخ، مدلی از ریل در نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود تا ابعاد بهینه‌ای که موجب بهبود عملکرد دینامیکی و کاهش تنش‌های خستگی می‌شود، استخراج گردد.

باتوجه به پیچیدگی و چندبعدی بودن مسائل بهینه‌سازی هندسی در ریل‌های راه‌آهن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته ضروری است. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، به دلیل توانایی جستجو در فضای وسیع طراحی، مقابله با بهینه‌سازی چندهدفه و جلوگیری از گیرافتادن در بهینه‌های محلی، انتخاب مناسبی برای این پژوهش بوده است. این الگوریتم با ترکیب روش سطح پاسخ، امکان تحلیل دقیق‌تر و کارآمدتر پارامترهای مؤثر بر رفتار ارتعاشی و تنشی ریل را فراهم می‌آورد. بدین ترتیب، رویکرد پیشنهادی می‌تواند به ارائه راهکارهای بهینه جهت بهبود عملکرد دینامیکی ریل و افزایش عمر مفید آن کمک نماید.

می‌شوند و نقطه مرکز به کل سطح کوپل شده است تا انتقال بار به شکل یکنواخت و واقعی صورت گیرد. درجات آزادی در فاصله ۶۰ سانتی‌متر در طول ریل که محل قرارگیری تراورس است، به طور کامل بسته شده‌اند تا شرایط مرزی صحیح شبیه‌سازی شود. همچنین، مدل به صورت متقارن ساخته شده و درجات آزادی تقارن در سطح مخالف بارگذاری بسته شده‌اند تا شرایط مرزی مدل کامل و منطبق بر واقعیت باشد.

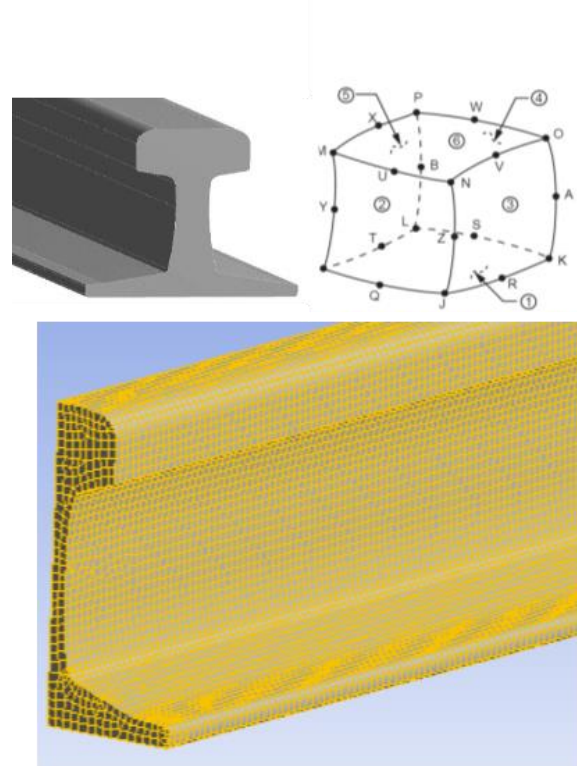
با توجه به طبیعت الاستیک بستر ریل، در این پژوهش فرض اتصال کاملاً مقید به منظور ارائه مدل مرجع و حذف ابهامات ناشی از تغییرات سختی تکیه‌گاه‌ها انتخاب شده است. این فرض همچنین امکان مقایسه مستقیم با شرایط آزمایشگاهی مشابه را فراهم می‌کند و بنابراین، علی‌رغم سادگی فرض، دقت نتایج تحلیل فرکانس‌های طبیعی حفظ شده است.



شکل ۳: بارگذاری پیش‌پیشی به سطح انتهایی ریل

متغیرهای هندسی مهمی که برای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند، طول قسمت بالایی ریل a_f و طول قسمت پایینی ریل b_f هستند که در محدوده‌های مشخص شده قرار دارند (شکل ۴). این دو پارامتر به دلیل تأثیر چشمگیر بر رفتار ارتعاشی ریل انتخاب شده‌اند. برای ارزیابی اثر این پارامترها، تحلیل مودال در مراحل پیشین انجام شده است. هرچند روش سطح پاسخ (RSM) از نظر تئوریک محدود به دو پارامتر نیست و توانایی مدلسازی چندمتغیره را دارد، در این تحقیق به منظور افزایش دقت مدلسازی و جلوگیری از پیچیدگی بیش‌ازحد مدل، تنها دو پارامتر هندسی مؤثر و بحرانی انتخاب شده‌اند. تابع هدف به گونه‌ای تعریف شده است که اختلاف فرکانس‌های طبیعی و فرکانس تحریک (رابطه ۱) بیشینه شود تا احتمال تشدید ارتعاشات کاهش یابد و همزمان تنش‌های بوجود آمده در ریل (رابطه ۲) کمینه گردد. بنابراین مسأله بهینه‌سازی به صورت دو هدفه فرمول‌بندی و به شکل رابطه (۳) بیان می‌شود که در آن ω_n فرکانس طبیعی، ω_{ex} فرکانس تحریک و σ_b تنش در ریل می‌باشد.

انجام می‌شود و سپس بارگذاری ارتعاشی متناوب اجرا می‌شود تا رفتار دینامیکی و پاسخ ارتعاشی ریل مورد ارزیابی قرار گیرد.

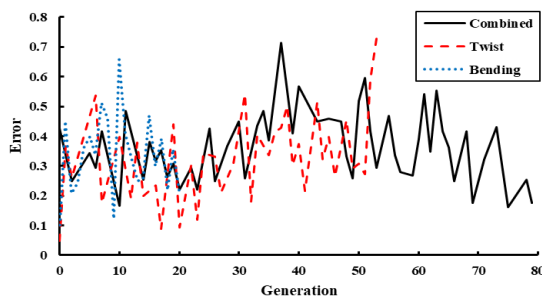


شکل ۴: نمای سه‌بعدی دقیق هندسه ریل راه‌آهن مدل‌سازی شده به همراه مدل مش‌بندی شده آن

یکی از نکات کلیدی در مدلسازی عددی و تحلیل‌های مبتنی بر روش اجزای محدود، دقت و کیفیت مش‌بندی است. در این مطالعه، به دلیل نیاز به دقت بالا در نتایج و هم‌زمان کاهش زمان محاسباتی به منظور اجرای تعداد زیاد شبیه‌سازی‌های بهینه‌سازی، تصمیم گرفته شد تا از المان‌های مربعی استفاده شود. این المان‌ها علاوه بر دقت مناسب، بهینه‌تر از المان‌های مثلثی بوده و زمان محاسباتی کمتری دارند. مش‌بندی با استفاده از ۳۲۰۰۰ المان مربعی انجام شده است که تعادل خوبی بین دقت و سرعت حل ایجاد می‌کند (شکل ۲).

هندسه، موقعیت گره‌ها و سیستم مختصات المان‌های سازه‌ای مثلثی در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، نرم‌افزار انسیس قابلیت انتخاب روش‌های مختلف شبکه‌بندی را دارد که با توجه به پیچیدگی هندسه ریل و نیاز به دقت بالا، روش چند ناحیه‌ای با المان‌های شش‌وجهی مکعبی برای شبکه‌بندی انتخاب شده است. این روش امکان ایجاد شبکه سازمان‌یافته و با کیفیت را فراهم می‌کند که در دقت نتایج و پایداری محاسبات تأثیر مستقیم دارد.

بارگذاری و شرایط مرزی نیز به صورت دقیق تعریف شده‌اند. مطابق شکل ۳، بار پیش‌پیشی و خمشی به انتهای ریل و در مرکز سطح وارد



شکل ۵: روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در ریل راه‌آهن درصد خطا محاسباتی برای مودهای مختلف

در ادامه، تحلیل پارامتریک رفتار ارتعاشی ریل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود انسیس مودال انجام شده است. شرایط تکیه‌گاهی در تحلیل‌ها متغیر در نظر گرفته شده است؛ زیرا تأثیر قابل‌توجهی بر فرکانس‌های طبیعی و رفتار ارتعاشی ریل دارد و نمی‌توان آن را ثابت فرض کرد. این شرایط متغیر مرتبط با تکیه‌گاه‌های بخش‌های اتصال ریل به تراورس است و بر اساس سرعت جابه‌جایی تراورس تعریف می‌شود تا بتوان تخمینی دقیق‌تر از فرکانس‌ها و پاسخ ارتعاشی سازه به دست آورد.

شکل ۶ و شکل ۷ نمودارهای تغییرات مدول الاستیک و مدول برشی ریل راه‌آهن با ابعاد هندسی مختلف و سرعت‌های مختلف تحریک فرکانسی را نمایش می‌دهند. مدول‌ها و صلبیت‌ها بر اساس روش ماتریس کل محاسبه شده‌اند؛ به این صورت که ماتریس سختی وابسته به پارامترهای نرمال و برشی در طول کل سازه محاسبه و با تبدیل نیرو به تنش و جابه‌جایی به کرنش، به صورت پارامتری از فرکانس استخراج می‌شوند. این فرآیند به صورت خودکار توسط نرم‌افزار انسیس انجام می‌شود. کاهش مقدار مدول الاستیک در سرعت ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه برای ریل با ابعاد ۱۴۰×۸۰ نشان‌دهنده رفتار مطلوب در مودهای پیچشی و خمشی است. در تمامی سرعت‌های بارگذاری، ریل با ابعاد بزرگ‌تر نسبت به ابعاد کوچک‌تر عملکرد بهتری دارد، اما افزایش ابعاد از ۱۲۰×۴۰ به ۱۴۰×۸۰ باعث کاهش کرنش شکست محوری از ۳/۲ درصد به ۱/۹ درصد شده که این کاهش ممکن است در برخی شرایط نامطلوب باشد و لازم است در مباحث بهینه‌سازی لحاظ شود.

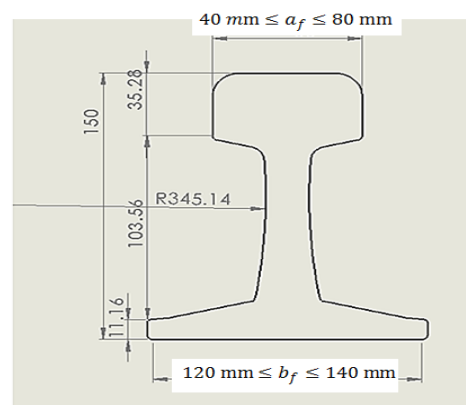
$$\Delta\omega_u(a_f, b_f) = \omega_n - \omega_{ex} \quad (1)$$

$$\sigma_b(a_f, b_f) \quad (2)$$

$$\text{Maximize}(\Delta\omega_u(a_f, b_f) - \sigma_b(a_f, b_f))$$

$$40 \text{ mm} \leq a_f \leq 80 \text{ mm} \quad (3)$$

$$120 \text{ mm} \leq b_f \leq 140 \text{ mm}$$



شکل ۴: متغیرهای هندسی ریل برای بهینه‌سازی

فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تا رسیدن به همگرایی یا اتمام تکرارهای تعیین‌شده ادامه دارد. معیار توقف همگرایی، عدم تغییر مقدار بهترین برازندگی در ۱۰ نسل متوالی است. این الگوریتم در مودهای پیچشی، خمشی و ترکیبی به ترتیب پس از ۵۴، ۲۰ و ۷۸ تکرار به معیار توقف رسیده است. روند تغییرات الگوریتم در شکل ۵ نمایش داده شده است. اگرچه در بخش‌هایی از نمودار، به‌ویژه پس از نسل ۳۰، نوساناتی مشاهده می‌شود، این تغییرات در محدوده خطای مهندسی قابل قبول (۵ تا ۱۵ درصد) قرار داشته و شیب تغییرات پاسخ به مرور کاهش یافته است که این درصد بیانگر اختلاف نسبی بین بهترین پاسخ‌های هر نسل و مقدار بهینه نهایی است که در محدوده مهندسی قابل قبول باقی می‌ماند. بنابراین، روند کلی الگوریتم بیانگر دستیابی به پاسخ‌های پایدار و نزدیک به بهینه است. وزن‌دهی بین اختلاف فرکانس و تنش بحرانی در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت مساوی اعمال شده است.

با افزایش تدریجی سرعت تحریک تا حدود ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در هر دو مدول (الاستیک و برشی) مشاهده می‌شود که این افت می‌تواند ناشی از کاهش توانایی ریل در مقاومت در برابر بارگذاری‌های دینامیکی تکرارشونده باشد. همچنین، رفتار کرنش شکست نیز در این بازه کاهش نشان داده و به مقادیر کمتری رسیده است که نشان‌دهنده افزایش احتمال بروز پدیده‌های خستگی و شروع ترک‌های موضعی در اثر تحریک‌های فرکانسی بالاتر است.

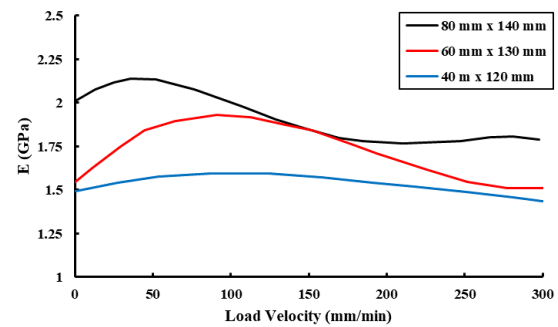
از سوی دیگر، روند تغییرات مقادیر در سرعت‌های تحریک ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه همگرا بوده و اختلاف چشمگیری در مقادیر نهایی دیده نمی‌شود. این همگرایی رفتاری حاکی از تثبیت پاسخ ارتعاشی ریل در سرعت‌های بالا است که می‌تواند به‌عنوان معیاری جهت تخمین عملکرد پایدار سازه در شرایط بحرانی مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع همچنین می‌تواند به تحلیل خستگی بلندمدت ریل در خطوط با تردد سریع کمک شایانی کند.

در مجموع، نتایج این بخش به‌وضوح نشان می‌دهد که افزایش ابعاد هندسی در محدوده تعریف‌شده موجب بهبود رفتار ارتعاشی و کاهش تنش‌های ایجاد شده در ریل می‌شود، درحالی‌که افزایش سرعت تحریک، منجر به افت پاسخ‌های مکانیکی شده و احتمال بروز تخریب ساختاری را بالا می‌برد؛ لذا دستیابی به یک تعادل میان ابعاد هندسی بهینه و شرایط بهره‌برداری دینامیکی برای عملکرد ایمن ریل از اهمیت بالایی برخوردار است.

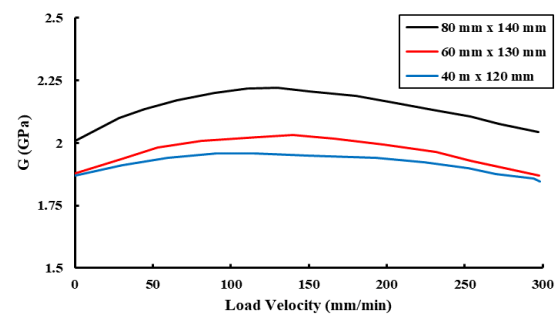
جدول ۱: نتایج مرتبط با توابع هدف پس از حل مساله‌ی بهینه‌سازی ابعاد ریل $(a_f, b_f) \times 80 (mm) \times 140 (mm)$

سرعت اعمال تحریک (mm/min)	E_{NC} (GPa)	G_{NC} (GPa)	FSA (%)	FSF (%)
۱۰۰	۱/۲	۲/۱	۳/۵	۴/۷
۱۵۰	۱/۹	۲/۳	۳/۴	۴/۴
۲۰۰	۱/۸	۲/۱	۳/۱	۴/۲
۲۵۰	۲	۲	۳	۳/۸
۳۰۰	۲	۱/۹	۲/۸	۳/۸

در راستای تحلیل دقیق و مدل‌سازی پاسخ دینامیکی ریل راه‌آهن، از روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology) برای بررسی ارتباط میان متغیرهای طراحی و توابع هدف استفاده شد.



شکل ۶: نمودار تغییرات مدول الاستیک ریل راه‌آهن با ابعاد هندسی و تحریک فرکانسی با سرعت‌های مختلف

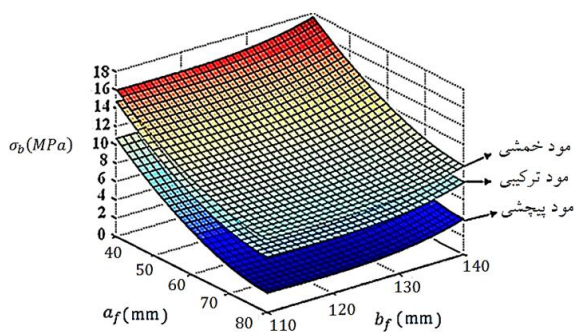


شکل ۷: نمودار تغییرات مدول برشی ریل راه‌آهن با ابعاد هندسی و تحریک فرکانسی با سرعت‌های مختلف

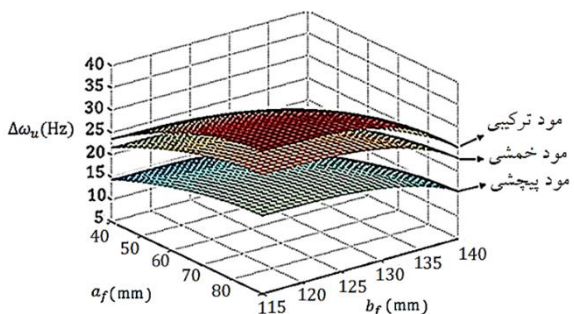
۳- نتایج

پس از اجرای فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهترین ترکیب ابعاد هندسی ریل راه‌آهن برابر با $a_f=80$ و $b_f=140$ میلی‌متر به دست آمد که منجر به بهینه‌ترین پاسخ از منظر رفتار ارتعاشی و مقاومت تنشی گردید. جدول ۱ مقادیر بهینه‌شده توابع هدف شامل مدول الاستیسیته بدون کرن (ENC)، مدول برشی بدون کرنش (GNC)، کرنش شکست در مود خمشی (FSA)، و کرنش شکست در مود پیچشی (FSF) را برای ابعاد مذکور در سرعت‌های مختلف تحریک فرکانسی ارائه می‌دهد.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل پارامتریک نشان می‌دهد که با افزایش سرعت تحریک، هر چهار تابع هدف دچار افت تدریجی می‌شوند. به‌ویژه، در بازه سرعت‌های پایین‌تر (به‌ویژه ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه)، مقادیر ENC و GNC در بیشترین مقدار خود ظاهر شده‌اند. در همین سرعت، بیشترین مقادیر برای کرنش شکست در هر دو مود نیز به ثبت رسیده است؛ به‌طوری‌که کرنش شکست محوری (FSA) برابر با ۳/۵ درصد و کرنش شکست پیچشی (FSF) برابر با ۴/۷ درصد اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد مکانیکی مطلوب ریل در محدوده فرکانسی پایین‌تر است.



شکل ۸: ترسیم مدل ۳ بعدی حاصل‌شده از روش سطح پاسخ برای تابع هدف $\sigma_b(a_f, b_f)$ بر حسب متغیرهای طراحی a_f و b_f



شکل ۹: ترسیم مدل سه‌بعدی حاصل‌شده از روش سطح پاسخ برای تابع هدف $\Delta\omega_u(a_f, b_f)$ بر حسب متغیرهای طراحی a_f و b_f

در این بخش، مدل‌سازی ریاضی مبتنی بر روش سطح پاسخ برای بررسی و تحلیل هم‌زمان دو تابع هدف انجام گرفته است. هدف اول، بیشینه‌کردن اختلاف فرکانس طبیعی و فرکانس تحریک $\Delta\omega_u(a_f, b_f)$ با هدف کاهش احتمال وقوع پدیده تشدید در ریل، و هدف دوم، کمینه‌سازی تنش بحرانی $\sigma_b(a_f, b_f)$ در سازه بوده است. این توابع هدف برحسب متغیرهای طراحی، شامل طول بالایی ریل a_f و عرض پایین آن b_f ، به صورت تابعی استخراج شده و سپس فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر بستر این مدل‌های ریاضی اجرا شده است.

نتایج حاصل از این بهینه‌سازی که در جدول ۲ ارائه شده‌اند، رفتار پاسخ دینامیکی ریل راه‌آهن را در سه سرعت تحریک فرکانسی مختلف شامل ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تحلیل و مقایسه می‌کنند. بر اساس این نتایج، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت تحریک، مقادیر بهینه‌ی حاصل‌شده برای عرض فوقانی ریل کاهش پیدا کرده است؛ این موضوع را می‌توان به کاهش نیاز به اینرسی خمشی بالا در سرعت‌های بالاتر و در عین حال افزایش حساسیت ارتعاشی سازه نسبت داد. چنین رفتاری از منظر طراحی به معنای آن است که در سرعت‌های

نمودارهای سه‌بعدی ارائه‌شده در شکل ۸ و شکل ۹، به ترتیب نمایانگر تغییرات تابع اختلاف فرکانس طبیعی و فرکانس تحریک $\Delta\omega_u(a_f, b_f)$ و تنش بحرانی $\sigma_b(a_f, b_f)$ در فضای طراحی تعریف‌شده برحسب پارامترهای هندسی a_f و b_f هستند. این نمودارها بینشی کمی و کیفی از نحوه تأثیرگذاری این پارامترها بر پاسخ سازه فراهم می‌سازند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی، مشاهده می‌شود که با تغییر نوع تحریک از حالت پیچشی به خمشی، مقادیر تنش ایجادشده در ریل افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که در تحریک ترکیبی، اختلاف میان فرکانس طبیعی و فرکانس تحریک نسبت به سایر حالات بیشتر بوده و این امر نشانگر بهبود وضعیت دینامیکی ریل در برابر پدیده تشدید است. به بیان دیگر، حالت ترکیبی موجب بیشینه شدن تابع $\Delta\omega_u$ شده است که می‌تواند به‌عنوان یک مزیت مکانیکی در طراحی ریل‌های مقاوم در برابر ارتعاشات مورد توجه قرار گیرد.

از سوی دیگر، تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که افزایش عرض بخش فوقانی ریل از ۴۰ به ۸۰ میلی‌متر منجر به کاهش محسوس تنش در ناحیه بحرانی شده است. این کاهش را می‌توان به افزایش سختی خمشی و ممان اینرسی بیشتر در بخش بالایی نسبت داد که منجر به بهبود عملکرد سازه‌ای در برابر خمش می‌گردد. در مقابل، تغییر پهنای بخش پایینی ریل تأثیر محسوسی بر کاهش تنش نداشته، اما باعث افزایش تدریجی در مقدار $\Delta\omega_u$ شده است. این موضوع بیانگر آن است که افزایش این پارامتر، بیش از آنکه در کاهش تنش مؤثر باشد، در بهبود رفتار ارتعاشی و فاصله‌گیری از ناحیه تشدید نقش ایفا می‌کند.

سطوح حاصل از شبیه‌سازی تابع هدف در فضای طراحی، پیوستگی و همواری مناسبی از خود نشان داده‌اند؛ ویژگی‌ای که برای اجرای موفق الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک ضروری است. پیوستگی سطح پاسخ، تضمین‌کننده همگرایی مناسب در فرایند بهینه‌سازی و جلوگیری از پرش‌های ناگهانی در مسیر جستجوی پاسخ بهینه خواهد بود. در نتیجه، داده‌های حاصل از تحلیل سطح پاسخ، ضمن ارائه دید عمیق‌تر نسبت به رفتار دینامیکی ریل تحت بارهای متغیر، پایه‌ای مطمئن برای استخراج نتایج بهینه‌سازی در مراحل بعدی فرایند طراحی محسوب می‌شوند.

مطلوب‌تری حاصل می‌شود که می‌تواند پایداری دینامیکی بیشتری برای سازه ایجاد کند.

در نهایت، انتخاب ابعاد هندسی و شرایط بارگذاری مناسب برای ریل راه‌آهن، تابعی از اولویت‌های طراحی و حساسیت نسبت به وقوع تشدید در سرعت‌های مختلف تحریک است. به‌عنوان نمونه، اگر اجتناب از پدیده تشدید در شرایط کاری با سرعت تحریک ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه برای طراح از اهمیت بالایی برخوردار باشد، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که مود ترکیبی با اختلاف فرکانسی برابر با ۳۸/۷۱ هرتز، بهترین پاسخ بهینه را فراهم می‌کند. چنین انتخابی با وجود افزایش سطح تنش، تضمین‌کننده ایمنی بیشتر در برابر ناپایداری‌های ارتعاشی خواهد بود و می‌تواند در شرایط بحرانی عملیاتی گزینه ارجح تلقی شود.

جدول ۲: نتایج بهینه‌سازی ابعاد هندسی ریل راه‌آهن برای مودها و سرعت تحریک متفاوت

سرعت تحریک (mm/min)	مود ارتعاشی	ابعاد بهینه شده (a, b)	F_g	$d_{\Delta\omega_u}$	d_{σ_b}	$\Delta\omega_u (Hz)$	$\sigma_b (MPa)$
۱۰۰	پیچشی	(۵۸/۱۳۱)	۰/۷۳۵۸	۰/۵۴۸۱	۰/۸۳۴۲	۲۵/۵۱	۴/۲۶
۱۰۰	خمشی	(۵۷/۱۳۳)	۰/۷۳۲۱	۰/۵۲۲۳	۰/۸۲۴۵	۳۴/۳۳	۹/۱۱
۱۰۰	ترکیبی	(۶۲/۱۳۶)	۰/۷۱۲۵	۰/۵۲۲۲	۰/۸۱۳۶	۳۷/۱۲	۷/۳۲
۲۰۰	پیچشی	(۶۱/۱۳۰)	۰/۶۸۴۳	۰/۷۳۴۲	۰/۶۴۶۹	۲۳/۶۸	۶/۱۱
۲۰۰	خمشی	(۶۱/۱۳۲)	۰/۶۷۵۲	۰/۷۳۱۳	۰/۶۲۲۹	۳۱/۳۹	۱۱/۳۴
۲۰۰	ترکیبی	(۶۰/۱۳۵)	۰/۶۸۴۳	۰/۷۴۵۵	۰/۶۳۴۵	۳۵/۹۲	۹/۱۲
۳۰۰	پیچشی	(۵۹/۱۲۹)	۰/۷۷۵۴	۰/۶۴۵۷	۰/۶۳۵۲	۲۲/۴۲	۷/۳۴
۳۰۰	خمشی	(۵۹/۱۳۰)	۰/۷۱۳۳	۰/۶۴۲۳	۰/۶۲۷۸	۳۱/۹۸	۱۰/۲۹
۳۰۰	ترکیبی	(۵۸/۱۳۳)	۰/۷۳۶۱	۰/۶۱۷۹	۰/۶۲۴۹	۳۸/۷۱	۸/۱۲

شاخصی کلیدی در ارزیابی احتمال وقوع پدیده تشدید مورد استفاده قرار گرفت. از سوی دیگر، تنش‌های ایجاد شده در نواحی بحرانی همچون محل تکیه‌گاه‌ها نیز تحت بررسی قرار گرفت تا از عدم تجاوز آن‌ها از حد تسلیم ماده اطمینان حاصل شود.

به‌منظور استخراج پیکربندی بهینه ابعاد ریل، الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزار اصلی بهینه‌سازی چندهدفه به کار گرفته شد. در این الگوریتم، ضمن بهینه‌سازی اختلاف فرکانس تحریک-فرکانس طبیعی، قید محدودیت تنش به‌گونه‌ای لحاظ شد که مقدار تنش ایجاد شده در سازه از مقدار مجاز تنش تسلیم فولاد انتخاب شده (AISI 1084) فراتر نرود.

بالا، کاهش ابعاد ریل ممکن است باعث بهبود رفتار ارتعاشی شود، البته مشروط بر آنکه سطح تنش در محدوده‌ی مجاز باقی بماند.

از سوی دیگر، مقادیر حاصل شده برای شاخص برازندگی الگوریتم ژنتیک Fg، در اکثر حالات در نزدیکی مقدار ۰/۷ قرار داشته‌اند که این امر نشانگر تعادل نسبی میان دو هدف متناقض در بهینه‌سازی است. از آنجا که بهینه‌سازی $\Delta\omega_u(a_f, b_f)$ و کمینه‌سازی $\sigma_b(a_f, b_f)$ اهدافی در تقابل هستند، رسیدن به این سطح از همگرایی حاکی از موفقیت مدل در تولید پاسخ‌های بهینه قابل اتکا است.

تحلیل‌های انجام شده همچنین نشان می‌دهد که پاسخ‌های بهینه در مود ارتعاشی پیچشی، اگرچه با مقادیر تنش کمتری همراه هستند، ولی از نظر فاصله فرکانسی نسبت به فرکانس تحریک ضعیف‌تر عمل می‌کنند. در مقابل، در مود ترکیبی (ترکیب بارگذاری پیچشی و خمشی)، باوجود بالا بودن نسبی تنش، اختلاف فرکانسی بهینه و

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل مودال و ارتعاشی ریل راه‌آهن باهدف بررسی و بهینه‌سازی رفتار دینامیکی آن، با استفاده از مدل‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار ANSYS انجام شد. به‌منظور دستیابی به نتایج قابل اتکا، مدل سه‌بعدی دقیقی از ریل در نرم‌افزار CAD طراحی و به نرم‌افزار اجزای محدود منتقل گردید تا اثر ابعاد هندسی بر ویژگی‌های ارتعاشی آن مورد بررسی قرار گیرد.

تحلیل‌ها در سه مود ارتعاشی اصلی شامل پیچشی، خمشی و ترکیبی صورت گرفت و برای هر حالت، مقادیر فرکانس طبیعی و اختلاف آن با فرکانس تحریک محاسبه شد. این اختلاف به‌عنوان

Acoustics, Vol. 169, Art. No. 107487, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.apacoust.2020.107487](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107487)

[6] R. Masoudi Nejad, K. Farhangdoost, and M. Shariati, "Three-dimensional simulation of rolling contact fatigue crack growth in UIC60 rails," *Tribology Transactions*, Vol. 59, No. 6, pp. 1059–1069, 2016, doi: [10.1080/10402004.2015.1130768](https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1130768)

[7] Q. Feng, B. Yan, X. Yang, and J. Li, "Long-term prediction of fatigue crack growth in ballastless track of high-speed railway due to cyclic train load," *Construction and Building Materials*, Vol. 292, Art. No. 123375, Jul. 2021, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.123375](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123375)

[8] V. Markine and C. Wan, "Performance optimised geometry of railway crossings: Design and implementation," *International Journal of Railway Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 1–25, 2016, doi: [10.4203/ijrt.5.2.1](https://doi.org/10.4203/ijrt.5.2.1)

[9] C. Wan, V. Markine, and R. Dollevoet, "Robust optimisation of railway crossing geometry," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 54, No. 5, pp. 617–637, 2016, doi: [10.1080/00423114.2016.1150536](https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1150536)

[10] N. Zong and M. Dhanasekar, "Minimization of railhead edge stresses through shape optimization," *Engineering Optimization*, Vol. 45, No. 9, pp. 1043–1060, Sep. 2013, doi: [10.1080/0305215X.2012.722684](https://doi.org/10.1080/0305215X.2012.722684)

[11] B. An, L. Gao, T. Xin, G. Xiu, and Z. Cai, "A novel approach of identifying railway track rail's modal frequency from wheel-rail excitation and its application in high-speed railway monitoring," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 180986–180997, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2959666](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959666)

[12] H. Fu, Y. Yang, and S. Kaewunruen, "Multi-hazard effects of crosswinds on cascading failures of conventional and interspersed railway tracks exposed to ballast washaway and moving train loads," *Sensors*, Vol. 23, No. 4, Art. No. 1786, Feb. 2023, doi: [10.3390/s23041786](https://doi.org/10.3390/s23041786)

[13] T. Axinte, "Finite elements analysis of the rail-wheel rolling contact," *Advanced Materials Research*, Vol. 1036, pp. 559–563, 2014, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.559](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.559)

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی و بهینه‌سازی نشان داد که تعیین دقیق ابعاد هندسی بهینه برای ریل، بسته به شرایط بارگذاری، نوع مود ارتعاشی و سرعت تحریک فرکانسی، متغیر بوده و نمی‌توان یک سطح مقطع واحد را به‌عنوان گزینه بهینه برای تمامی شرایط معرفی کرد. با این حال، بهره‌گیری از رویکردی سیستماتیک برای مدل‌سازی، تحلیل مودال، و بهینه‌سازی چندهدفه، امکان ارائه طیف مناسبی از ابعاد هندسی پیشنهادی را فراهم نموده است که می‌توانند در طراحی ریل‌ها با عملکرد ارتعاشی بهبودیافته و ضریب ایمنی بالاتر مورد استفاده قرار گیرند.

در مجموع، یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای توسعه طراحی‌های مبتنی بر بهینه‌سازی در صنعت ریلی مورد استفاده قرار گیرد و زمینه‌ساز کاهش اثرات ارتعاشی، افزایش دوام و بهبود عملکرد دینامیکی ریل‌های راه‌آهن در شرایط بهره‌برداری واقعی باشد.

۵- منابع

[1] M. A. Sayeed and M. A. Shahin, "Design of ballasted railway track foundations using numerical modelling. Part I: Development," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 55, No. 3, pp. 353–368, Mar. 2018, doi: [10.1139/cgj-2016-0683](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0683) (in Persian)

[2] Z. Zeng, Z. Wang, N. Zhang, Y. Wang, and J. Zhang, "Experimental investigation on the vibration reduction characteristics of an optimized heavy-haul railway low-vibration track," *Shock and Vibration*, Vol. 2019, Art. No. 1539564, Jun. 2019, doi: [10.1155/2019/1539564](https://doi.org/10.1155/2019/1539564)

[3] Z. Wei, I. Nuñez, A. Nuñez, R. Dollevoet, and Z. Li, "Wheel-rail impact at crossings: Relating dynamic frictional contact to degradation," *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 12, No. 4, Art. No. 041017, Jul. 2017, doi: [10.1115/1.4035649](https://doi.org/10.1115/1.4035649)

[4] M. Germonpré, L. Van Hoorebeeck, and G. Degrande, "Contributions of longitudinal track unevenness and track stiffness variation to railway induced vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 437, pp. 292–307, Dec. 2018, doi: [10.1016/j.jsv.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.09.027)

[5] J. Jin, L. Jiang, M. Sun, X. Li, and Y. Wen, "Development of tuned particle impact damper for reduction of transient railway vibrations," *Applied*



Real-time fault-tolerant controller of induction motors using optimized CNN-LSTM deep neural network based on vibration-acoustic data and proposed control algorithm

Abdolah Safari dehnavi^{*1} , Vahid Safari dehnavi²

1. Instructor, Department of Agriculture Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
2. Ph.D. Student, Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

Abstract

Predictive maintenance and speed control of rotating machines are crucial in modern industries due to the reduction of maintenance costs and the improvement of efficiency and reliability. This paper presents a method for fault diagnosis and speed control of induction motors. The proposed method employs two algorithms for fault diagnosis. In the first algorithm, a novel method for extracting statistical, frequency, and energy features is utilized, along with machine learning algorithms for fault classification. If the fault detection accuracy of the first algorithm is not suitable, the second algorithm is used. This algorithm utilizes a convolutional neural network (CNN) and an optimized long short-term memory (LSTM) model. In this network, feature extraction and selection are performed automatically. We present a new algorithm for optimizing layers and parameters through an adaptive ant colony algorithm and likelihood functions. The proposed methods are tested on three datasets. In the first dataset collected for this research, the focus is on the healthy state, bearing fault, and uncoupled condition. In the second dataset, we focus on the defects of the inner and outer rings of the bearing. In the third dataset, eight cases are considered, including seven cases with defects in the stator and rotor, and one healthy case. Vibration and acoustic data are used for fault diagnosis. Then, a control algorithm, including a fractional-order optimal control controller, is presented to control the motor speed, especially when it is under fault conditions. The results indicate that the first algorithm is suitable for the first and second datasets, while the second algorithm is more suitable for the third dataset.

Keywords

Preventive Maintenance
Speed Control
Machine Learning
Deep Neural Network
Vibration and Acoustic Data

Received: 11.07.2025

Revised: 19.08.2025

Accepted: 22.09.2025

*Corresponding Author

Abdolah Safari dehnavi

Email

asafari@tvu.ac.ir

1- Introduction

Motors are essential and functional components in various industries, including manufacturing, agriculture, and power systems. According to the World Energy Organization, in 2016, more than 50 percent of the world's electrical energy consumption was accounted for by motors. Despite improvements in motor efficiency, this percentage is expected to increase by 2040. Additionally, according to IEEE Standard 493, the average failure

rate of motors with a voltage of less than 1000 V is 8.24%. In the event of a motor failure, the time required to shut down and replace the motor is 42 to 75 hours [1]. In a survey of 75 factories, these factories had 100,114 motors, with an average of 1521 motors per factory [1]. According to the Niroo Research Institute, approximately 2 million motors are used in the Iranian industry, and around 60 million motors are used in the domestic sector.

How to Cite this Article:

[1] A. Safari Dehnavi and V. Safari Dehnavi, "Real-time fault-tolerant controller of induction motors using optimized CNN-LSTM deep neural network based on vibration-acoustic data and proposed control algorithm," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 113–138, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.533639.1144> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

Given the high price of motors, diagnosing motor faults is of great importance.

Due to their extensive use, motors are constantly exposed to various mechanical and electrical stresses that can lead to faults. These faults can arise from inherent problems or adverse operating conditions, leading to motor failure. As a result, if the fault is not detected in time, it will lead to further breakdowns and losses in the entire system. To improve performance, the issues of motor fault diagnosis and speed control have garnered the attention of experts and researchers in recent years [1, 2]. The importance of effective fault diagnosis and condition monitoring of motors cannot be overstated, as they play a vital role in minimizing damage, extending the device's life, increasing its availability, and reducing maintenance time and costs. Fault detection is important in preventing unexpected failures and preventing severe damage to the entire drive system. Condition monitoring of motors increases reliability and reduces maintenance costs [3]. The implementation cost is about \$200, considering the combination of modular software and hardware. Considering the cost of low-power industrial motors, which range from \$150 to \$200, it is cost-effective to diagnose and repair motors before they fail.

Additionally, this cost savings is further increased by reducing downtime in the event of a motor failure. Various components of a motor are susceptible to damage, and several factors, including overload, unbalanced loads, and mechanical stresses, can contribute to these conditions. As shown in Figure 1, motor failures are typically categorized into four main types: bearing failures, stator failures, rotor failures, and other types of failures [4]. Bearing problems are the most common type of failure among various types [5]. Studies conducted by General Electric and IEEE-IGA have shown that bearing failures are the leading cause of motor failure, highlighting the critical role of bearing failure detection in the monitoring of rotating machinery.

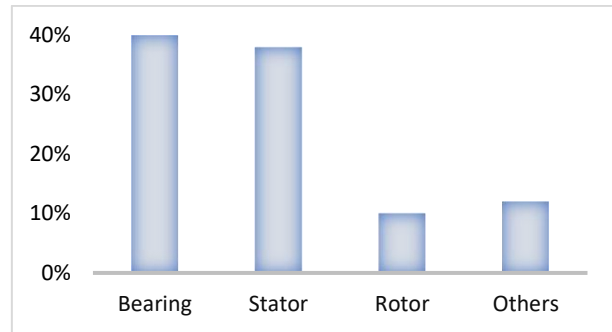


Figure 1: Percentage of motor faults.

2- Research Methods

This section introduces the proposed method for fault detection and speed control of motors. In this paper, we use three datasets with two different algorithms. In the first algorithm, we utilize feature extraction based on statistical, frequency, and energy features, along with automatic feature selection. In the second algorithm, we use automatic feature extraction. In this method, the dataset is first obtained, and then the channel selection process is performed. In this case, based on the type of faults, we select the appropriate data for the existing hardware equipment, ensuring that the detection accuracy is optimal and the detection is performed at the lowest cost.

The dataset collected in this study includes temperature, motor current, vibration, and acoustic signals. Then, we use vibration and acoustic data according to the faults, which in this study focus on mechanical faults. After that, we perform preprocessing, including notch filtering and wavelet transform. Then the window selection process is performed, and the segmented data is fed into the first algorithm. If the accuracy is not suitable, the second algorithm and the optimized deep neural network are used. The structure of the layers and parameters of this network are optimally determined using the adapted ant colony algorithm. Finally, the designed controller controls the motor's speed. For speed control, we used PWM and SPWM. In this case, two PID controllers and one optimal controller are used. In the initial stage, according to the principle of simplicity, the PID controller is used. Suppose the PID controller cannot control the speed correctly. In this case, a fractional-order optimal

controller is used to achieve the desired speed, which can be achieved by adjusting the adjustable voltage and current parameters. In the next stage, if a fault occurs in the motor, the second PID controller enters the control algorithm and tries to control the speed using the simplest controller.

3- Results

In datasets with low fault detection complexity, the first algorithm, which incorporates feature extraction and feature selection through classification using machine learning algorithms, yields good results. The first and second datasets were classified using the first algorithm; the execution time for this algorithm on one instance is less than 30 milliseconds. Initially, all features were used with the feature selection algorithm. In the next step, the number of features was reduced to two using the PCA method, and the results were satisfactory. Further reduction of features led to a sharp decrease in accuracy. In the third dataset, the complexity of fault detection is higher. The data were classified into two states: with and without load, at four different speeds, and in eight states, including one healthy state and seven faulty states. Machine learning algorithms were not suitable in this case, so a deep neural network was used instead. The classification result using the first vibration sensor was the best. The result is better if a combination of vibration and acoustic sensors is used. The results for fault detection based on the deep neural network are shown in Figure 2.

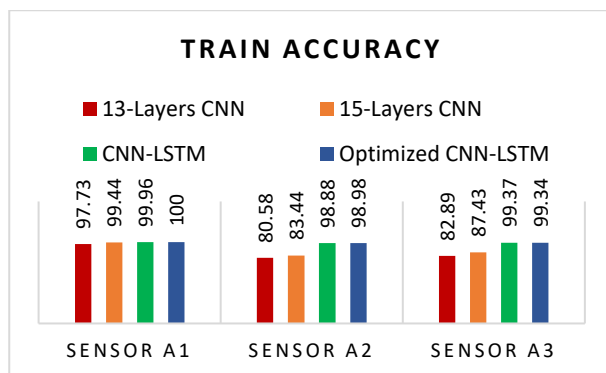


Figure 2: Comparison of deep neural networks

4- Conclusion

This paper presents a hybrid approach for fault detection and speed control of induction motors under different operating conditions. The results showed that the first classification algorithm, which uses feature extraction, feature selection, and machine learning algorithms, performs well on low-complexity datasets. The algorithm was trained on two datasets: the first contained two faults and one healthy state, and the second contained six faults and one healthy state. It reached the desired accuracy in a shorter time (average 2 seconds). However, the second algorithm, which utilizes CNN and LSTM deep neural networks, performed better on higher-complexity datasets that contain different loads and speeds. Optimizing the network structure and parameters using the adaptive ant colony algorithm significantly improved both detection accuracy and processing time.

Additionally, the combined use of vibration and acoustic data yielded higher fault detection accuracy. Additionally, the PID controller and the fractional-order optimal controller provided effective control over the motor speed under fault conditions. They were able to control the speed when a fault occurred effectively. The proposed method enhances the reliability of rotating systems, such as motors, reduces maintenance costs, and improves safety. As a result, this method can be used as an effective solution in the industry to improve the performance and safety of rotating machines.

5- References

- [1] V. S. Dehnavi and M. Shafiee, "Fault diagnosis of induction motors using novel measurement techniques and data fusion," *Measurement*, Vol. 256, Art. No. 118135, 2025, doi: [10.1016/j.measurement.2025.118135](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118135).
- [2] K. S. Krishna Veni and N. S. Kumar, "Diagnosis of bearing fault in induction motor using Bayesian optimization-based ensemble classifier," *Electrical Engineering*, Vol. 106, pp. 1895–1905, 2023, doi: [10.1007/s00202-023-02040-w](https://doi.org/10.1007/s00202-023-02040-w).

-
- [3] A. Almounajjed, A. K. Sahoo, and M. K. Kumar, "Condition monitoring and fault detection of induction motor based on wavelet denoising with ensemble learning," *Electrical Engineering*, Vol. 104, pp. 2859–2877, 2022, doi: [10.1007/s00202-022-01523-6](https://doi.org/10.1007/s00202-022-01523-6).
- [4] O. AlShorman *et al.*, "Sounds and acoustic emission-based early fault diagnosis of induction motor: A review study," *Advances in Mechanical*

Engineering, Vol. 13, Art. No. 168781402199691, 2021, doi: [10.1177/1687814021996915](https://doi.org/10.1177/1687814021996915).

- [5] V. S. Dehnavi and M. Shafiee, "Inner and outer bearing fault diagnosis of electrical motors using a proposed algorithm and vibration signals," in *Proc. 14th Int. Conf. Information and Knowledge Technology (IKT)*, 2023, pp. 175–180, doi: [10.1109/IKT62039.2023.10433018](https://doi.org/10.1109/IKT62039.2023.10433018)



کنترل کننده تحمل پذیر عیب بلادرنگ موتورهای القایی با استفاده از شبکه عصبی عمیق CNN-LSTM بهینه شده مبتنی بر داده های ارتعاش-آکوستیک و الگوریتم کنترل پیشنهادی

عبداله صفری دهنوی^۱، وحید صفری دهنوی^۲

۱- مربی، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق کنترل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

تعمیرات پیشگیرانه و کنترل سرعت ماشین های دوار به دلیل کاهش هزینه های نگهداری، بهبود کارایی و قابلیت اطمینان در صنایع مدرن حیاتی هستند. این مقاله روشی برای تشخیص عیب و کنترل سرعت موتورهای القایی ارائه می دهد. روش پیشنهادی از دو الگوریتم برای تشخیص عیب استفاده می کند؛ در الگوریتم اول، از یک روش نوین برای استخراج ویژگی های آماری، فرکانسی و انرژی و همچنین از الگوریتم های یادگیری ماشین برای کلاس بندی عیب استفاده می شود. اگر دقت تشخیص عیب الگوریتم اول مناسب نباشد، از الگوریتم دوم استفاده می شود. این الگوریتم از شبکه عصبی کانولوشنی (CNN) و حافظه کوتاه مدت بلند (LSTM) بهینه شده استفاده می کند. در این شبکه، استخراج و انتخاب ویژگی به طور خودکار انجام می شود. ما یک الگوریتم جدید برای بهینه سازی لایه ها و پارامترها از طریق الگوریتم تطبیق یافته کلونی مورچگان و توابع احتمال ارائه دادیم. روش های پیشنهادی روی سه مجموعه داده آزمایش شده اند. در مجموعه داده اول که در این پژوهش جمع آوری شده است، تمرکز بر حالت سالم، عیب یاتاقان و عدم کوپل صحیح هست. در مجموعه داده دوم، بر روی عیوب حلقه های داخلی و خارجی یاتاقان تمرکز می کنیم. در مجموعه داده سوم، هشت حالت شامل هفت عیب موجود در استاتور و روتور و یک حالت سالم، در نظر گرفته شده است و از داده های ارتعاش و آکوستیک برای تشخیص عیب استفاده شده است. سپس، یک الگوریتم کنترلی، شامل یک کنترل کننده کنترل بهینه مرتبه کسری برای کنترل سرعت موتور به ویژه هنگامی که تحت عیب است، ارائه می شود. نتایج نشان می دهد که الگوریتم اول برای مجموعه داده اول و دوم و الگوریتم دوم برای مجموعه داده سوم مناسب بود.

کلمات کلیدی

تعمیرات پیشگیرانه
کنترل سرعت
یادگیری ماشین
شبکه عصبی عمیق
داده های ارتعاش و آکوستیک

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

*نویسنده مسئول

عبداله صفری دهنوی

ایمیل

asafari@nus.ac.ir

۱- مقدمه

خاموشی و جایگزینی موتور هست [۱]. در بررسی ۷۵ کارخانه، این کارخانه ها دارای ۱۱۴،۱۰۰ موتور بودند که به صورت متوسط هر کارخانه ۱۵۲۱ موتور داشت [۱]. مطابق اعلام پژوهشگاه نیرو، در صنعت ایران حدود ۲ میلیون موتور مورد استفاده قرار می گیرند و در بخش خانگی حدود ۶۰ میلیون موتور مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به قیمت بالای موتورها، تشخیص عیب موتورها اهمیت بالایی دارد. به دلیل کاربرد گسترده، موتورها دائماً در معرض تنش های

موتورها اجزای اساسی و کاربردی در صنایع تولیدی، کشاورزی و سیستم های قدرت هستند. مطابق اعلام سازمان انرژی جهان در سال ۲۰۱۶، بیش از ۵۰ درصد مصرف انرژی الکتریکی جهان متعلق به موتورها هست و علیرغم بهبود بهره وری موتورها تا سال ۲۰۴۰ این درصد افزایش خواهد یافت. همچنین مطابق استاندارد ۴۹۳ IEEE، به صورت متوسط نرخ خرابی موتورهای با ولتاژ کمتر از ۱۰۰۰ ولت برابر با ۸/۲۴٪ هست و در صورت خرابی موتور، ۴۲ تا ۷۵ ساعت زمان

How to Cite this Article:

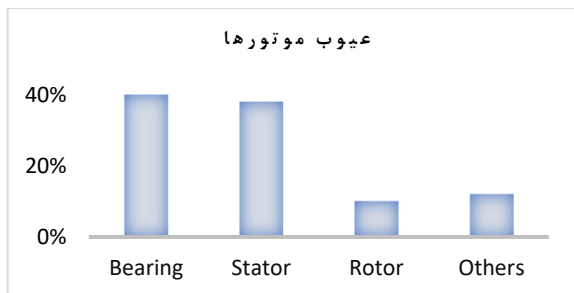
[1] A. Safari Dehnavi and V. Safari Dehnavi, "Real-time fault-tolerant controller of induction motors using optimized CNN-LSTM deep neural network based on vibration-acoustic data and proposed control algorithm," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 113-138, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.533639.1144> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیک: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

مختلف عیوب هستند [۵]. مطالعات انجام شده توسط شرکت جنرال الکتریک و IEEE-IGA نشان داده است که عیوب یاتاقان علت اصلی خرابی موتور هستند و این امر نقش حیاتی تشخیص عیب یاتاقان را در نظارت بر ماشین آلات دوار برجسته می کند.



شکل ۱: درصد عیوب موتور

۱-۱- مرور پیشینه

این بخش، پیشینه پژوهش را در سه بخش ارائه می دهد. ابتدا، مؤثرترین داده ها برای تشخیص عیوب مکانیکی و الکتریکی بررسی می شوند. مطالعات قبلی از دما، سیگنال های الکتریکی، شار، ارتعاش و سیگنال های آکوستیک برای تشخیص عیوب موتورها استفاده کرده اند. جدول ۱ داده های مناسب برای تشخیص هر نوع عیب و مزایا و معایب هر روش را برای انتخاب بهترین روش برای تشخیص هر نوع عیب مقایسه می کند. سپس روش های پردازش سیگنال زمانی، فرکانسی و زمانی-فرکانسی ارائه می شود. در نهایت، الگوریتم های کلاس بندی را معرفی می کنیم. این بخش الگوریتم های یادگیری ماشین و شبکه های عصبی عمیق را معرفی می کند که اخیراً در کاربردهای تشخیص عیب استفاده شده اند.

مکانیکی و الکتریکی مختلفی قرار دارند که می تواند منجر به عیب شود. این عیوب می توانند از مشکلات ذاتی یا شرایط عملیاتی نامطلوب ناشی شوند و به خرابی موتور منجر شوند. در نتیجه، اگر عیب به موقع تشخیص داده نشود، عیب ایجاد شده منجر به خرابی و تلفات بیشتر در کل سیستم می شود. برای بهبود عملکرد، موضوعات تشخیص عیب موتور و کنترل سرعت در سال های اخیر توجه متخصصان و محققان را به خود جلب کرده است [۲۱]. اهمیت تشخیص مؤثر عیب و پایش وضعیت موتورها را نمی توان نادیده گرفت، زیرا آن ها نقش حیاتی در به حداقل رساندن آسیب، افزایش عمر دستگاه، افزایش در دسترس بودن دستگاه و کاهش زمان و هزینه های نگهداری دارند. تشخیص عیوب در جلوگیری از خرابی های غیرمنتظره و جلوگیری از آسیب شدید به کل سیستم درایو مهم است. پایش وضعیت موتورها، قابلیت اطمینان را افزایش داده و هزینه های نگهداری را کاهش می دهد [۳]. هزینه پیاده سازی با توجه به ترکیب نرم افزار و سخت افزار ماژولار برابر با ۲۰۰ دلار هست؛ با توجه قیمت موتورهای توان پایین صنعتی که حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ دلار هست، تشخیص عیب و اصلاح موتورها قبل از خرابی آن ها صرفه اقتصادی دارد؛ به علاوه این صرفه جویی با کاهش زمان خاموشی در حالتی که موتور دچار عیب شود، بیشتر می شود. اجزای مختلف یک موتور مستعد آسیب هستند و عوامل مختلفی از جمله اضافه بار، بارهای نامتعادل و تنش های مکانیکی باعث ایجاد این شرایط می شوند.

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، عیوب موتور معمولاً به عیوب یاتاقان، عیوب استاتور، عیوب روتور و برخی عیوب دیگر تقسیم می شوند [۴]. مشکلات یاتاقان رایج ترین نوع در بین انواع

جدول ۱: داده های مورداستفاده برای تشخیص عیب

نوع داده های موتور	مناسب ترین عیوب قابل تشخیص	مزایا	معایب
تحلیل دما با حسگرهای ترموکوپل	الکتریکی	- استفاده آسان برای اندازه گیری دمای بدنه موتور - نرخ نمونه برداری پایین	- تشخیص زمانی که عیب گسترش یافته است - پیاده سازی دشوار برای هسته آهنی در کاربردهای صنعتی
دما با تصاویر حرارتی [۶]	الکتریکی	- استفاده آسان	- حسگر گران قیمت - تشخیص عیب تنها در مراحل که عیب پیشرفت داشته است
تحلیل الکتریکی (جریان و ولتاژ) [۷]	مکانیکی و الکتریکی	- کم هزینه (با استفاده از داده بردارهای فرکانس متوسط) - نصب ساده	- اثر بخشی محدود در تشخیص برخی عیوب مکانیکی مانند ناهم راستایی یا سایش تدریجی، به ویژه آن هایی که تأثیر کمی بر سیگنال های الکتریکی مانند جریان یا ولتاژ دارند
شار پراکنده [۸]	مکانیکی و الکتریکی	- غیر تهاجمی - کم هزینه	- وابستگی به نویز
ارتعاش [۹]	مکانیکی و الکتریکی	- وابستگی کم به نویز - تشخیص زود هنگام عیب	- داده بردارهای گران قیمت
آکوستیک [۱۰]	مکانیکی و الکتریکی	- تشخیص زود هنگام عیب	- وابستگی به نویز

شبکه‌های عصبی کانولوشنی دوبعدی: این مدل‌ها معمولاً برای داده‌های تصویری استفاده می‌شوند، اما با تبدیل داده‌های ارتعاش و آکوستیک به داده‌های دوبعدی، برای تشخیص عیب موتور نیز تطبیق داده شده‌اند. آن‌ها همچنین برای تشخیص عیب بر اساس تصاویر دمایی نیز استفاده می‌شوند. این شبکه‌ها ویژگی‌ها را از این تصاویر برای کلاس‌بندی عیب‌ها استخراج می‌کنند. بر اساس مطالعات ارائه‌شده، این شبکه‌ها دقت مناسبی از ۸۸/۳٪ تا ۹۹/۹٪ را در تشخیص انواع مختلف عیب موتورها نشان داده‌اند [۲۱-۲۳]. یکی از محدودیت‌های این شبکه‌ها ساختارهای پیچیده و نیاز به محاسبات زمان‌بر هست.

شبکه‌های عصبی کانولوشنی یک‌بعدی: این مدل‌ها برای پردازش سیگنال‌های یک‌بعدی طراحی شده‌اند. آن‌ها معمولاً از نظر محاسباتی ساده‌تر از شبکه‌های عصبی کانولوشنی دوبعدی هستند و همین امر آن‌ها را برای مجموعه داده‌های بزرگ مناسب می‌کند. این شبکه‌ها با تجزیه و تحلیل سیگنال‌های ارتعاش از چندین حسگر یا محورهای مختلف داده‌های شتاب‌سنج، با موفقیت در تشخیص عیب موتورها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۴-۲۶]. تعیین لایه‌ها و پارامترهای این شبکه‌ها بسیار مهم است و در برخی از مجموعه داده برای استفاده در سری‌های زمانی به اندازه کافی دقیق نیستند.

شبکه‌های عصبی بازگشتی و LSTM: این مدل‌ها به‌طور خاص برای تعیین همبستگی در داده‌های متوالی طراحی شده‌اند. آن‌ها شامل مکانیسم‌های مناسبی برای مدیریت مؤثر وابستگی‌های بلندمدت در داده‌ها هستند. این شبکه‌ها همچنین برای تشخیص عیب موتورها استفاده می‌شوند و در کاربردهای مختلف، از جمله تشخیص عیب با استفاده از داده‌های ارتعاش و تصاویر حرارتی به دقتی از ۸۸٪ تا ۱۰۰٪ دست می‌یابند [۲۷-۲۹].

جدول ۲ مقایسه‌ای از روش‌های ارائه‌شده در مقاله‌ها برای تشخیص عیب و مزایا و معایب آن‌ها را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، ساختار برخی از شبکه‌ها به‌صورت تجربی یا بر اساس تجربه متخصصان انسانی به دست آمده است و ارائه روشی که بتواند به یافتن خودکار ساختار مناسب برای هر مسئله استفاده شود، مفید است.

سیگنال‌های الکتریکی برای تشخیص عیوب الکتریکی و مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، منتها غالباً اثربخشی آن‌ها برای تشخیص عیوب الکتریکی و برخی از عیوب مکانیکی خاص نشان داده شده است [۱۱]؛ از جمله عیوبی که به‌صورت مؤثر با استفاده از سیگنال جریان قابل تشخیص هستند، می‌توان به عیوب اتصال کوتاه، عیب میله شکسته روتور و عیوب عایقی اشاره کرد [۱۲]. سیگنال‌های تولیدشده توسط حسگرهای دما، ارتعاش و آکوستیک را می‌توان به‌عنوان داده‌های سری زمانی در نظر گرفت. تکنیک‌های مختلف حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس معمولاً برای استخراج ویژگی‌ها از این سیگنال‌ها استفاده می‌شوند. در حوزه زمان، روش‌های استخراج ویژگی مانند محاسبات جذر میانگین مربعات و رویکردهای آماری استفاده می‌شوند [۱۳]. تکنیک‌های دامنه و تحلیل طیفی در حوزه فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. روش‌های حوزه زمان-فرکانس، مانند تبدیل موجک، تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل هیلبرت نیز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵]. تحلیل حوزه زمان روشی ساده برای ارزیابی سلامت موتور ارائه می‌دهد و آن را به روشی در دسترس تبدیل می‌کند. از سوی دیگر، تکنیک‌های حوزه فرکانس می‌توانند فرکانس‌های خاص عیب را به دلیل عدم حساسیت ذاتی به نویز، بدون نیاز به دانش قبلی از ویژگی‌های عیب، از نویز جدا کنند [۱۶]. با این حال، تحلیل حوزه فرکانس برای سیگنال‌های غیرایستا که معمولاً در عمل با آن‌ها مواجه می‌شویم، مناسب نیست. این محدودیت توسط تحلیل زمان-فرکانس برطرف می‌شود که به‌طور مؤثر سیگنال‌های ایستا و غیرایستا را مدیریت می‌کند و آن را به‌طور فزاینده‌ای محبوب می‌کند [۱۷]؛ بنابراین، این پژوهش از تحلیل‌های حوزه زمان و زمان-فرکانس استفاده می‌کند. در [۱۸] یک ساختار رهبر-پیرو برای جمع‌آوری داده‌های بیولوژیکی استفاده می‌شود، در این مقاله با توسعه ایده ساختار ارائه‌شده به جمع‌آوری داده‌های چند سنسوری می‌پردازد.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های یادگیری عمیق به‌طور مؤثر برای تشخیص عیب در موتورها استفاده شده‌اند. روش‌های مورد استفاده برای تشخیص عیب در زیر ارائه شده‌اند:

الگوریتم‌های یادگیری ماشین: این الگوریتم‌ها برای تشخیص عیب‌های مکانیکی و الکتریکی مانند یاتاقان‌ها استفاده شده‌اند. با این حال، دقت آن‌ها زمانی که مجموعه داده مورد استفاده انواع مختلفی از عیب را داشته باشد، نامناسب است [۱۹ و ۲۰].

جدول ۲: روش‌های تشخیص عیب

نویسندگان	روش	معایب
چویا و همکاران [۳۰]، گائو و همکاران [۳۱]	شبکه عصبی کانولوشنی یک‌بعدی	وابستگی به متخصص انسانی [۳۲]
وانگ و همکاران [۳۳]	شبکه عصبی کانولوشنی دو‌بعدی	وابستگی به متخصص انسانی [۳۲]
چن و همکاران [۳۴]	شبکه عصبی کانولوشنی یک‌بعدی	استخراج نامناسب ویژگی‌ها [۳۲]
شارما و همکاران [۳۵]	شبکه عصبی کانولوشنی دو‌بعدی	استخراج نامناسب ویژگی‌ها [۳۲]
ژائو و همکاران [۳۶]	شبکه عصبی کانولوشنی یک‌بعدی	عملکرد ضعیف در شرایط کاری مختلف شامل سرعت‌ها، بارها و نوع سنسورهای متفاوت

۲-۱- نوآوری و ساختار مقاله

استفاده از روش‌های یادگیری عمیق، دقت و کارایی تشخیص عیب در موتورها را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد و در نتیجه به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمک می‌کند. در این مقاله، شبکه‌های عصبی کانولوشنی یک‌بعدی با LSTM در یک ساختار عصبی عمیق ترتیبی ترکیب شده‌اند تا عملکرد سیستم‌های تشخیص عیب را بهبود بخشند. در این ساختار، ورودی شبکه شامل سیگنال‌های ارتعاش و آکوستیک دریافتی از موتور است و خروجی شبکه نوع عیب موتور را نشان می‌دهد. یکی از جنبه‌های مهم شبکه‌های عصبی عمیق، تعیین ساختار لایه‌ها، تعداد لایه‌های مورد استفاده و پارامترهای هر لایه است. این مقاله روشی را از طریق الگوریتم تطبیق‌یافته کلونی مورچگان برای تعیین خودکار ساختار بهینه برای شبکه‌های عصبی عمیق ارائه می‌دهد. همچنین این پژوهش، روشی ترکیبی مبتنی بر کنترل بهینه مرتبه کسری با ترکیب با کنترل‌کننده PID ارائه می‌دهد. در ساختار کنترل پیشنهادی، کنترل‌کننده PID کنترل ولتاژ-فرکانس را انجام می‌دهد. اگر سرعت با ریزل به‌دقت مناسبی نرسد، از کنترل‌کننده مکمل بهینه برای کاهش ریزل با کنترل ولتاژ استفاده می‌شود. در این کنترل‌کننده، سرعت و جریان‌های موتور وارد واحد کنترل می‌شوند و ولتاژ خروجی اضافی به ولتاژ اصلی اضافه می‌شود تا وضعیت سرعت موتور بهبود یابد.

ترکیب تشخیص عیب و کنترل سرعت در سیستم‌های مدرن موتور-محور برای افزایش قابلیت اطمینان و عملکرد بسیار مهم است. تشخیص عیب امکان تشخیص شرایط غیرعادی در موتور را فراهم می‌کند، در حالی که کنترل سرعت به سیستم انعطاف‌پذیری لازم برای تنظیم تطبیقی رفتار موتور در پاسخ به این عیوب را می‌دهد. این رویکرد ترکیبی از آسیب و خرابی احتمالی جلوگیری می‌کند و کارایی کلی سیستم را بهبود می‌بخشد.

علاوه بر این، استفاده از تکنیک‌های کنترل تحمل‌پذیر عیب تضمین می‌کند که سیستم می‌تواند عملکرد پایدار خود را حتی در صورت بروز عیب یا اغتشاش بدون کاهش قابل‌توجه عملکرد حفظ کند [۳۷-۳۹] که در این مقاله، با در نظر گرفتن پیشینه، سیستم‌های بهبود یافته ارائه می‌شود. روش‌های کنترل تحمل‌پذیر عیب به موتور اجازه می‌دهند تا به‌صورت کارآمد به کار خود ادامه دهد و اثرات عیوب را جبران کند. این رویکرد به ویژه در کاربردهای صنعتی که حفظ عملکرد مداوم ضروری است و با هدف کاهش زمان از کارافتادگی و هزینه‌های نگهداری انجام می‌شود، ارزشمند است. این ترکیب از تشخیص عیب، کنترل سرعت تطبیقی و تکنیک‌های کنترل تحمل‌پذیر عیب، یک راه‌حل قدرتمند برای مدیریت عیب در موتورها است و به بهبود تاب‌آوری و طول عمر آن‌ها کمک می‌کند.

کنترل‌کننده ارائه‌شده یک روش کنترل ترکیبی شامل کنترل بهینه و کنترل PID هست. در این کنترل‌کننده، شرایط مطلوب با کمینه ولتاژ ورودی که باعث جلوگیری از آسیب به موتور شود، انجام می‌شود.

روش پیشنهادی یک روش دو مرحله‌ای بلادرنگ هست؛ این کنترل‌کننده دو بخشی به‌صورت موازی عمل می‌کند و در صورتی که یک از کنترل‌کننده‌ها خراب شود، کنترل موازی اصلاح را انجام می‌دهد. این روش، یک رویکرد کنترل تحمل‌پذیر عیب هست که هم در زمانی که موتور سالم هست و هم در زمان عیب، کنترل را به خوبی انجام می‌دهد. همچنین به‌منظور در نظر گرفتن مزایای کنترل مقاوم، از پیش‌پردازش و حذف اغتشاش و نویز استفاده شد.

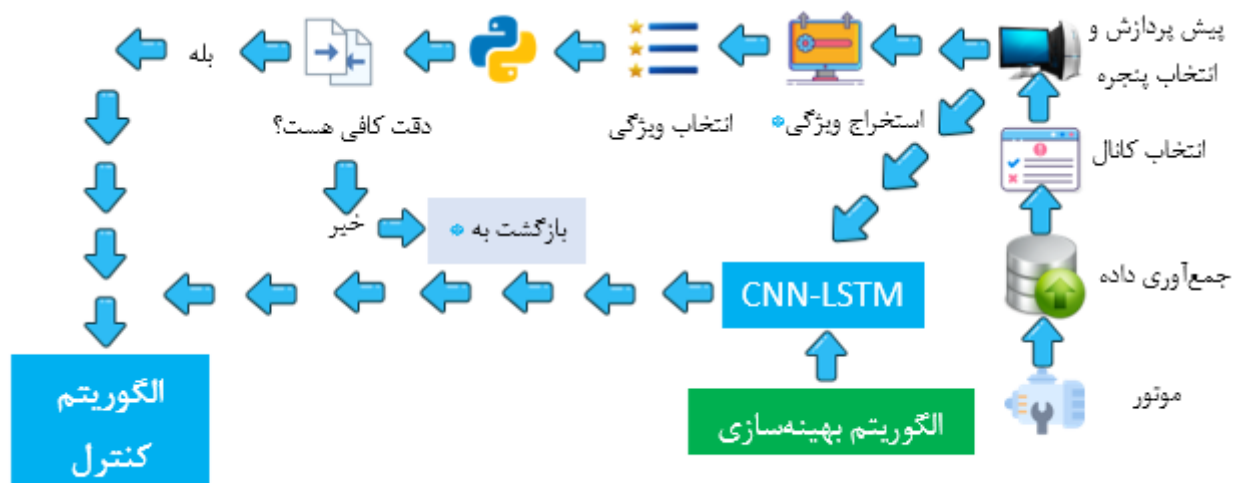
ساختار مقاله به شرح زیر است:

بخش ۲ روش پیشنهادی برای تشخیص عیب و کنترل سرعت را ارائه می‌دهد. این بخش دو الگوریتم را ارائه می‌دهد: الگوریتم اول از یادگیری ماشین برای تشخیص عیب استفاده می‌کند و الگوریتم دوم از یک شبکه عصبی عمیق بهبود یافته استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۳ و نتیجه‌گیری در بخش ۴ ارائه شده است.

۲- روش پیشنهادی

این بخش روش پیشنهادی برای تشخیص عیب و کنترل سرعت موتورها را معرفی می کند. در این مقاله، از سه مجموعه داده با دو الگوریتم متفاوت استفاده می کنیم. در الگوریتم اول، از استخراج ویژگی از طریق ویژگی های آماری، فرکانسی و انرژی و انتخاب خودکار ویژگی استفاده می کنیم. در الگوریتم دوم، از استخراج خودکار ویژگی استفاده

می کنیم. فرآیند تشخیص عیب در شکل ۲ نشان داده شده است. در این روش، ابتدا مجموعه داده به دست می آید و سپس فرآیند انتخاب کانال انجام می شود. در این حالت، با توجه به نوع عیوب، داده های مناسب برای تجهیزات سخت افزاری موجود را طبق جدول ۱ انتخاب می کنیم تا دقت تشخیص مناسب باشد و این تشخیص با کمترین هزینه انجام شود.



شکل ۲: روش پیشنهادی

می توان به آن دست یافت. در مرحله بعد، اگر عیبی در موتور رخ دهد، کنترل کننده PID دوم وارد الگوریتم کنترل می شود و سعی می کند سرعت را با استفاده از ساده ترین کنترل کننده کنترل کند.

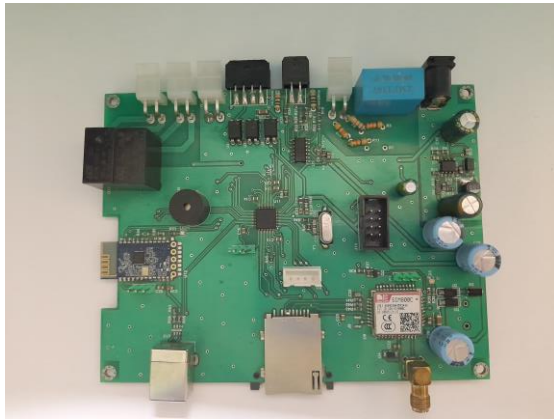
۲-۱- مجموعه های داده مورد استفاده

در این مقاله، ما از سه مجموعه داده برای بررسی الگوریتم های پیشنهادی استفاده کردیم. مجموعه داده اول شامل داده های موتور القایی با توان $3/4$ اسب بخار و جریان نامی $4/1$ آمپر در سرعت های ۹۵۰ و ۱۴۲۵ دور بر دقیقه، ولتاژ ۲۲۰ ولت و کلاس عایق B است. مجموعه داده شامل سه حالت عیب یا ناقص، عدم کوپل صحیح و حالت سالم است. سیگنال های ارتعاشی با استفاده از شتاب سنج با حساسیت $0/3125 \text{ V/g}$ با پهنای باند تا ۳۰۰۰ هرتز و دامنه $\pm 16 \text{ g}$ و سیگنال های آکوستیک با سنسور آکوستیویته $(-37 \text{ dBV/Pa} \text{ تا } -39 \text{ dBV/Pa})$ و نویز ذاتی $65 \text{ dBV/Pa} (A - \text{weighted @ } 94 \text{ dB SPL})$

جمع آوری شده اند، برای ثبت داده از ست آپ ارائه شده در [۱] استفاده شده است. نرخ نمونه برداری سیگنال ها $44/1$ کیلوهرتز است و هر حالت شامل مجموعه ای از داده های زمان-فرکانس می باشد که قابلیت

مجموعه داده های جمع آوری شده در این پژوهش شامل دما، جریان موتور، ارتعاش و سیگنال های آکوستیک است. پس از آن، متناسب با عیوب که در این پژوهش تمرکز بر عیوب مکانیکی هست، از داده های ارتعاش و آکوستیک استفاده می کنیم. پس از آن، پیش پردازش شامل فیلتر ناچ و تبدیل موجک را انجام می دهیم. سپس فرآیند انتخاب پنجره انجام می شود و داده های بخش بندی شده، به الگوریتم اول وارد می شوند. در صورت عدم مناسب بودن دقت، از الگوریتم دوم و از شبکه عصبی عمیق بهینه شده استفاده می شود. ساختار لایه ها و پارامترهای این شبکه با استفاده از الگوریتم تطبیق داده شده کلونی مورچگان به صورت بهینه تعیین می شوند. در نهایت، کنترل کننده طراحی شده سرعت موتور را کنترل می کند. برای کنترل سرعت، از PWM و SPWM استفاده کردیم. در این حالت، از دو کنترل کننده PID و یک کنترل کننده بهینه استفاده می شود. در مرحله اولیه، طبق اصل سادگی، از کنترل کننده PID استفاده می شود. در صورتی کنترل کننده PID نتواند سرعت را به درستی کنترل کند. در آن صورت، از کنترل کننده بهینه مرتبه کسری برای دستیابی به سرعت مناسب استفاده می شود که با تنظیم پارامترهای ولتاژ و جریان قابل تنظیم

سیگنال‌های دیجیتال و آنالوگ و قابلیت اتصال به کامپیوتر از طریق USB و بلوتوث را دارد. پس از اتصال به کامپیوتر، دستورات توقف عملکرد موتور از طریق نرم‌افزار MATLAB ارسال می‌شود و در صورت نیاز، این برد عملکرد موتور را متوقف می‌کند.



شکل ۴: برد کنترلی استفاده‌شده

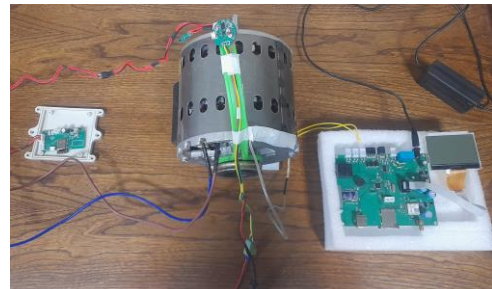
در مجموعه داده دوم از داده‌های [۴۰] استفاده می‌کنیم و بر عیوب یاتاقان تمرکز می‌کنیم و در مجموعه داده سوم [۴۱]، طیف جامع‌تری از عیوب بررسی شده است. در مجموعه داده دوم، فرکانس نمونه‌برداری ۲۵/۶ کیلوهرتز است. طبق فرآیند جمع‌آوری داده‌ها، سیگنال‌های موتور سالم در بسته‌های ۱۲۰ ثانیه‌ای ثبت شده‌اند، درحالی‌که سیگنال‌های موتورهای معیوب در بسته‌های ۶۰ ثانیه‌ای ثبت شدند. در این مجموعه داده، سه حالت خطای ۰/۳ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر برای حلقه‌های داخلی و خارجی عیوب یاتاقان در نظر گرفته شده است و این عیوب در بارهای ۲ و ۴ نیوتن متر بررسی و ثبت شده‌اند. در مجموعه داده سوم، فرکانس نمونه‌برداری ۴۲ کیلوهرتز است، ضربه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه انجام شد و هفت عیب در این حالت بررسی شده است. در این مجموعه داده‌ها، مجموعه‌ای متنوع از عیوب مکانیکی و الکتریکی شامل عیوب عدم تعادل روتور، شکستگی میله‌های روتور، ناهمراستایی روتور، روتور خمیده، یاتاقان‌های معیوب، سیم‌پیچ استاتور، عدم تعادل ولتاژ و تک فاز شدن در شرایط تحت بار و بی‌باری و در چهار سرعت مختلف در نظر گرفته شده است.

۲-۲- پیش‌پردازش

هدف ما در پیش‌پردازش سیگنال‌های ارتعاشی، افزایش کیفیت آن‌هاست. برای دستیابی به این هدف، از فیلترهای ناچ، موجک و روش‌های آماری استفاده می‌کنیم. این روش‌ها به‌طور خاص برای حذف نویز و اختلال ناخواسته از سیگنال طراحی شده‌اند و در نتیجه کیفیت کلی آن را بهبود می‌بخشند. فرکانس برق شهر با استفاده از یک فیلتر

تحلیل عیوب مکانیکی و شبیه‌سازی شرایط عملیاتی مختلف را فراهم می‌آورد. نرخ نمونه‌برداری ۴۴/۱ کیلوهرتز با توجه به نیازهای مقاله در تشخیص عیب انتخاب شده است. عیوب یاتاقان و عدم کوپل صحیح باعث ایجاد ضربه‌هایی در سیگنال‌های آکوستیک و ارتعاش در فرکانس‌های بالا می‌شوند که با جمع‌آوری این سیگنال‌ها می‌توان تشخیص عیب و همچنین مکان وقوع عیب را با دقت بالاتری تشخیص داد. این فرکانس‌ها به‌وسیله تبدیل موجک و تحلیل بسته‌های موجک استخراج می‌شوند. در این مقاله، به‌منظور استفاده هم‌زمان و مؤثر از سیگنال‌های آکوستیک و ارتعاش، نیاز به یکسان‌سازی فرکانسی داریم. در صورت یکسان نبودن سیگنال‌ها نیاز به توسعه روش‌های یکسان‌سازی فرکانسی از جمله روش‌های درون‌یابی اسپلاین هست. به‌علاوه، استفاده از سخت‌افزار با قابلیت ثبت سیگنال‌های فرکانس بالا می‌تواند منجر به انعطاف برای تشخیص سایر عیوب شود.

تصویر موتورهای استفاده‌شده برای ثبت داده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این حالت، از یک برد به همراه سنسور ترموکوپل برای ثبت دمای بدنه، برد فرکانس بالا ۸ کانال، سنسور ارتعاش و آکوستیک استفاده می‌شود. به‌منظور ثبت داده‌های ارتعاش، دسته موتور به بدنه ثابت می‌شود و سنسور به دسته موتور متصل می‌شود.



شکل ۳: موتورهای ارائه‌شده در مجموعه داده اول

به‌منظور جمع‌آوری داده دمایی برای تشخیص اولیه عیب، تحلیل داده لبه‌ای روی برد و ارسال دستورات کنترلی بلادرنگ برای ورود الگوریتم کنترلی تکمیلی یا توقف عملکرد موتور از برد ارائه‌شده در شکل ۴ استفاده می‌شود. این برد دارای رله‌های روی برد، قابلیت پردازش

$$H_p = - \sum_{i=1}^{N_p} \frac{|w_{p,i}|^2}{\|w_p\|^2} \ln \left(\frac{|w_{p,i}|^2}{\|w_p\|^2} \right) \quad (5)$$

با استفاده از (۵)، رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$\tilde{w}_{p,i} = \text{sign}(w_{p,i}) \max\{|w_{p,i}| - \beta_{p,i} \sigma_p, 0\}, \beta_{p,i} = \frac{\sigma_p^2}{|w_{p,i}|^2 + \epsilon} \quad (6)$$

که در آن، σ_p تخمین نویز مناسب $(|w_p = \text{finest}|)/0.6745k$ و $1 \ll \epsilon$ هست. این روش، اتلاف انرژی را به حداقل می‌رساند که منجر به موازنه بایاس-واریانس $\mathbb{E}[(w_{p,i} - \tilde{w}_{p,i})^2]$ می‌شود. برای انتخاب موجک مادر ψ_0 و پارامترهای مقیاس θ ، معادله (۷) را حل می‌کنیم. برای انتخاب موجک مادر ψ_0 و پارامترهای مقیاس θ ، معادله زیر را حل می‌کنیم:

$$\min_{\theta} \lambda_3 \text{Kurt}(w(\theta))^{-1} + \lambda_4 \text{RE}(x, \tilde{x}(\theta)) \quad (7)$$

که در آن $\text{Kurt}(w) = \mathbb{E}[w^4]/(\mathbb{E}[w^2])^2 - 3$ باعث افزایش پاسخ ضربه‌ای در $w = \mathcal{W}_{\theta}(x)$ می‌شود. در این روش، $\tilde{x}(\theta)$ تبدیل معکوس ضرایب حذف نویز است. با ترکیب موارد ارائه‌شده به صورت (۸)، هدف پیش‌پردازش به صورت مؤثر انجام می‌شود.

$$\min_{\theta, P} \underbrace{\int_{\Omega_{\text{pass}}} |H_{\text{notch}}(e^{j\omega}; \mathbf{h}) - 1|^2 d\omega}_{\text{notch-ripple}} + \lambda_1 \sum_{p \in P} \text{RE}_p + \lambda_2 \sum_{p \in P} H_p + \lambda_3 \text{Kurt}(w(\theta))^{-1} + \lambda_4 \text{RE}(x, \tilde{x}(\theta)) \quad (8)$$

با توجه به نرخ نایکوئیست، بالاترین فرکانسی که می‌توانیم بدون اعوجاج در داده‌های دیجیتال داشته باشیم $22/0.5$ کیلوهرتز هست، همچنین به منظور حذف سیگنال‌های اغتشاش که فرکانس پایین هستند، داده‌های ۱۰ هرتز تا $22/0.5$ کیلوهرتز را مورد تحلیل قرار می‌دهیم؛ بدین منظور، نیاز به استفاده از موجک db8 و سطح تجزیه ۱۱ هست، در این حالت جزء تقریب A_{11} حذف و اجزای جزئیات $D_1 - D_{11}$ بازسازی می‌شوند که بازه فرکانسی موردنظر را می‌دهد؛ همچنین به منظور کاهش نویز فرکانس بالا، روی $D_1 - D_2$ آستانه‌گذاری نرم به کار رفته است.

۲-۳- انتخاب پنجره

انتخاب یک پنجره مناسب منوط به پیکربندی بهینه اندازه و موقعیت پنجره است که برای الگوریتم‌های به کار رفته در پردازش سیگنال ضروری است. این روش با در نظر گرفتن ویژگی‌های سیگنال، به دنبال

ناچ در مجموعه داده‌ها حذف می‌شود. مجموعه داده اول در ایران ثبت‌شده که دارای فرکانس برق ۵۰ هرتز، مجموعه داده دوم در کره جنوبی و مجموعه داده سوم در کانادا ثبت‌شده‌اند و هر دو فرکانس ۶۰ هرتز دارند. در این بخش فرآیند پیش‌پردازش ارائه می‌شود:

در این بخش، $x(t)$ سیگنال ارتعاش جمع‌آوری‌شده از موتور می‌باشد که به صورت (۱) نشان داده می‌شود.

$$x(t) = s(t) + n(t) + \eta(t) \quad (1)$$

که در آن $s(t)$ مؤلفه ساختاری سیگنال، $n(t)$ تداخل باند باریک برای حذف اغتشاش فرکانس برق و $\eta(t)$ نویز با مشخصات $\mathbb{E}[\eta] = 0, \text{Var}[\eta] = \sigma^2$ است. ما $n(t)$ را با طراحی یک فیلتر ناچ مرتبه دوم IIR به نام $H_{\text{notch}}(z)$ که ضرایب آن $h = \{h_0, h_1, h_2\}$ است و در (۲) صدق می‌کند، حذف می‌کنیم.

$$\min_{\mathbf{h}} \int_{\omega \in \Omega_{\text{pass}}} |H_{\text{notch}}(e^{j\omega}; \mathbf{h}) - 1|^2 d\omega \quad \text{s.t.} \quad H_{\text{notch}}(e^{j\omega_0}; \mathbf{h}) = 0 \quad (2)$$

که برای فرکانس ۶۰ هرتز، $\omega_0 = 2\pi \cdot 60/f_s$ است. همچنین Ω_{pass} باند تشخیصی را پوشش می‌دهد. در نتیجه (۳) را به دست می‌آوریم.

$$H_{\text{notch}}(z) = \frac{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2r\cos(\omega_0)z^{-1} + r^2z^{-2}} \quad (3)$$

سپس با حل $\min_r \int_{\Omega_{\text{pass}}} |H(e^{j\omega}) - 1|^2 d\omega$ ، $r \in (0, 1)$ انتخاب می‌شود. در مرحله بعد، تجزیه موجک گسسته را انجام می‌دهیم؛ در این حالت، اگر $\mathcal{D} = \{\psi_{\theta}\}$ کتابخانه‌ای از موجک‌های تحلیلی $\psi_{\theta}(t) = s^{-1/2}\psi_0((t - \tau)/s)$ با پارامترهای $\theta = (s, \tau)$ باشد، آنگاه ضرایب $w_p[k] = \langle x, \psi_{p,k} \rangle$ برای گره p در موقعیت k تا سطح J محاسبه می‌شوند. در این حالت، یک زیرمجموعه بهینه از گره‌های $P \subset \{1, \dots, P\}$ را با به حداقل رساندن معیار ترکیبی (۴) را انتخاب می‌کنیم.

$$J(P) = \lambda_1 \sum_{p \in P} \text{RE}_p + \lambda_2 \sum_{p \in P} H_p \quad (4)$$

که در آن $\text{RE}_p = \|w_p - \tilde{w}_p\|^2$ خطای بازسازی است و (۲) آنتروپی شانون گره p است. برای حذف نویز هر ضریب $w_{p,i}$ ، انقباض واریانس وزن‌دار (۴) را معرفی می‌کنیم.

$$x_m[n] = x[n + mH]w[n; \theta^*] \quad (۱۴)$$

۲-۴- الگوریتم اول

هدف این الگوریتم دستیابی به دقت کلاس بندی مناسب با استفاده از الگوریتم های استخراج و انتخاب ویژگی و یادگیری ماشین است. اگر دقت کلاس بندی اولیه کمتر از معیارهای موردنظر باشد، فرآیند انتخاب ویژگی و کلاس بندی را تکرار می کنیم. این فرآیند تکراری ما را قادر می سازد تا الگوریتم را به طور مداوم اصلاح و بهبود بدهیم تا به دقت مطلوب برسیم. این الگوریتم شامل مراحل و بخش های مختلفی است که در بخش زیر مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۴-۱ استخراج و انتخاب ویژگی

ما از ویژگی های آماری، آنتروپی شانن، انرژی سیگنال، فرکانسی و مقادیر حداکثر و حداقل مطابق با (۱۵) در یک پنجره برای کلاس بندی حالت های مختلف سیگنال استفاده کردیم.

$$\begin{cases} f_1 = \log \left(\left| \frac{1}{N} \sum_i x_i \right| + \varepsilon \right) \\ f_2 = \log \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x_i - \mu)^2} + \varepsilon \right) \\ f_3 = \min(\log|x_i| + \varepsilon), f_4 = \max(\log|x_i| + \varepsilon) \\ f_{5,6} = \log \left(\left| \frac{1}{N} \sum_i (x_i - \mu)^k \right| + \varepsilon \right), k = 3, 4 \\ f_7 = - \sum_i S_j \times \log(S_j + \varepsilon) \\ f_8 = \sum_{n/2} \log(S_j^2) + \sum_{n/2} \log(S_j^2) \\ f_9 = \log \left(\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 + \varepsilon \right) \\ f_{10} = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{|X[k]|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2} \right) \cdot \log \left(\frac{|X[k]|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2} + \varepsilon \right) \\ f_{11} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} k |X[k]|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2} \\ f_{12} = \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (k - f_{11})^2 |X[k]|^2}}{\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2} \end{cases} \quad (۱۵)$$

با تجزیه و تحلیل این ویژگی ها، می توانیم اطلاعات معناداری را از سیگنال استخراج کرد و از آن برای شناسایی عیوب استفاده کنیم. ما سیگنال ها را بر اساس طول پنجره تقسیم می کنیم تا اطلاعات موردنظر برای استخراج ویژگی را به دست آوریم. این فرآیند تقسیم بندی تضمین می کند که هر بخش حاوی داده های کافی برای تجزیه و تحلیل دقیق است. پس از پنجره بندی، ویژگی های معادله (۱۵) برای هر پنجره محاسبه می شوند. پس از آن، از روش زیر برای انتخاب ویژگی های مؤثر استفاده می کنیم:

بهینه سازی تعادل بین اندازه پنجره و رزولوشن فرکانس است. یک پنجره بزرگ ممکن است رزولوشن فرکانسی بهتری ایجاد کند ولی به قیمت کاهش رزولوشن زمانی. در مقابل، یک پنجره کوتاه تر ممکن است رزولوشن زمانی بهبود یافته را بدهد ولی این اقدام با از دست دادن رزولوشن فرکانسی همراه است. در زیر الگوریتم انتخاب پنجره تطبیقی ارائه می شود:

اگر $x[n]$ دنباله سیگنال ارتعاشی گسسته باشد که با نرخ f_s نمونه برداری شده است و $w[n; \theta]$ یک پنجره پارامتری با طول L باشد، که از دنباله های پرولیت سفروئیدال گسسته^۱ یا از پنجره های کایزر با پارامتر β باشد. در این حالت، ما به دنبال به حداکثر رساندن تمرکز فرکانس تحت یک محدودیت زمانی ثابت با حل معادله (۹) هستیم.

$$\max_{\theta=(L,\beta)} C(\theta) \text{ where } C(\theta) = \frac{\sum_{k=-K}^K |W(e^{j2\pi k/N}; \theta)|^2}{\sum_{k=-N/2}^{N/2-1} |W(e^{j2\pi k/N}; \theta)|^2} \quad (۹)$$

که در آن:

$$W(e^{j\omega}; \theta) = \sum_{n=0}^{L-1} w[n; \theta] e^{-j\omega n}, K = [W_{\text{cut}} N / (2\pi)] \quad (۱۰)$$

W_{cut} لبه باند عبور برای هارمونیک های عیب هست. برای پنجره های در نظر گرفته شده، $w[n; L, W_{\text{band}}], C(\theta)$ به بزرگ ترین مقدار ویژه ماتریس توپلیتز کاهش می یابد و پنجره بهینه مربوط به بردار ویژه است:

$$T_{ij} = \frac{\sin(2\pi W_{\text{band}}(i-j)/f_s)}{\pi(i-j)}, 0 \leq i, j < L \quad (۱۱)$$

برای پنجره کایزر، رابطه (۱۲) برقرار هست.

$$w[n; \beta] = \frac{I_0 [\beta \sqrt{1 - ((2n - L + 1)/(L - 1))^2}]}{I_0(\beta)} \quad (۱۲)$$

ما را از طریق جستجوی شبکه ای و گرادیان با در نظر گرفتن $L/f_s \leq \Delta t_{\text{max}}$ و $\beta \leq \beta_{\text{max}}$ ، پارامترهای L و β را به صورت زیر بهینه می کنیم:

$$\theta^* = \arg \max_{L_{\min} \leq L \leq L_{\max}, \beta \geq 0} C(L, \beta) \quad (۱۳)$$

پس از تعیین پنجره بهینه $w[n; \theta^*]$ ، می توان سیگنال را با اندازه گام $H \leq L^*/2$ به صورت (۱۴) پنجره گذاری کرد.

¹ Discrete Prolate Spheroidal Sequences

• به روز رسانی $t \leftarrow t + 1$, $S_{t+1} = S_t \cup \{j^*\}$, $C_{t+1} = C_t \setminus \{j^*\}$

توقف الگوریتم: اگر $|S_t| \geq m$ و حداکثر ویژگی ها به دست آید یا تغییر در دقت $\Delta \text{Acc} < \delta$ در k تکرار متوالی به مقدار ثابتی برسد. مرحله نهایی: پس از به دست آمدن مجموعه نهایی S_T ، برای هر $j \in S_T$ ، اگر حذف j دقت را بهبود بخشد:

$$\text{If } \text{Acc}(S_T \setminus \{j\}) \geq \text{Acc}(S_T) \Rightarrow S_T := S_T \setminus \{j\} \quad (20)$$

در نتیجه، این الگوریتم برای بهینه سازی (۲۱) استفاده می شود که $|S| \leq m$ را نتیجه می دهد.

$$\max_{S \subseteq \{1, \dots, d\}, |S| \leq m} \left[\sum_{j \in S} (\alpha_1 D(f_j) + \alpha_2 I(f_j; Y) - \alpha_3 R(f_j, S)) + \alpha_4 \cdot \text{Acc}_{val}(F[:, S]) \right] \quad (21)$$

در این حالت، از معادله (۱۶) تا (۱۹) برای انتخاب ویژگی های مؤثر استفاده شده است؛ در معادله (۱۶) اثر افزودن ویژگی بر دقت الگوریتم بررسی می شود. در معادله (۱۷)، نسبت واریانس بین کلاس ها به درون کلاسی سنجیده می شود و تضمین کننده توانایی ویژگی ها در جداسازی کلاس ها هست. معادله (۱۸)، نشان دهنده میزان وابستگی بین ویژگی ها و کلاس عیب هست. همچنین با استفاده از معادله (۱۹)، از انتخاب ویژگی های تکراری یا مشابه جلوگیری می شود.

۲-۴-۲ الگوریتم های کلاس بندی

برای دستیابی به نتیجه مطلوب، باید الگوریتم های یادگیری ماشین مناسب را با دقت انتخاب کرد و برای مجموعه داده ها استفاده کنیم. در این حالت، الگوریتم های زیر به طور مناسب و با توجه به مسئله انتخاب شده اند:

جدول ۳: الگوریتم های یادگیری ماشین

الگوریتم ها	مجموعه	ردیف
الگوریتم		
Simple, medium, complex tree algorithms	اول	۱
Linear SVM, medium Gaussian SVM, quadratic SVM, cubic SVM, coarse Gaussian SVM	دوم	۲
Fine KNN, medium KNN, coarse KNN, cosine KNN, cubic KNN, Weighted KNN	سوم	۳
Ensemble (bagged tree), Ensemble (subspace discriminant), Ensemble (Subspace KNN)	چهارم	۴

اگر $F = [f_1, \dots, f_d] \in \mathbb{R}^{N \times d}$ ماتریس ویژگی ها، $y \in \{1, 2, \dots, C\}^N$ برچسب کلاس ها، $\mathcal{S} \subseteq \{1, \dots, d\}$ مجموعه فعلی بهترین ویژگی های انتخاب شده و $\mathcal{C} = \{1, \dots, d\} \setminus \mathcal{S}$ ویژگی های کاندید که هنوز انتخاب نشده اند باشد. هدف ما به حداکثر رساندن دقت طبقه بندی $\text{Acc}(\mathcal{S})$ با انتخاب زیرمجموعه ای از ویژگی های $\mathcal{S}^*$ از طریق بهینه سازی تکراری است. این بهینه سازی توسط یک تابع هدف بر اساس دقت کلاس بندی انجام می شود. برای هر ویژگی $j \in \mathcal{C}$ ، تابع (۱۶) را تعریف می کنیم. تابع هزینه ارائه شده در معادله (۱۶) از چهار بخش تشکیل شده است که هر بخش متناسب با مسئله و با دقت انتخاب شده است و ضعف های روش های تک معیاره را پوشش می دهد. در این روش، هدف دستیابی به حداکثر جدایی بین ویژگی ها، حداکثر ارتباط بین ویژگی ها و کلاس عیب، اعمال جریمه برای انتخاب ویژگی تکراری یا مشابه و در نظر گرفتن اثر مستقیم اضافه کردن یک ویژگی بر دقت کلاس بندی هست.

$$u_t(j) = \underbrace{\alpha_1 \cdot D(f_j)}_{\text{Discriminative Power}} + \underbrace{\alpha_2 \cdot I(f_j; Y)}_{\text{Relevance}} - \underbrace{\alpha_3 \cdot R(f_j, S_t)}_{\text{Redundancy}} + \underbrace{\alpha_4 \cdot \frac{\partial \text{Acc}(S_t \cup \{j\})}{\partial j}}_{\text{Marginal Accuracy Gain}} \quad (16)$$

که در آن، $D(f_j)$ به صورت (۱۷) نشان داده می شود و میزان مؤثر بودن ویژگی f_j در جداسازی کلاس ها از طریق نسبت واریانس بین کلاس ها را اندازه گیری می کند، $I(f_j; Y)$ مطابق (۱۸) میزان وابستگی بین f_j و Y را نشان می دهد و $R(f_j, S_t)$ که در (۱۹) نشان داده شده، بیانگر همبستگی با ویژگی های از پیش انتخاب شده هست.

$$D(f_j) = \frac{\sum_{c=1}^C N_c (\mu_j^c - \mu_j)^2}{\sum_{c=1}^C \sum_{i: y_i=c} (\mu_j^{(i)} - \mu_j^c)^2 + \varepsilon} \quad (17)$$

$$I(f_j; Y) = \sum_{y \in Y} \sum_{v \in f_j} P(y, v) \log \frac{P(y, v)}{P(y)P(v)} \quad (18)$$

$$R(f_j, S_t) = \frac{1}{|S_t|} \sum_{k \in S_t} \rho(f_j, f_k) \rho(f_j, f_k) = \frac{\text{Cov}(f_j, f_k)}{\sigma_j \sigma_k} \quad (19)$$

در زیر الگوریتم تکراری انتخاب ویژگی ارائه می شود، در ابتدا مقاردهی اولیه به صورت $S_0 = \emptyset$, $C_0 = \{1, \dots, d\}$, $t = 0$ انجام می شود. فرآیند زیر به منظور دستیابی به حالت بهینه تکرار می شود:

فرآیند زیر به منظور دستیابی به حالت بهینه تکرار می شود:

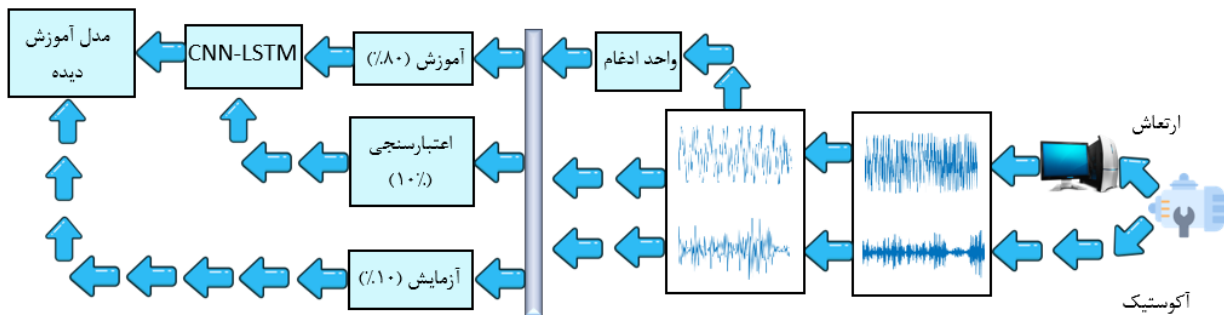
• برای هر $j \in C_t$ ، مقدار $U_t(j)$ محاسبه می شود.

• انتخاب $j^* = \arg \max_{j \in C_t} U_t(j)$

۲-۵- الگوریتم دوم

آموزش شبکه عصبی عمیق را نشان می‌دهد. در ابتدا، مجموعه داده‌ها را به ۸۰٪ برای آموزش، ۱۰٪ برای اعتبارسنجی و ۱۰٪ برای آزمایش تقسیم کردیم. پس از آن، فرآیند پنجره‌بندی را اعمال کردیم و هر مجموعه داده به پنجره‌های زمانی تقسیم شد. اگر دقت تشخیص عیب رضایت‌بخش باشد، الگوریتم با همان طول پنجره انجام می‌شود.

پیچیدگی مجموعه داده سوم برای تشخیص عیب بسیار زیاد است زیرا داده‌ها در چهار سرعت مختلف و دو حالت (تحت بار و بدون بار) ثبت شده‌اند. در این حالت، شرایط تحت بار و بدون بار در سرعت‌های مختلف برای یک عیب خاص در یک کلاس واحد گروه‌بندی می‌شوند. بنابراین، داده‌ها به هشت کلاس مجزا تقسیم می‌شوند. شکل ۵ فرآیند



شکل ۵: الگوریتم دوم

۲-۵-۱ بهینه‌سازی ساختار شبکه

در این فرآیند، نه تنها انتخاب لایه‌ها بهینه می‌شود (وجود یا عدم وجود لایه‌هایی مانند CNN، LSTM یا Dropout)، بلکه پارامترهای هر لایه (تعداد واحدها، اندازه هسته و نرخ Dropout) نیز برای بهبود عملکرد بهینه می‌شوند. نتیجه این است که یک توپولوژی شبکه عصبی عمیق بهینه شده با تنظیمات پارامترهای مناسب به بالاترین عملکرد در سیستم مورد نظر دست می‌یابد و نیاز به تلاش دستی برای تنظیم مدل را به حداقل می‌رساند. الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی عمیق با استفاده از الگوریتم تطبیق یافته کلونی مورچگان در زیر ارائه شده است:

الگوریتم ۱

الف: فضای جستجو و نمادگذاری

انتخاب نوع لایه‌ها:

$$V = \{Conv_{k \times k}, Pool_{p \times p}, Dropout(d), LSTM(u), Dense(h)\}$$

که در آن، $Conv_{k \times k}$ لایه کانولوشن با اندازه هسته $k \in \{3, 5, 7\}$ و فیلترها $f \in \{16, 32, 64, 128\}$ هست.

$Pool_{p \times p}$ حداکثر یا میانگین ادغام با $p \in \{2, 3\}$ و $Dropout(d)$ نرخ حذف با $d \in \{0.1, 0.2, \dots, 0.5\}$ هست.

$LSTM(u)$ با تعداد واحدهای $u \in \{32, 64, 128, 256\}$ و $Dense(h)$ با اندازه $h \in \{8, 16, 64, 128, 256, 512\}$ هست.

این مقاله از الگوریتم تطبیق یافته کلونی مورچگان برای بهینه‌سازی معماری و پارامترهای شبکه عصبی عمیق از جمله لایه‌های CNN، LSTM، MaxPooling و Dropout استفاده می‌کند. هدف اصلی این روش یافتن مؤثرترین چیدمان لایه‌ها و پیکربندی‌های مربوط به آن‌ها برای به حداکثر رساندن عملکرد مدل برای تشخیص عیب است. الگوریتم تطبیق یافته کلونی مورچگان با مقداردهی اولیه مجموعه‌ای از لایه‌های مناسب و پارامترهای آن‌ها شروع می‌شود. هر عامل در جمعیت به‌طور تصادفی یک شبکه عصبی پیشنهادی ایجاد می‌کند، با این تفاوت که انتخاب لایه‌ها و تنظیمات آن‌ها به‌صورت احتمالی بر اساس مقادیر فرومون و مقادیر پارامترهای اکتشافی انجام می‌شود. سپس، شبکه تولیدشده با استفاده از مجموعه اعتبارسنجی برای اندازه‌گیری عملکرد آن آموزش داده‌شده و ارزیابی می‌شود. این الگوریتم دارای مزایایی نسبت به الگوریتم‌های جستجوی تصادفی هست. الگوریتم کلونی مورچگان، به‌منظور تعیین ساختار شبکه از تجربه‌های قبلی و بهترین نتایج قبلی استفاده می‌کند که منجر به بهینه‌سازی پایدارتر می‌شود. در این الگوریتم می‌توانیم بر اساس ساختار گراف، یک شبکه بهینه با پارامترهای بهینه تشکیل دهیم. همچنین این روش از توابع احتمالاتی و به‌صورت گسسته استفاده می‌کند که منجر به کاهش زمان اجرا و بهینه‌سازی الگوریتم می‌شود.

$$\begin{aligned}\mu_t(\theta) &= k_\theta^T (K + \sigma^2 I)^{-1} \mathbf{y}, \sigma_t^2(\theta) \\ &= k(\theta, \theta) - k_\theta^T (K + \sigma^2 I)^{-1} k_\theta\end{aligned}$$

ذ: ارزیابی و به‌روزرسانی فرمون

هر معماری $\theta^{(m,t)}$ را آموزش داده و ارزیابی می‌کنیم (با شرط توقف زودهنگام)، سپس مقدار هزینه $y^{(m,t)}$ را ذخیره می‌کنیم.

به‌روزرسانی بیزین: $(\theta^{(m,t)}, y^{(m,t)})$ را به مجموعه داده‌های مرحله t یعنی D_t اضافه می‌کنیم و سپس میانگین و واریانس μ_t, σ_t را مجدداً محاسبه می‌کنیم.

مجموعه بهینه S_t را انتخاب می‌کنیم: یعنی q درصد از بهترین معماری‌ها با کم‌ترین هزینه را انتخاب می‌کنیم.

برای هر یال $(u \rightarrow v)$ در معماری‌هایی که در مجموعه بهینه هستند، مقدار فرمون اضافه می‌شود با رابطه بالا، که در آن $y(\theta)$ مقدار هزینه و ε یک مقدار کوچک برای جلوگیری از تقسیم بر صفر هست.

$$\Delta \tau_{uv}^{(t)} = \frac{y}{y(\theta) + \varepsilon}, \varepsilon > 0$$

تبخیر و به‌روزرسانی فرمون: مقدار جدید فرمون روی یال $(u \rightarrow v)$ از ترکیب تبخیر مقدار قبلی با نرخ ρ و مجموع مقادیر فرمون رسوب‌گذاری‌شده توسط معماری‌های بهینه به‌دست می‌آید.

$$\tau_{uv}^{(t+1)} = (1 - \rho) \tau_{uv}^{(t)} + \sum_{\theta \in S_t} \Delta \tau_{uv}^{(t)}, \rho \in (0, 1)$$

ر: جستجو از طریق نمونه‌گیری تامپسون

برای تنوع‌بخشی بیشتر جستجو، در هر نقطه تصمیم‌گیری، نمونه‌گیری $\tilde{f}_{uv} \sim \mathcal{N}(\mu_{uv}, \sigma_{uv}^2)$ را انجام می‌دهیم و μ_{uv} را با $\tilde{f}_{uv}$ در P_{uv} جایگزین می‌کنیم.

۲-۵-۲ شبکه بهینه شده

جدول ۴ مشخصات شبکه عصبی عمیق بهینه شده به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم تطبیق یافته کلونی مورچگان را نشان می‌دهد. این شبکه دارای لایه‌های CNN، Maxpooling، LSTM، flatten و dense هست. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان با استفاده از تعداد مورچه‌ها ۳۰، نرخ تبخیر $\alpha = 1$ و $\beta = 2$ اجرا شده است. این مقادیر پس از آزمون‌های متعدد و با هدف توازن بین سرعت همگرایی و دقت انتخاب‌شده‌اند.

گراف $G = (V, E)$ که در آن E انتقال‌های معتبر را اعمال می‌کند (Conv $\rightarrow$ Pool، آخرین لایه کانولوشن LSTM $\rightarrow$ Conv و Dense $\rightarrow$ output که فقط یک‌بار اجرا می‌گردد).

معماری $\theta = [(v_0, p_0), (v_1, p_1), \dots, (v_L, p_L)]$ با طول L هست که در آن هر (v_i, p_i) نوع لایه انتخاب‌شده و پارامتر آن است.

ب: تشکیل تابع هزینه

تابع هزینه را به‌صورت زیر انتخاب می‌کنیم:

$$\min_{\theta \in \Theta} \text{Cost}(\theta) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i f_i(\theta)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}f_1(\theta) &= 1 - \text{Acc}_{\text{train}}(\theta), f_2(\theta) = 1 - \text{Acc}_{\text{val}}(\theta) \\ f_3(\theta) &= 1 - \text{Acc}_{\text{test}}(\theta), f_4(\theta) = \frac{N_P(\theta)}{N_P^{\max}}, f_5(\theta) = \frac{T_{\text{train}}(\theta)}{T^{\max}}\end{aligned}$$

در این رابطه، N تعداد پارامترها و T زمان آموزش هست. وزن‌های $\alpha_i > 0$ اهمیت دقت را تنظیم می‌کند. با توجه به اینکه هدف کنترل تحمل‌پذیر عیب بلادرنگ هست، ضرایب پارامترهای زمان بزرگ‌تر انتخاب می‌شود.

ج: قانون تصمیم‌گیری در الگوریتم کلونی مورچگان

برای هر یال جهت‌دار $(u \rightarrow v) \in E$ ، فرمون $\tau_{uv}^{(t)}$ و مقدار اکتشاف ایستا $\eta_{uv} = h_{\text{CNN}}(u, v)$ یا $h_{\text{LSTM}}(u, v)$ انتخاب می‌شوند. در گره u ، مورچه v را با احتمال زیر انتخاب می‌کند:

$$P_{uv}^{(t)} = \frac{(\tau_{uv}^{(t)})^\alpha (\eta_{uv})^\beta \exp(\kappa \mu_{uv}^{(t)})}{\sum_{w \in \mathcal{N}(u)} (\tau_{uw}^{(t)})^\alpha (\eta_{uw})^\beta \exp(\kappa \mu_{uw}^{(t)})}$$

که در آن $\alpha, \beta > 0$ وزن فرمون و مقدار اکتشافی و $\mu_{uv}^{(t)}$ هزینه میانگین جایگزین‌گوسی برای افزودن یک یال $(u \rightarrow v)$ هست. $\kappa \geq 0$ ضریب تنظیم‌کننده استفاده از مدل بیزین هست.

هر عامل به‌طور متوالی با عبور از گره ورودی از طریق لایه‌های CNN به‌صورت اختیاری از لایه LSTM و سپس لایه‌های Dense می‌گذرد تا به خروجی برسد و θ را بسازد.

د: فرآیند گاوسی

مجموعه داده $D_t = \{(\theta^{(m,t)}, y^{(m,t)})\}$ را با $y = \text{Cost}(\theta)$ $\epsilon, \epsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ داریم. در این حالت، با فرض $f(\theta) \sim \mathcal{GP}(0, k(\theta, \theta'))$ توزیع به‌صورت زیر به دست می‌آید:

جدول ۴: مشخصات شبکه مورد استفاده در الگوریتم دوم

Layer	Layer name	Kernel $\times$ unit	Specifications	Output shape	#parameters
1	Conv 1D	5×64	Activation= ReLu, Strides=1	(None,996, 64)	384
2	MaxPooling 1D	-	Strides=2	(None,498, 64)	0
3	Conv 1D	3×32	Activation= ReLu, Strides=1	(None,496, 64)	12352
4	MaxPooling 1D	-	Strides=2	(None,248, 64)	0
5	Conv 1D	3×128	Activation= ReLu, Strides=1	(None,246, 128)	24704
6	MaxPooling 1D	-	Strides=2	(None, 123, 128)	0
7	Conv 1D	3×64	Activation= ReLu, Strides=1	(None,121, 64)	24640
8	MaxPooling 1D	-	Strides=2	(None,60, 64)	0
9	LSTM	64 Unit	return_sequences=True	(None,60, 32)	12416
10	LSTM	32 Unit	-	(None,64)	24832
11	Flatten	-	-	(None,64)	0
12	Dense	1×32	Relu	(None,32)	2080
13	Dense	1×8	Softmax	(None,8)	264

۲-۶- مدل ریاضی موتور و طراحی کنترل کننده

موتورهای القایی به دلیل قابلیت اطمینان و نگهداری کم هزینه، در کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار می گیرند. به دلیل استفاده در کاربردهای توان بالا، موتور القایی به یک سیستم درایو با کارایی بالا نیاز دارد تا عملکرد آن را به طور دقیق و کارآمد کنترل کند. مدل موتور القایی [۴۲] به صورت معادله (۱۶) و معادلات شار به صورت معادله (۱۷) نشان داده شده است.

$$\begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \\ V_{rq} \\ V_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + s^\alpha L_s & 0 & s^\alpha L_m & 0 \\ 0 & R_s + s^\alpha L_s & 0 & s^\alpha L_m \\ s^\alpha L_m & \omega_r L_m & R_r + s^\alpha L_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & s^\alpha L_m & -\omega_r L_r & R_r + s^\alpha L_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (24)$$

عبارت s^α در معادله (۱۸) عملگر لاپلاس است. با تعریف حالت های برداری به عنوان جریان های استاتور و روتور، مدل موتور القایی را می توان به صورت معادله (۱۹) نوشت.

$$\begin{bmatrix} \frac{d^\alpha i_{sd}}{dt} \\ \frac{d^\alpha i_{sq}}{dt} \\ \frac{d^\alpha i_{rd}}{dt} \\ \frac{d^\alpha i_{rq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s L_r & -\omega_r L_m^2 & -R_r L_m & -\omega_r L_m L_r \\ \omega_r L_m^2 & R_s L_r & \omega_r L_m L_r & -R_r L_m \\ -R_s L_m & \omega_r L_m L_s & R_r L_s & \omega_r L_r L_s \\ -\omega_r L_m L_s & -R_s L_m & -\omega_r L_r L_s & R_r L_s \end{bmatrix} \times \frac{1}{L_m^2 - L_r L_s} \times \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$+ \frac{1}{L_m^2 - L_r L_s} \times \begin{bmatrix} -L_r & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & L_m \\ L_m & 0 & -L_s & 0 \\ 0 & L_m & 0 & -L_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix}$$

گشتاور را می توان به صورت مکانیکی به صورت معادله (۲۰) نوشت.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L = \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{B}{P} \omega_r + T_L \quad (26)$$

که در آن J اینرسی، B ضریب گرانروی، T_L گشتاور بار، ω_r سرعت زاویه ای روتور برحسب رادیان بر ثانیه و ω_m سرعت موتور برحسب رادیان بر ثانیه است. همچنین، معادله گشتاور را می توان به صورت الکتریکی به صورت معادله (۲۱) نوشت.

$$T_e = \frac{3}{2} P (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (27)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$$

که در آن P تعداد جفت قطبها است. شکل ۶ کنترل کننده سرعت موتور شبیه سازی شده در سیمولینک را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است. ما ساختاری با سه کنترل کننده برای کنترل سرعت موتور در حالت های سالم و معیوب

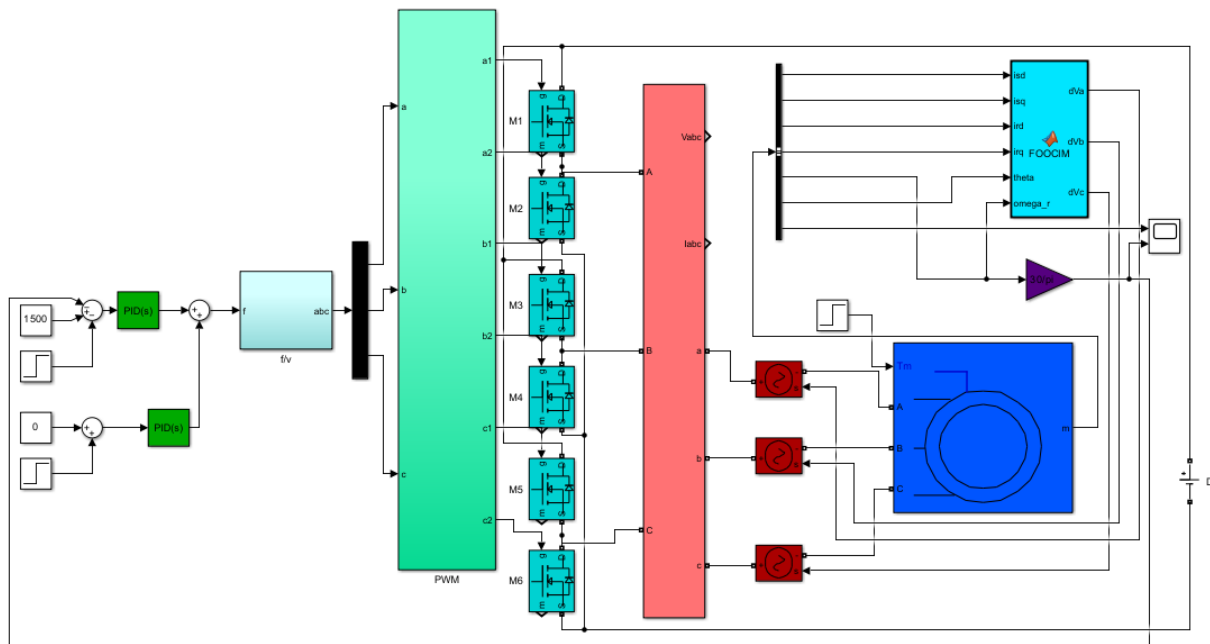
$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d^\alpha \varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d^\alpha \varphi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d^\alpha \varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rd} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d^\alpha \varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rq} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \varphi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (23)$$

که در آن α مرتبه مشتق گیری است، V_{sd} و V_{sq} ولتاژهای استاتور هستند و i_{sq} ، i_{rd} ، i_{rq} ، i_{sd} مربوط به محورهای d و q جریان استاتور و جریان روتور هستند. φ_{sd} ، φ_{rd} ، φ_{rq} ، φ_{sq} شار استاتور و روتور، R_s و R_r مقاومت های استاتور و روتور، L_s و L_r به ترتیب نشان دهنده اندوکتانس استاتور و روتور هستند و L_m اندوکتانس متقابل است. معادلات ماشین القایی در حالت مرجع ثابت را می توان با استفاده از مؤلفه های d-q به صورت معادله (۱۸) نوشت.

طراحی کردیم. در حالتی که موتور هیچ عیبی ندارد، از کنترل کننده PID اول استفاده می‌شود. در حالت‌های معیوب، یک کنترل کننده PID به ساختار کنترل کننده مرکزی اضافه می‌شود. اگر کنترل کننده‌های PID نتایج نامناسبی داشته باشند، کنترل کننده بهینه مرتبه کسری وارد ساختار کنترل شده و سرعت موتورها را با واحدهای کنترل ولتاژ کنترل می‌کند. در این حالت، تابع هزینه را برای

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \begin{bmatrix} (x(t) - \Gamma(t))^T \\ u(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) - \Gamma(t) \\ u(t) \end{bmatrix} dt \quad (28)$$



در این حالت، با انتخاب ورودی کنترلی (۳۰)، تابع هزینه به صورت (۳۲) بهینه می‌شود.

$$V(x, t) = \min_{u(\cdot)} \frac{1}{2} \int_t^{t_f} [(x - \Gamma)^T Q (x - \Gamma) + u^T R u] d\tau \quad (32)$$

با استفاده از $h = (t_f - t_0)/N$ بازه $[t_0, t_f]$ را به N زیر بازه تبدیل می‌کنیم در این حالت $t_j = t_0 + jh, j = 0, \dots, N$ با در نظر گرفتن $m \geq 0$ و تعریف (۳۳) که از ارائه گرانوالد-لتنیکوف به‌دست آمده، کنترل بهینه به مقادیر موردنظر همگرا می‌شود.

$$\begin{aligned} b_m^{(j+1)} &= h^\alpha [(m+1)^\alpha - m^\alpha], a_m^{(j+1)} \\ &= h^\alpha [(j-m+2)^\alpha - 2(j-m \\ &\quad + 1)^\alpha + (j-m)^\alpha] \end{aligned} \quad (33)$$

مقادیر اولیه: $x_0 = x(t_0), \omega_0 = \omega_r(t_0)$

حدس اولیه: $u_j^{(0)}, j = 0, \dots, N$

برای هر تکرار در روش شوتینگ از $k = 0$ تا همگرایی:

- پیمایش، رو به جلو برای $j = 0$ تا $N - 1$:

به منظور حل کنترل بهینه، متغیرهای شبه حالت را به صورت $\lambda_x(t) \in \mathbb{R}^4, \lambda_\omega(t) \in \mathbb{R}$ در نظر می‌گیریم. به منظور دستیابی به کنترل بهینه، ابتدا لازم هست که شرایط لازم کنترل بهینه را به دست آوریم. با در نظر گرفتن تابع همیلتونین به صورت (۲۹)، شرایط لازم کنترل بهینه به صورت (۳۰) به دست می‌آید.

$$H(z, u, \lambda, t) = \frac{1}{2}(x - \Gamma)^T Q(x - \Gamma) + \frac{1}{2}u^T R u + \lambda_r^T [A(\omega_r)x + Bu] + \lambda_\omega h(x, \omega_r) \quad (29)$$

$$\begin{cases} {}_t D_{t_f}^\alpha \lambda_x(t) = -\frac{\partial H}{\partial x} = -Q(x - \Gamma) - [\partial_x(Ax)]^T \lambda_x - [\partial_x h]^T \lambda_\omega \\ -\dot{\lambda}_\omega(t) = \frac{\partial H}{\partial \omega_r} = \lambda_x^T \frac{\partial A}{\partial \omega_r} x + \lambda_\omega \frac{\partial h}{\partial \omega_r} \\ \lambda_x(t_f) = 0, \lambda_\omega(t_f) = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial u} = Ru + B^T \lambda_x = 0 \Rightarrow u^*(t) = -R^{-1} B^T \lambda_x(t) \end{cases} \quad (\Psi \bullet)$$

که در آن، ω_r از رابطه (۳۱) به دست می‌آید.

$$\dot{\omega}_r(t) = \frac{1}{J} [T_e(x(t)) - T_L] \rightarrow \dot{\omega}_r(t) \quad (31)$$

محاسبه رو به جلو $\{x_j, \omega_j, u_j\}$ ، محاسبه رو به عقب

$$\|\lambda_{x,N}\| + \|\lambda_{\omega,N}\| \text{ نهایی و بررسی مانده نهایی}$$

• به روزرسانی حدس شبه حالت به صورت (۴۰):

$$\lambda^{(k+1)} = \alpha_{\text{relax}} \lambda^{(\text{new})} + (1 - \alpha_{\text{relax}}) \lambda^{(k)} \quad (40)$$

تکرار تا باقیمانده به کمتر از حد مطلوب برسد.

در ادامه تخمین مبتنی بر توابع متعامد ارائه می‌شود، یکی از مزایای توابع متعامد تضمین همگرایی مناسب هست. از جمله موارد دیگر که توابع متعامد را از سایر روش‌های عددی متمایز می‌کند، عدم وابستگی ضریب جملات جدید به ضریب جملات قبلی هست و با به دست آوردن ضریب جملات جدید، ضریب جملات قبلی تغییری نمی‌کند. در این حالت، با تغییر متغیر $\tau = (t - t_0)/(t_f - t_0) \in [0,1]$ توابع را بر اساس پایه‌های ژاکوبی $\{P_n^{(\gamma,\delta)}(\tau)\}_{n=0}^M$ گسترش می‌دهیم. در این حالت، تقریب توابع به صورت (۴۱) هست.

$$\begin{aligned} x(t) &\approx \sum_{n=0}^M X_n P_n(\tau), \omega_r(t) \approx \sum_{n=0}^M W_n P_n(\tau), \lambda_x(t) \\ &\approx \sum_{n=0}^M L_n P_n(\tau), u(t) \approx \sum_{n=0}^M U_n P_n(\tau) \end{aligned} \quad (41)$$

ضرایب متغیرها را به فرم برداری فشرده $X, W, L, U \in \mathbb{R}^{(M+1) \times d}$ نمایش می‌دهیم. برای نمایش ماتریس‌های عملیاتی:

مشتق کسری: $D^{(\alpha)} \in \mathbb{R}^{(M+1) \times (M+1)}$ وجود دارد به‌طوری‌که

$${}_{t_0} D_t^\alpha [P(\tau)] \approx D^{(\alpha)} P(\tau)$$

مشتق معمولی: $D^{(1)}$ برای ∂_τ چندجمله‌ای‌های ژاکوبی.

معادلات حالت اصلی و معادلات شبه حالت را به روش گالرکین در برابر هر پایه P_i ، به علاوه شرط اولیه و شرایط مرزی اعمال می‌کنیم. این منجر به چهار بلوک معادلات جبری می‌شود:

$$D^{(\alpha)} X - \mathcal{A}(W)X - BU = 0$$

که در آن، $\mathcal{A}(W) = \sum_{k=0}^M W_k A_k$ و A_k تصویرهای از پیش محاسبه شده از $A(\omega)$ بر حسب P_k هستند.

$$D^{(1)} W - h(X, W) = 0$$

$$RU + B^T L = 0$$

شرایط ایستایی: $RU + B^T L = 0$

دینامیک شبه حالت (۴۲):

$$D^{*(\alpha)} L = Q(X - \Gamma) + \mathcal{A}(W)^T L + (\partial_x h)^T L_\omega \quad (42)$$

• پیش بینی با استفاده از (۳۴):

$$\begin{aligned} x_{j+1}^p &= x_0 + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \sum_{m=0}^j b_{j-m}^{(j+1)} [A(\omega_m) x_m + B u_m^{(k)}], \omega_{j+1}^p \\ &= \omega_j + h_r h(x_j, \omega_j) \end{aligned} \quad (34)$$

• اصلاح با استفاده از (۳۵):

$$\begin{aligned} x_{j+1} &= x_0 + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \sum_{m=0}^j a_{j-m}^{(j+1)} [A(\omega_m) x_m + B u_m^{(k)}] \\ &+ \frac{a_0^{(j+1)}}{\Gamma(\alpha)} [A(\omega_{j+1}^p) x_{j+1}^p + B u_{j+1}^{(k)}] \end{aligned} \quad (35)$$

سپس حالت مکانیکی را به صورت تفاضلی به روزرسانی می‌کنیم و معادله (۳۶) را حل می‌کنیم.

$$\omega_{j+1} = \omega_j + h_r \times h(x_{j+1}, \omega_{j+1}) \quad (36)$$

• کنترل را در هر گره جدید از طریق تکرار شبه حالت قبلی مطابق (۳۷) محاسبه می‌کنیم.

$$u_{j+1}^{(k)} = -R^{-1} B^T \lambda_{x,j+1}^{(k)} \quad (37)$$

که در آن $\lambda_x^{(k)}$ آخرین پیمایش رو به عقب است. در ادامه از روش پس‌رو برای شبه حالت استفاده می‌کنیم:

شرایط نهایی با نادیده گرفتن حافظه نهایی: $\lambda_{x,N} = 0, \lambda_{\omega,N} = 0$ برای $j = N$ به صورت کاهشی تا ۱:

• پیش بینی با استفاده از (۳۸):

$$\begin{aligned} \lambda_{x,j-1}^p &= \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \sum_{m=j}^{N-1} b_{m-j}^{*(m)} [Q(x_m - \Gamma_m) + A(\omega_m)^T \lambda_{x,m} \\ &+ (\partial_x h)^T \lambda_{\omega,m}] \end{aligned} \quad (38)$$

که در آن، b^* وزن‌های راست هستند. به طور مشابه، $\lambda_{\omega,j-1}^p$ را از طریق آدامز-بشفورث معمولی به صورت معادله (۳۹) پیش‌بینی می‌کنیم.

$$-\dot{\lambda}_\omega = \lambda_x^T \partial_\omega A x + \lambda_\omega \partial_\omega h \quad (39)$$

• اصلاح: از فرمول آدامز با وزن‌های a^* ، مشابه با اصلاح‌کننده پیش‌رو، استفاده می‌کنیم.

• حلقه تکرار شوتینگ: از آنجا که $\{u_j\}$ به $\{\lambda_{x,j}\}$ وابسته است و برعکس، پیمایش رو به عقب در یک حلقه بیرونی قرار می‌دهیم:

شرایط مرزی به صورت (۴۳):

$$u(t) = \sum_{n=0}^M U_n P_n \left(\frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right) \quad (45)$$

$$\text{At } \tau = 0: x(0) = x_0, \omega(0) = \omega_0, \text{At } \tau = 1: \lambda_x(1) = 0, \lambda_\omega(1) = 0 \quad (43)$$

۳- نتایج

این بخش نتایج الگوریتم‌های کلاس‌بندی و کنترل‌کننده را ارائه می‌دهد. در جدول ۵ نتایج برای مجموعه داده اول با استفاده از الگوریتم اول، در شکل ۷ جدا پذیری تعدادی از داده‌های مجموعه داده اول و در شکل ۸ و جدول ۶، نتایج الگوریتم کلاس‌بندی اول برای مجموعه داده دوم ارائه شده است. این الگوریتم، عیوب روی حلقه‌های داخلی و خارجی یاتاقان را در سه حالت ۰/۳ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۳ میلی‌متر و حالت سالم در نظر می‌گیرد. هر حالت در سه بار ۰ نیوتن‌متر، ۲ نیوتن‌متر و ۴ نیوتن‌متر در نظر گرفته شده است. هر عیب با بارهای مختلف در یک مجموعه گروه‌بندی شده و هفت کلاس برای این حالت در نظر گرفته شده است.

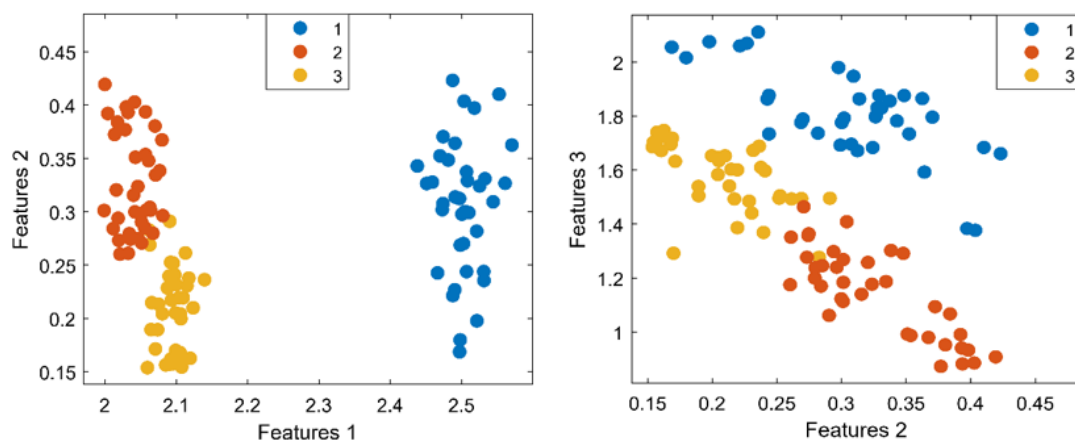
با یکپارچه‌سازی معادلات ارائه‌شده، به $F(x, W, L, U) = 0$ می‌رسیم که ابعاد این سیستم برابر با $(m + 1 + m + 1)(M + 1)$ به‌علاوه شرایط مرزی هست. در این حالت، از روش نیوتن-کانترووچ برای حل این مسئله استفاده می‌شود. با مشتق‌گیری از هر بلوک نسبت به x, W, L, U ، تابع توزیع ژاکوبین را تشکیل می‌دهیم. حدس اولیه به‌صورت درونیابی خطی از (x_0, ω_0) تا $(\Gamma(t_f), 0)$ و تکرار فرآیند تا زمانی که $\|F\|$ به مقدار مطلوب (۲۷) برسد.

$$\begin{pmatrix} X \\ W \\ L \\ U \end{pmatrix}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} X \\ W \\ L \\ U \end{pmatrix}^{(k)} - [DF(\cdot)^{(k)}]^{-1} F(\cdot)^{(k)} \quad (44)$$

درنهایت، کنترل بهینه به‌صورت (۴۵) به دست می‌آید.

جدول ۵: نتایج الگوریتم اول برای مجموعه داده اول

#	Algorithm	Train accuracy	Train time	Test accuracy
1	Linear SVM	74.80	0.75	72.72
2	Fine KNN	100	0.16	95.45
3	Coarse KNN	100	0.08	90.90
4	Cosine KNN	81.10	0.07	77.27
5	Fine Tree	89.76	0.13	86.36
6	Coarse Tree	55.11	0.03	54.54
7	Ensemble- Bagged Trees	100	0.61	90.90
8	Ensemble- Subspace Discriminant	87.40	1.14	86.36
9	Ensemble- Subspace KNN	100	0.77	90.90
10	Narrow neural network	81.10	2.69	77.27



شکل ۷: نمایش جداپذیری ویژگی‌ها در کلاس‌های موردنظر

Coarse KNN							
1	180	0	0	0	0	0	0
2	0	180	0	0	0	0	0
3	0	0	180	0	0	0	0
4	0	0	0	180	0	0	0
5	0	0	0	0	180	0	0
6	0	0	0	0	0	180	0
7	0	0	0	22	0	0	158
	1	2	3	4	5	6	7

Linear SVM							
1	180	0	0	0	0	0	0
2	0	180	0	0	0	0	0
3	0	0	180	0	0	0	0
4	0	0	0	180	0	0	0
5	0	0	0	0	180	0	0
6	0	0	0	0	0	180	0
7	0	0	0	0	0	0	180
	1	2	3	4	5	6	7

Coarse KNN-PCA							
1	180	0	0	0	0	0	0
2	0	179	0	0	0	0	1
3	0	0	180	0	0	0	0
4	0	0	0	180	0	0	0
5	0	0	0	0	180	0	0
6	0	0	0	0	0	180	0
7	0	0	0	0	0	0	158
	1	2	3	4	5	6	7

Linear SVM-PCA							
1	180	0	0	0	0	0	0
2	0	180	0	0	0	0	0
3	0	0	180	0	0	0	0
4	0	0	0	180	0	0	0
5	0	0	0	0	180	0	0
6	0	0	0	0	0	180	0
7	0	0	0	0	0	0	180
	1	2	3	4	5	6	7

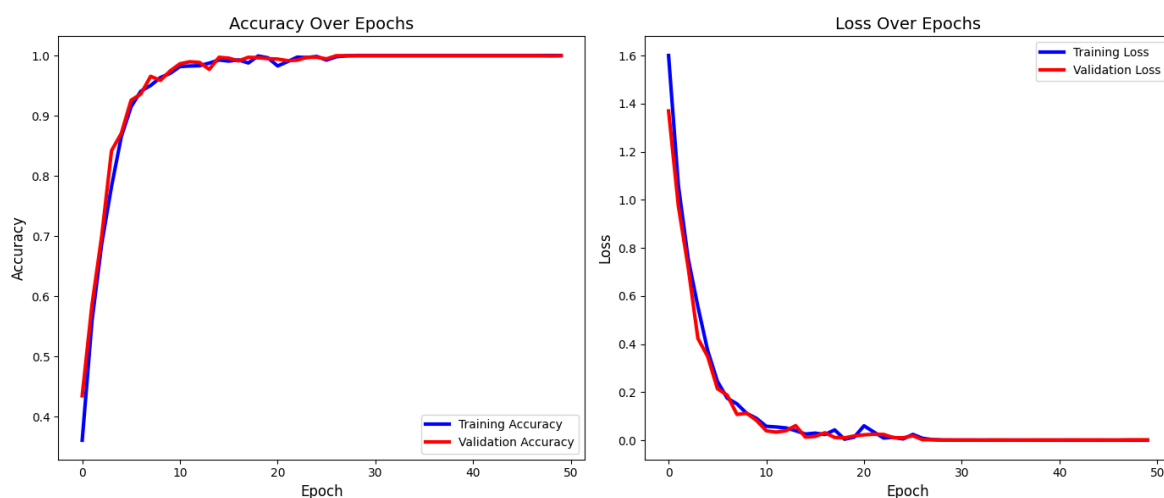
شکل ۸: ماتریس‌های درهم‌ریختگی الگوریتم اول

جدول ۶: نتایج الگوریتم اول برای مجموعه داده دوم

#	Algorithm	Accuracy	Train time	Accuracy-PCA 2 features	Train time-PCA
1	Linear SVM	100	2.317	100	3.051
2	Quadratic SVM	100	2.547	100	2.897
3	Cubic SVM	100	2.721	100	3.547
4	Medium Gaussian SVM	100	2.547	100	3.117
5	Coarse Gaussian SVM	100	2.024	99.8	3.865
6	Fine KNN	100	1.756	100	2.763
7	Medium KNN	100	1.489	99.9	2.492
8	Coarse KNN	98.3	1.647	99.9	2.785
9	Cosine KNN	100	1.478	99.8	2.478
10	Cubic KNN	100	1.571	99.9	2.632
11	Weighted KNN	100	1.712	99.9	2.142
12	Fine Tree	99.9	1.988	99.8	2.158
13	Medium Tree	99.9	2.375	99.8	2.657
14	Ensemble- Bagged Trees	100	3.223	99.8	4.054
15	Ensemble- Subspace Discriminant	100	3.574	97.6	9.216

بلادرنگ مناسب هستند. نتایج الگوریتم دوم در شکل ۹ و شکل ۱۰ و جدول ۷ نشان داده شده است. در این الگوریتم، ۲۱۵۰۳ داده برای آموزش، ۲۶۸۸ داده برای اعتبارسنجی و ۲۶۸۸ داده برای آزمایش استفاده شده است. در جدول ۷، A1 نشان‌دهنده اولین حسگر ارتعاش، A2 نشان‌دهنده دومین حسگر ارتعاش، A3 نشان‌دهنده سومین حسگر ارتعاش و Acou نشان‌دهنده حسگر آکوستیک است. شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نتایج الگوریتم کنترل برای کنترل سرعت موتور را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، در بین الگوریتم‌هایی که با مجموعه ویژگی کامل به دقت ۱۰۰٪ رسیده‌اند، الگوریتم Cosine KNN با زمان ۱/۴۷۸ ثانیه کوتاه‌ترین زمان آموزش را داشته است. همچنین، در بین الگوریتم‌هایی که با دو ویژگی به دقت ۱۰۰٪ رسیده‌اند، الگوریتم Fine KNN با زمان ۲/۷۶۳ ثانیه کوتاه‌ترین زمان آموزش را داشته است. با استفاده از روش PCA، در برخی از الگوریتم‌ها دقت کاهش پیدا می‌کند و در همه الگوریتم‌ها زمان آموزش افزایش می‌یابد که نشانگر این هست که ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم انتخاب ویژگی جادپذیری مناسبی داشتند و برای کاربردهای



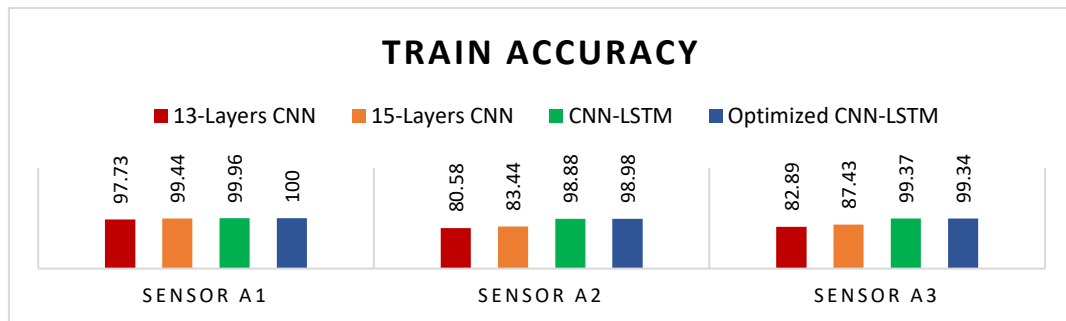
شکل ۹: نتایج کلاس‌بندی برای حسگر اول

جدول ۷: نتایج الگوریتم دوم

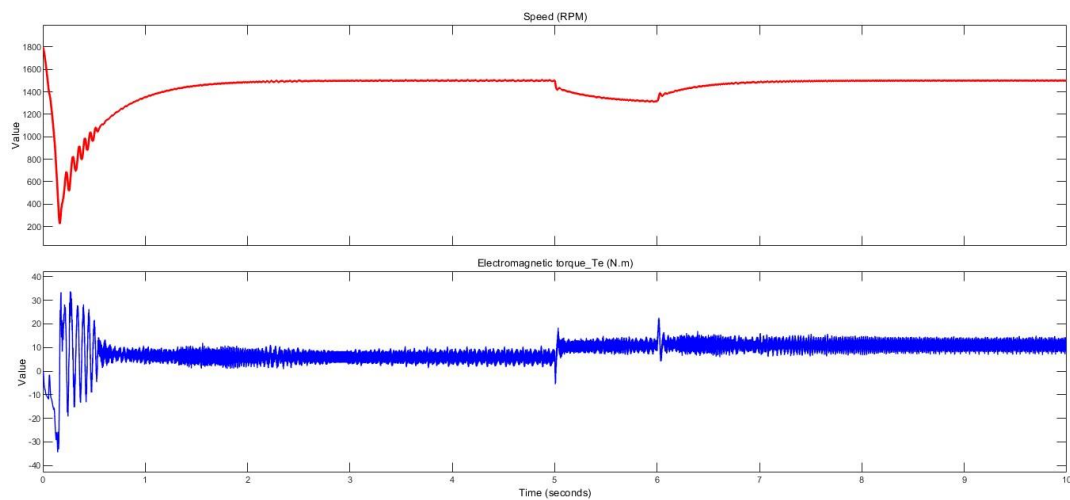
Network	Sensors	Train accuracy	Sensitivity	F1 Score	Train time	Validation accuracy	Test accuracy	Number of parameters
13-Layers CNN [43]	A1	97.73	97.76	97.72	-	-	-	-
15-Layers CNN [43]	A1	99.44	99.44	99.44	-	-	-	-
CNN-LSTM [43]	A1	99.96	99.96	99.96	9617.431	-	-	127784
CNN-LSTM-Attention	A1	99.81	99.81	99.81	6752.21	99.81	99.89	135016
Proposed CNN-LSTM	A1	100	100	100	6118.137	99.96	99.96	65672
13-Layers CNN [43]	A2	80.58	80.48	80.59	-	-	-	-
15-Layers CNN [43]	A2	83.44	83.43	83.42	-	-	-	-
CNN-LSTM [43]	A2	98.88	98.87	98.88	9789.228	-	-	127784
Proposed CNN-LSTM	A2	98.98	98.98	98.98	4032.095	96.21	96.19	65672
13-Layers CNN [43]	A3	82.89	82.91	82.85	-	-	-	-
15-Layers CNN [43]	A3	87.43	87.35	87.33	-	-	-	-
CNN-LSTM [43]	A3	99.37	99.36	99.36	9870.883	-	-	127784
CNN [43]	-	72.73	-	-	-	-	-	-
ChebyNet [44]	-	65.80	-	-	-	-	-	-
MLP [44]	-	63.1	-	-	-	-	-	-
Self-Training [44]	-	48.71	-	-	-	-	-	-
ME-GNN [44]	-	97.7	-	-	-	-	-	-
Proposed CNN-LSTM	A3	99.34	99.34	99.34	5076.251	97.28	97.17	65672
Proposed CNN-LSTM	Acou	97.39	97.39	97.39	3924.012	95.16	95.08	65672
Proposed CNN-LSTM	A1, A2, A3	99.94	99.94	99.94	15612.234	99.63	99.73	65672
Proposed CNN-LSTM	A1, A2, Acou	100	100	100	15273.091	100	100	65672
Proposed CNN-LSTM	A1, A3, Acou	100	100	100	16175.287	100	100	65672

الگوریتم در دوره‌های کمتری به‌دقت موردنظر می‌رسد که باعث کاهش زمان کلی می‌شود. در این حالت، در صورت استفاده از داده‌های سنسور ارتعاش ۱، ارتعاش ۲ و آکوستیک، الگوریتم طی ۱۵ تکرار و در زمان ۴۵۸/۹۲۷ ثانیه به‌دقت ۱۰۰٪ می‌رسد. همچنین در صورت استفاده از سنسور ارتعاش اول، سنسور ارتعاش دوم و آکوستیک، الگوریتم طی ۱۰ تکرار و در زمان ۳۱۸۵/۳۷۶ ثانیه به‌دقت ۱۰۰٪ می‌رسد.

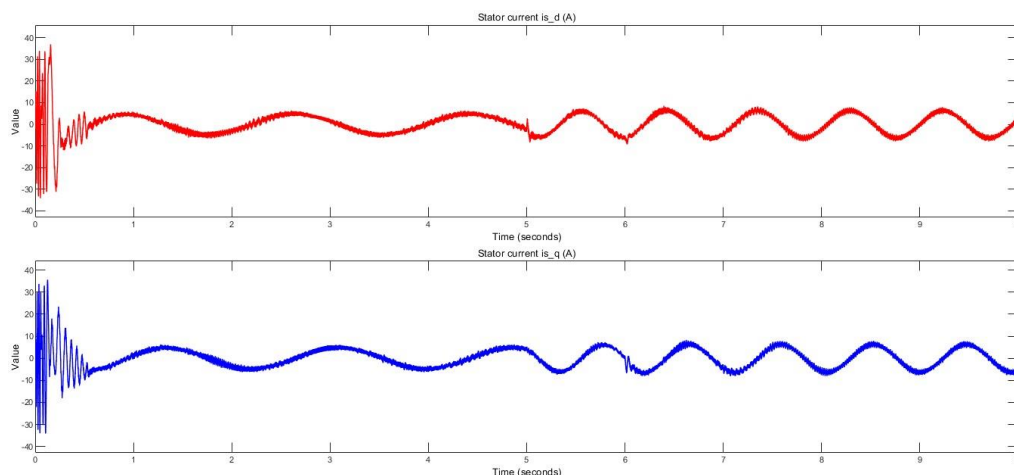
تمام نتایج ارائه‌شده در جدول ۷ برای ۵۰ تکرار است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی CNN-LSTM پارامترهای کمتری، زمان آموزش کمتر و دقت مناسبی دارد. همچنین، نتایج حسگر ارتعاش A1 بهتر از سایر حسگرها است. به‌طورکلی، حسگرهای ارتعاش نتایج بهتری نسبت به حسگرهای آکوستیک داشتند و هنگامی که ترکیبی از حسگرهای ارتعاش و آکوستیک استفاده می‌شود، زمان آموزش در هر دوره افزایش می‌یابد. با این حال،



شکل ۱۰: مقایسه شبکه‌های عصبی عمیق



شکل ۱۱: سرعت و گشتاور موتور قبل و بعد از وقوع عیب



شکل ۱۲: جریان استاتور در محور d-q قبل و بعد از وقوع عیب

هست که می‌تواند به صورت بلادرنگ اطلاعات را ارسال و دریافت کند. اگر وضعیت جدیدی در سیستم به وجود آمد که در مجموعه داده وجود نداشت و با حالت سالم و عیوب بررسی شده تطبیق نداشت، این حالت همراه با مشخصات ثبت شده به پایگاه داده ارسال می‌شود. در صورتی که فرکانس وقوع عیب زیاد باشد، در این صورت این حالت به عنوان یک کلاس جدید تعریف می‌شود. برای کنترل سرعت، از الگوریتم پیشنهادی استفاده شد. در زمان ۵، یک عیب رخ می‌دهد؛ حداکثر یک ثانیه برای جمع‌آوری داده‌ها برای یک پنجره، اجرای الگوریتم طبقه‌بندی و استفاده از کنترل کننده صرف می‌شود؛ در ثانیه ۶، از کنترل کننده اضافی استفاده می‌شود و کنترل مناسب به طور مناسب انجام می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله یک روش ترکیبی برای تشخیص عیب و کنترل سرعت موتورهای القایی تحت شرایط عملیاتی مختلف ارائه می‌دهد. نتایج نشان داد که الگوریتم کلاس‌بندی اول که از الگوریتم‌های استخراج ویژگی، انتخاب ویژگی و یادگیری ماشین استفاده می‌کند، در مجموعه داده‌های با پیچیدگی کم عملکرد خوبی دارد. آموزش این الگوریتم در مجموعه داده‌های اول شامل ۲ عیب و یک حالت سالم، در مجموعه داده دوم شامل شش عیب و یک حالت سالم بود؛ و در زمان کمتری (به طور متوسط ۲ ثانیه) به دقت مورد نظر رسید. با این حال، الگوریتم دوم، که از شبکه‌های عصبی عمیق CNN و LSTM استفاده می‌کند، عملکرد بهتری در داده‌های با پیچیدگی بالاتر شامل بارهای مختلف و سرعت‌های مختلف، ارائه داد. بهینه‌سازی ساختار و پارامترهای شبکه با استفاده از الگوریتم تطبیق یافته کلونی مورچگان به طور قابل توجهی

همان‌طور که نشان داده شده است، در مجموعه داده‌هایی با پیچیدگی تشخیص عیب کم، الگوریتم اول که شامل استخراج ویژگی و انتخاب ویژگی با استفاده از طبقه‌بندی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین است، نتایج مناسبی دارد. مجموعه داده اول و دوم با استفاده از الگوریتم اول طبقه‌بندی شد؛ اجرای این الگوریتم برای یک نمونه کمتر از ۳۰ میلی‌ثانیه است. در ابتدا، از تمامی ویژگی‌ها با الگوریتم انتخاب ویژگی استفاده شد و در مرحله بعد، تعداد ویژگی‌ها با استفاده از روش PCA به دو ویژگی کاهش یافت و نتایج مناسب بود. کاهش بیشتر ویژگی‌ها منجر به کاهش شدید دقت شد. در مجموعه داده سوم، پیچیدگی تشخیص عیب بیشتر است؛ داده‌ها به دو حالت با بار و بدون بار و در چهار سرعت مختلف و هشت حالت، شامل یک حالت سالم و هفت حالت معیوب، طبقه‌بندی شده‌اند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین در این مورد مناسب نبودند و از یک شبکه عصبی عمیق استفاده شد. نتیجه کلاس‌بندی با استفاده از اولین حسگر ارتعاش بهترین بود. اگر از ترکیب حسگرهای ارتعاش و آکوستیک استفاده شود، نتیجه بهتر است.

در این مقاله، در الگوریتم اول از ویژگی‌های آماری، انرژی و فرکانسی و در مجموعه دوم از شبکه عصبی عمیق استفاده شده است. تأثیر عیب‌ها در الگوهای سیگنال و همچنین فرکانس‌های خاصی ایجاد می‌شود. به منظور تعمیم روش ارائه شده برای تشخیص عیب سایر موتورها، دو اقدام انجام می‌شود؛ ابتدا، سیگنال‌ها نرمالیزه می‌شوند و در حالت دوم، در ابتدا موتور سالم اجرا می‌شود و پارامترهای مدل با مدل موتور مرجع که به وسیله داده‌های نرمالیزه آموزش داده شده، مقیاس می‌شوند. این اقدام، یک رویکرد نوآورانه مشابه با یادگیری انتقالی هست. روش ارائه شده در این مقاله، یک روش برخط (آنلاین)

ensemble learning,” *Electrical Engineering*, Vol. 104, pp. 2859–2877, 2022, doi: [10.1007/s00202-022-01523-6](https://doi.org/10.1007/s00202-022-01523-6).

[4] O. AlShorman *et al.*, “Sounds and acoustic emission-based early fault diagnosis of induction motor: A review study,” *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 13, Art. No. 168781402199691, 2021, doi: [10.1177/1687814021996915](https://doi.org/10.1177/1687814021996915).

[5] V. S. Dehnavi and M. Shafiee, “Inner and outer bearing fault diagnosis of electrical motors using a proposed algorithm and vibration signals,” in *Proc. 14th Int. Conf. Information and Knowledge Technology (IKT)*, 2023, pp. 175–180, doi: [10.1109/IKT62039.2023.10433018](https://doi.org/10.1109/IKT62039.2023.10433018).

[6] A. Glowacz, “Thermographic fault diagnosis of electrical faults of commutator and induction motors,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 121, Art. No. 105962, 2023, doi: [10.1016/j.engappai.2023.105962](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105962).

[7] L. Sheng *et al.*, “Research on gear crack fault diagnosis model based on permanent magnet motor current signal,” *ISA Transactions*, Vol. 135, pp. 188–198, 2023, doi: [10.1016/j.isatra.2022.10.001](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.10.001).

[8] J. J. Saucedo-Dorantes *et al.*, “Automatic methodology for multiple fault detection in induction motor under periodic low-frequency fluctuating load based on stray flux signals,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 38, No. 4, pp. 2744–2753, 2023, doi: [10.1109/TEC.2023.3294392](https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3294392).

[9] J.-G. Jang *et al.*, “Vibration data feature extraction and deep learning-based preprocessing method for highly accurate motor fault diagnosis,” *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 10, pp. 204–220, 2022, doi: [10.1093/jcde/qwac128](https://doi.org/10.1093/jcde/qwac128).

[10] A. Choudhary *et al.*, “Multi-input CNN based vibro-acoustic fusion for accurate fault diagnosis of induction motor,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 120, Art. No. 105872, 2023, doi: [10.1016/j.engappai.2023.105872](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105872).

[11] R. Kashfi and S. H. Karimizadeh, “Fault diagnosis methods for induction motors using motor current signal analysis,” in *Proc. 7th Int. Conf.*

دقت شناسایی و زمان پردازش را بهبود بخشید. همچنین، استفاده ترکیبی از داده‌های ارتعاشی و آکوستیک منجر به دقت بالاتر در تشخیص عیب شد. علاوه بر این، کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده بهینه مرتبه کسری در شرایط عیب، کنترل مناسبی بر سرعت موتور ارائه دادند. آن‌ها توانستند در هنگام وقوع عیب به صورت مؤثر سرعت را کنترل کنند. این روش پیشنهادی قابلیت اطمینان سیستم‌های دوار مانند موتورها را بهبود می‌بخشد، به کاهش هزینه‌های نگهداری کمک می‌کند و ایمنی را افزایش می‌دهد. در نتیجه، این روش می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر در صنعت برای بهبود عملکرد و ایمنی ماشین‌های دوار مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۱- محدودیت‌ها و کارهای آینده

این مقاله برای تشخیص عیب و کنترل سرعت موتورهای توان پایین القایی ارائه شده است؛ برای اجرای الگوریتم روی موتورهای توان بالا نیاز به اجرای الگوریتم و تحلیل نتایج هست. همچنین برای عیوب نادر و خاص، نیاز به مجموعه داده کامل‌تری هست. در کارهای آینده، به منظور تشخیص طیف وسیع‌تری از عیوب می‌توان به عیوب دیگری مانند عیب میله‌های شکسته روتور پرداخت؛ در تشخیص این عیوب، می‌توان با ترکیب داده‌های جریان، آکوستیک و ارتعاش و روش‌های تلفیق داده به دقت مناسبی در تشخیص عیب دست یافت. همچنین می‌توان با استفاده از یادگیری انتقالی، تعمیم روش ارائه شده به موتورهای توان بالاتر را بررسی کرد. به علاوه، می‌توان از کنترل کامل‌تر مانند کنترل بهینه سینگولار مرتبه کسری و سایر الگوریتم‌های ابتکاری مانند الگوریتم بهینه‌سازی ملخ برای بهبود ساختار شبکه عصبی استفاده کرد.

۵- منابع

[1] V. S. Dehnavi and M. Shafiee, “Fault diagnosis of induction motors using novel measurement techniques and data fusion,” *Measurement*, Vol. 256, Art. No. 118135, 2025, doi: [10.1016/j.measurement.2025.118135](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118135).

[2] K. S. Krishna Veni and N. S. Kumar, “Diagnosis of bearing fault in induction motor using Bayesian optimization-based ensemble classifier,” *Electrical Engineering*, Vol. 106, pp. 1895–1905, 2023, doi: [10.1007/s00202-023-02040-w](https://doi.org/10.1007/s00202-023-02040-w).

[3] A. Almounajjed, A. K. Sahoo, and M. K. Kumar, “Condition monitoring and fault detection of induction motor based on wavelet denoising with

- Art. No. 109142, 2023, doi: [10.1016/j.res.2023.109142](https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109142).
- [20] R. R. Shubita *et al.*, "Fault detection in rotating machinery based on sound signal using edge machine learning," *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 6665–6672, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3237074](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237074).
- [21] R. Rajabioun *et al.*, "Distributed bearing fault classification of induction motors using 2-D deep learning model," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, Vol. 5, pp. 115–125, 2024, doi: [10.1109/JESTIE.2023.3323253](https://doi.org/10.1109/JESTIE.2023.3323253).
- [22] S. Ayankoso *et al.*, "Multisensory data-based fault diagnosis of induction motors using 1D and 2D convolutional neural networks," *Mechanisms and Machine Science*, pp. 1125–1135, 2024, doi: [10.1007/978-3-031-49421-5_92](https://doi.org/10.1007/978-3-031-49421-5_92).
- [23] E. Sonmez *et al.*, "A new deep learning model combining CNN for engine fault diagnosis," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, doi: [10.1007/s40430-023-04537-8](https://doi.org/10.1007/s40430-023-04537-8).
- [24] P. Borghesani *et al.*, "A Fourier-based explanation of 1D-CNNs for machine condition monitoring applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 205, Art. No. 110865, 2023, doi: [10.1016/j.ymssp.2023.110865](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110865).
- [25] C. Celebioglu *et al.*, "Smartphone-based bearing fault diagnosis in rotating machinery using audio data and 1D convolutional neural networks," in *Proc. Int. Conf. Computer Systems and Technologies*, 2024, pp. 149–154, doi: [10.1145/3674912.3674918](https://doi.org/10.1145/3674912.3674918).
- [26] S. Ippili *et al.*, "Deep learning-based mechanical fault detection and diagnosis of electric motors using directional characteristics of acoustic signals," *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 71, pp. 384–389, 2023, doi: [10.3397/1/377132](https://doi.org/10.3397/1/377132).
- [27] Y. Alkhanafseh *et al.*, "Advanced dual RNN architecture for electrical motor fault classification," *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 2965–2976, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3344676](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3344676).
- [28] A. Balamurugan *et al.*, "Fault diagnosis of three-phase induction motor using a hybrid ELSE-Electrical, Computer and Mechanical Engineering, Tehran, Iran, 2021 (in Persian).
- [12] B. Noori and M. Ojaghi, "Application of motor current signal analysis (MCSA) for stator core insulation fault diagnosis in three-phase induction motors," in *Proc. 8th Int. Conf. Electrical, Computer, Mechanical and Artificial Intelligence Engineering*, Mashhad, Iran, 2024 (in Persian).
- [13] M.-Q. Tran *et al.*, "Effective fault diagnosis based on wavelet and convolutional attention neural network for induction motors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 71, pp. 1–13, 2022, doi: [10.1109/TIM.2021.3139706](https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3139706).
- [14] H. Li *et al.*, "A normalized frequency-domain energy operator for broken rotor bar fault diagnosis," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 70, pp. 1–10, 2021, doi: [10.1109/TIM.2020.3009011](https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3009011).
- [15] N. Jia *et al.*, "Intelligent fault diagnosis of rotating machines based on wavelet time-frequency diagram and optimized stacked denoising auto-encoder," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, pp. 17139–17150, 2022, doi: [10.1109/JSEN.2022.3193943](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3193943).
- [16] P. Gangsar and R. Tiwari, "Signal-based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 144, Art. No. 106908, 2020, doi: [10.1016/j.ymssp.2020.106908](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106908).
- [17] H. Tao *et al.*, "Unsupervised cross-domain rolling bearing fault diagnosis based on time-frequency information fusion," *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 360, pp. 1454–1477, 2023, doi: [10.1016/j.jfranklin.2022.11.004](https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.11.004).
- [18] V. Safari Dehnavi and M. Shafiee, "Data-driven control framework using fractional order singular optimal control and optimized metaheuristic algorithms," *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 120, Art. No. 109728, 2024, doi: [10.1016/j.compeleceng.2024.109728](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109728).
- [19] H. Wang, J. Zheng, and J. Xiang, "Online bearing fault diagnosis using numerical simulation models and machine learning classifications," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 234,

- [37] F. Pourdadashi Komachali *et al.*, “Design of unknown input fractional order proportional–integral observer for fractional order singular systems with application to actuator fault diagnosis,” *IET Control Theory & Applications*, Vol. 13, No. 14, pp. 2163–2172, 2019, doi: [10.1049/iet-cta.2018.5712](https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5712).
- [38] V. S. Dehnavi and M. Shafiee, “LQR for generalized systems using metaheuristic algorithms based on disturbance observer,” in *Proc. 28th Iranian Conf. Electrical Engineering (ICEE)*, 2020, pp. 1–5, doi: [10.1109/ICEE50131.2020.9260723](https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9260723).
- [39] A. Safari Dehnavi and V. Safari Dehnavi, “Hardware-software cyber security platform for data protection in smart agricultural wireless sensor network with signal processing capability,” *Karafan Quarterly Scientific Journal*, in press, 2025, doi: [10.48301/kssa.2024.476579.2982](https://doi.org/10.48301/kssa.2024.476579.2982).
- [40] W. Jung *et al.*, “Vibration, acoustic, temperature, and motor current dataset of rotating machine under varying load conditions for fault diagnosis,” *Mendeley Data*, Vol. 6, 2023, doi: [10.17632/ZTMF3M7H5X.6](https://doi.org/10.17632/ZTMF3M7H5X.6).
- [41] M. Sehri and P. Dumond, “University of Ottawa electric motor dataset – vibration and acoustic faults under constant and variable speed conditions (UOEMD-VAFCVS),” *Mendeley Data*, Vol. 1, 2023, doi: [10.17632/MSXS4VJ48G.1](https://doi.org/10.17632/MSXS4VJ48G.1).
- [42] S. Adigintla and M. V. Aware, “Design and analysis of a speed controller for fractional-order-modeled voltage-source-inverter-fed induction motor drive,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, Vol. 50, pp. 2378–2397, 2022, doi: [10.1002/cta.3290](https://doi.org/10.1002/cta.3290).
- [43] M. Ertargin *et al.*, “Mechanical and electrical faults detection in induction motor across multiple sensors with CNN-LSTM deep learning model,” *Electrical Engineering*, 2024, doi: [10.1007/s00202-024-02420-w](https://doi.org/10.1007/s00202-024-02420-w).
- [44] Y. Li *et al.*, “Semi-supervised meta-path space extended graph convolution network for intelligent fault diagnosis of rotating machinery under time-varying speeds,” *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 251, Art. No. 110363, 2024.
- RNN technique,” *IETE Journal of Research*, pp. 1–10, 2024, doi: [10.1080/03772063.2024.2315199](https://doi.org/10.1080/03772063.2024.2315199).
- [29] C.-S. Tu *et al.*, “An audio-based motor-fault diagnosis system with SOM-LSTM,” *Applied Sciences*, Vol. 14, Art. No. 8229, 2024, doi: [10.3390/app14188229](https://doi.org/10.3390/app14188229).
- [30] J. Chuya-Sumba *et al.*, “Deep-learning method based on 1D convolutional neural network for intelligent fault diagnosis of rotating machines,” *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 4, Art. No. 2158, 2022, doi: [10.3390/app12042158](https://doi.org/10.3390/app12042158).
- [31] S. Gao *et al.*, “Bearing fault diagnosis based on adaptive convolutional neural network with Nesterov momentum,” *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, No. 7, pp. 9268–9276, 2021, doi: [10.1109/JSEN.2021.3050461](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3050461).
- [32] Z. Zhu *et al.*, “A review of the application of deep learning in intelligent fault diagnosis of rotating machinery,” *Measurement*, Vol. 206, Art. No. 112346, 2023, doi: [10.1016/j.measurement.2022.112346](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112346).
- [33] F. Wang *et al.*, “Cascade convolutional neural network with progressive optimization for motor fault diagnosis under nonstationary conditions,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, No. 4, pp. 2511–2521, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003353>.
- [34] P. Chen *et al.*, “An automatic speed adaption neural network model for planetary gearbox fault diagnosis,” *Measurement*, Vol. 171, Art. No. 108784, 2021, doi: [10.1016/j.measurement.2020.108784](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108784).
- [35] K. Sharma *et al.*, “Intelligent fault diagnosis of bearings based on convolutional neural network using infrared thermography,” *Proc. IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 236, No. 12, pp. 2439–2446, 2022, doi: [10.1177/13506501221082746](https://doi.org/10.1177/13506501221082746).
- [36] X. Zhao *et al.*, “Intelligent fault diagnosis of gearbox under variable working conditions with adaptive intraclass and interclass convolutional neural network,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Vol. 34, No. 9, pp. 6339–6353, 2022, doi: [10.1109/TNNLS.2021.3135877](https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3135877).



Experimental Investigation of Adhesively Bonded Composite–Composite Joints under Varied Loading Conditions Using U Shaped Arcan Specimens

Amirhossein Rabiei¹ , Saeed Rahnama^{*2} , Amir Kariman Moghadam³

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Birjand, Iran

2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Birjand, Iran

3. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khorasan Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

Abstract

This study presents a comprehensive, APA-style summary of an experimental investigation into modified Arcan U-shaped CFRP joints bonded with epoxy and polyurethane adhesives. The objective is to evaluate how loading angle and mode influence joint strength, failure mechanisms, and ultimate performance, with the goal of informing design practices for adhesive-bonded CFRP joints. The methodology entails preparing CFRP specimens with modified Arcan fixtures, subjecting them to loading angles of 0°, 45°, 60°, and 90°, and imposing mode-specific loading conditions (shear, mixed shear–tension, and tension). Key findings indicate systematic variation of strength and failure modes with loading angle, with distinct trends for adhesive/cohesive failures versus fiber-related failures. The results underscore the critical role of loading geometry in governing interfacial behavior, highlight the relevance of Arcan-based testing for evaluating bonded joints, and discuss implications for structural design, safety margins, and future research directions. Limitations include the controlled laboratory setting and specimen-scale constraints, suggesting caution when extrapolating to full-scale structures. The study advances understanding of CFRP joint performance under varied loading and offers practical guidance for engineers designing adhesive-bonded CFRP assemblies.

Keywords

CFRP

Arcan test

Bonded joints

Adhesive

surface treatment

Mode I, Mode II

Received: 19.07.2025

Revised: 27.08.2025

Accepted: 22.09.2025

*Corresponding Author

Saeed Rahnama

Email

srahnama@birjand.ac.ir

1- Introduction

Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates are increasingly used in aerospace, automotive, and civil structures due to high strength-to-weight ratios and tailorability. Bonded joints, which rely on adhesive interfaces to transfer loads between CFRP members, offer design flexibility but are sensitive to loading configuration, environmental conditions, and surface preparation. The Arcan test configuration enables quasi-static characterization of bonded joints under combined normal and shear stresses, facilitating a more complete understanding

of joint behavior than simple pure-shear or pure-tension tests.

The article investigates how loading angle and corresponding load modes affect the mechanical performance and failure modes of a modified Arcan U-shaped CFRP joint. Specifically, the study seeks to (1) quantify strength variations across loading angles (0°, 45°, 60°, 90°) and load modes (shear, mixed shear–tension, tension), (2) identify dominant failure mechanisms (adhesive vs. cohesive vs. fiber-related), and (3) discuss

How to Cite this Article:

[1] A. Rabiei, S. Rahnama, and A. Kariman Moghadam, "Experimental investigation of adhesively bonded composite–composite joints under varied loading conditions using U shaped Arcan specimens," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 139–151, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535605.1148> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

implications for adhesive selection, surface treatment, and joint geometry in CFRP structures. As shown in Figure 1, the overall test schematic illustrates the typical Arcan setup used to induce mixed-mode loading.

Previous research demonstrates that bond line strength and failure mode depend on stress state at the joint, with higher normal stresses promoting adhesive/cohesive failures and higher shear components influencing fiber tearing or interlaminar debonding. Arcan-based approaches have been shown to capture the interaction of shear and normal stresses, but systematic comparisons across multiple loading angles and joint configurations remain limited. The article situates its contribution within this context by systematically varying loading angles and documenting corresponding mechanical responses and failure narratives.

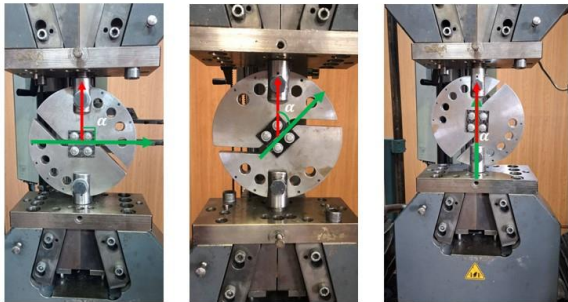


Figure 1: Conceptual schematic of the Arcan joint test setup for CFRP bonding, illustrating the mixed-mode loading path and boundary conditions



Figure 2: Steps in producing U-shaped adhesives

2- Research Methods

- Joint geometry: Modified Arcan U-shaped CFRP joints were fabricated by bonding CFRP laminates with selected adhesives. Surface preparation included standard cleaning and sanding to enhance adhesion, followed by curing per manufacturer guidelines. As shown in Figure 2
- Materials: CFRP laminates with specified ply layups were used. Two adhesive systems were examined: epoxy-based and polyurethane-based formulations, each with distinct modulus, toughness, and environmental durability characteristics.As shown in Table 1

Table 1: Mechanical properties of adhesives

$v_{12}=v_{13}=v_{23}$	E_{33} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)
0.29	7.43	7.43	94.5

- Surface treatment: Surface pretreatment protocols (e.g., sanding grit, primer if applicable) were applied to promote consistent bonding quality across specimens.
- Loading angles: Specimens were tested at 0°, 45°, 60°, and 90°, representing a progression from predominantly shear (0°) to predominantly normal/tensile (90°) loading.
- Loading modes: Tests encompassed pure shear, mixed shear–tension, and pure tension, enabling the assessment of how mode composition interacts with angle to influence strength and failure. As shown in Table 2
- Data acquisition: Load-displacement data were recorded throughout each test, alongside observations of failure initiation and propagation. Key metrics included ultimate joint strength, stiffness, and failure mode categorization.

Table 2: Arcan Test Loading modes

Loading modes	Sample naming	Sample number
Pure shear	S	S1
		S2
		S3
Mixed shear-tension	ST	ST1
		ST2
		ST3
Pure tension	T	T1
		T2
		T3

3- Results

- 0° loading (shear-dominated)
 - Strength: Moderate ultimate strength observed, with failure modes leaning toward interfacial decohesion and potential fiber-related initiation depending on adhesive system.
 - Failure modes: Predominantly adhesive or adhesive-cohesive in nature, with some specimens exhibiting fiber surface damage adjacent to the bondline.
- 45° loading
 - Strength: Notable changes in strength relative to 0°, with the mixed-mode loading introducing complex stress states at the bondline.
 - Failure modes: Mixed characteristics, with both adhesive/cohesive failures and occasional fiber-related damage.
- 60° loading
 - Strength: Further evolution of strength depending on adhesive system and laminate orientation; both adhesives showed sensitivity to angled loading.
 - Failure modes: A shift toward more cohesive failures within the adhesive or fiber-related mechanisms in certain configurations.
- 90° loading (tension-dominated)

- Strength: Distinct behavior with higher normal stress at the bondline; failure often initiated at the adhesive–substrate interface or within the adhesive layer itself.

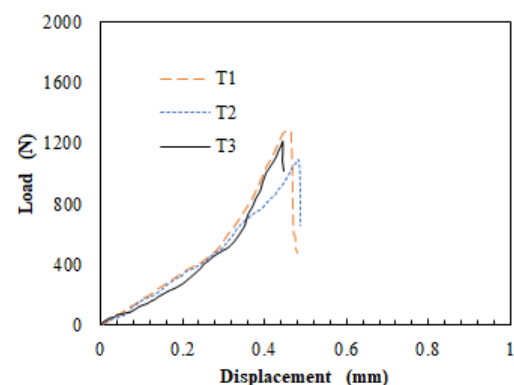
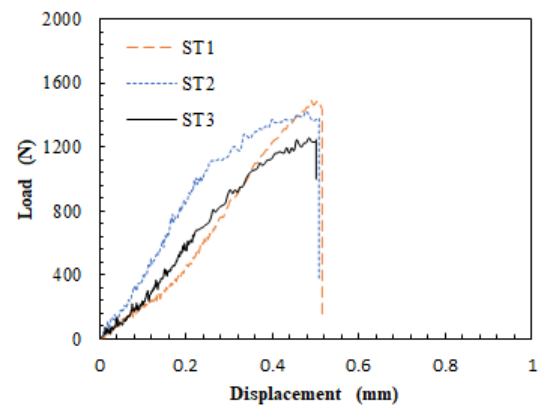
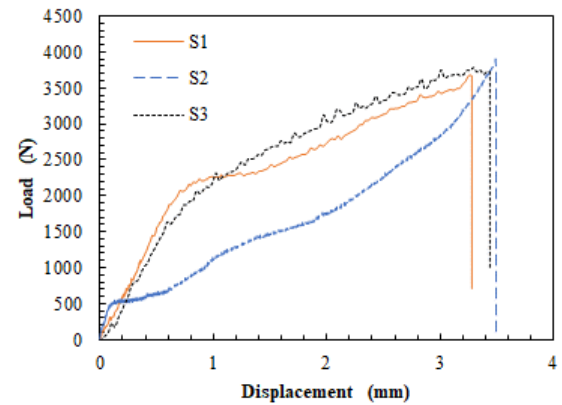


Figure 3: Force-displacement curves with different loading modes

Failure modes: Predominantly adhesive cohesive failures or interfacial debonding, with occasional fiber tearing in the CFRP laminate if the bond was particularly weak.

4- Conclusion

- Loading angle and mode significantly influence the strength and failure mode of modified Arcan CFRP joints. Higher angles tend to shift failure toward adhesive-related mechanisms, while certain angles in conjunction with specific adhesives can produce different failure pathways, including fiber-related damage.
- The Arcan test configuration proves effective for revealing the interplay between shear and normal stresses in bonded CFRP joints, informing material selection, joint geometry, and bonding processes.
- Future research should explore a broader range of adhesives, surface treatments, and CFRP layups to generalize findings across more structural configurations.
- Investigations under environmental conditions (temperature, humidity) and long-term aging would provide insight into durability and service life.
- Finite element modeling of the Arcan joint under these loading angles could complement experimental results and help predict behavior for complex geometries.

Table 3: Stress values obtained from the Arcan test

Loading modes	Sample number	Stress (MPa)	Standard deviation (MPa)	Average Stress (MPa)
Pure shear	S1	8.38	0.29	8.60
	S2	8.94		
	S3	8.50		
Mixed shear-tension	ST1	3.41	0.28	3.41
	ST2	3.16		
	ST3	2.85		
Pure tension	T1	2.96	0.21	2.75
	T2	2.54		
	T3	2.76		

5- References

- [1] R. Ciardiello, L. Greco, M. Miranda, F. Di Sciullo, and L. Goglio, "Experimental investigation on adhesively bonded U-shaped metallic joints using the Arcan test," *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 1, p. 100010, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.jajp.2020.100010](https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100010)
- [2] A. Benelli, R. Ciardiello, C. Boursier Niutta, and L. Goglio, "Experimental and numerical characterization of adhesive joints with composite substrates by means of the Arcan test," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 122, p. 103321, Feb. 2023, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2022.103321](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103321)
- [3] E. Ç. Kavdir and M. D. Aydin, "Experimental and numerical study on the mechanical behaviours of adhesively bonded joints," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 184, p. 107725, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.compositesb.2019.107725](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107725)



بررسی تجربی رفتار اتصال چسبی کامپوزیت-کامپوزیت تحت شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از نمونه U شکل آرکان

امیرحسین ربیعی^{۱*}، سعید رهنما^۲، امیر کریمان مقدم^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- استادیار، مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی خراسان، مشهد، ایران

چکیده

در این پژوهش، رفتار مکانیکی اتصالات چسبی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) تحت شرایط مختلف بارگذاری با استفاده از نمونه اصلاح شده آرکان با هندسه U شکل مورد بررسی قرار گرفت. تک‌لایه‌های CFRP با آرایش لایه‌ای [۹۰/۰] ساخته شده و با استفاده از چسب اپوکسی دوجزئی به یکدیگر متصل شدند. آزمایش‌ها در سه زاویه بارگذاری صفر درجه (برش خالص)، ۴۵ درجه (ترکیبی برش-کشش) و ۹۰ درجه (کشش خالص) انجام شد. پاسخ‌های نیرو-جابجایی، مقادیر بیشینه تنش، و مکانیزم‌های شکست مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بالاترین استحکام اتصال با مقدار میانگین ۸/۶۰ درصد در حالت برش خالص رخ می‌دهد که ناشی از وقوع شکست الیاف در ناحیه چسبندگی است. در مقابل، در حالت کشش خالص تنها شکست چسبی مشاهده شد و اتصال کمترین مقاومت را با مقدار میانگین ۲/۷۵ درصد از خود نشان داد. تغییر شرایط بارگذاری از برش به کشش منجر به کاهش بیش از ۶۰ درصدی در استحکام اتصال گردید. طراحی نمونه اصلاح شده آرکان به گونه‌ای است که شکست به ناحیه چسب محدود شده و هیچ‌گونه آسیب یا شکست در صفحات CFRP مشاهده نشد. این روش می‌تواند به عنوان روشی کارآمد برای ارزیابی دقیق عملکرد اتصالات چسبی در سازه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گیرد و یافته‌های این تحقیق می‌توانند در بهینه‌سازی اتصالات چسبی در صنایع پیشرفته‌ای نظیر هوافضا و خودروسازی کاربرد داشته باشند.

کلمات کلیدی

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده
با الیاف کربن
اتصال چسبی
آزمون آرکان
سطح شکست
شرایط بارگذاری

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

*نویسنده مسئول

سعید رهنما

ایمیل

srahnama@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

پانل‌های بدنه بهره می‌برد. در مهندسی عمران مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها متکی بر کامپوزیت‌های الیاف کربن است که دوام و مقاومت لرزه‌ای را افزایش می‌دهند [۲].

سازه‌های سبک وزنی که بیشتر در صنعت استفاده می‌شوند، از جنس کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن، آلیاژهای سبک یا ترکیبی از آنها هستند که معمولاً با چسب‌های ساختاری اپوکسی پرمصرف به یکدیگر متصل می‌شوند. امروزه، اتصالات چسبی به طور فزاینده‌ای برای مونتاژ سازه‌ها در تمام

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن^۱ (CFRP) به دلیل نسبت استحکام به وزن و سفتی عالی، به طور گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی و مهندسی عمران استفاده می‌شوند [۱]. پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن در صنایع هوافضا، به طراحی سبک‌وزن قطعات هواپیما مانند بدنه و بال‌ها کمک می‌کند و موجب بهبود بازدهی سوخت و عملکرد می‌شود. صنعت خودروسازی با کاهش وزن خودرو، افزایش بازدهی سوخت و تقویت ایمنی از طریق استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن در شاسی و

¹ Carbon Fiber Reinforced Polymer

How to Cite this Article:

[1] A. Rabiei, S. Rahnema, and A. Kariman Moghadam, "Experimental investigation of adhesively bonded composite-composite joints under varied loading conditions using U shaped Arcan specimens," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 139-151, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535605.1148> (in Persian)



کاربردهای مهندسی، به عنوان مثال، خودروسازی، هوافضا، پروتزه‌های پزشکی، مهندسی عمران و وسایل ورزشی استفاده می‌شود. در مقایسه با روش‌های مکانیکی اتصال، مثل پرچکاری و پیچ و مهره، اتصال چسبی مزایایی از جمله: توزیع یکنواخت تنش، کاهش وزن، زمان فرآیند کمتر، کاهش خوردگی، عایق صوتی و تضعیف ارتعاش را ارائه می‌دهد [۳ و ۴]. اگرچه چسب‌ها عمدتاً برای تحمل تنش‌های برشی طراحی شده‌اند، اما اجزای مکانیکی معمولاً شرایط بارگذاری و زوایای متفاوتی را در طول عمر خود حین سرویس‌دهی تجربه می‌کنند. بنابراین، نیاز به یک توصیف دقیق‌تر وجود دارد که خواص مکانیکی اتصالات چسب را تحت زوایای بارگذاری مختلف در نظر بگیرد. آزمون آرکان^۱ که تجهیزات آن برای اولین بار به عنوان روشی برای تولید حالت‌های تنش صفحه‌ای یکنواخت با کاربرد در مواد تقویت شده با الیاف توسعه داده شد [۵]، همچنین به طور گسترده برای توصیف اتصالات چسبی استفاده شده است.

فریدون و همکارانش تأثیر نانولوله‌های کربنی بر استحکام چسبندگی بین کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی و آلیاژ آلومینیوم را با استفاده از نمونه تک لبه بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند افزودن این نانوساختارها به ماتریس اپوکسی می‌تواند انتقال تنش را بهبود داده، نقش پل‌زنی در فصل مشترک کامپوزیت و فلز ایفا کرده و در نهایت استحکام چسبندگی سیستم را افزایش دهد [۶]. استامولیس^۲ و همکارانش رفتار شکست اتصالات فلزی چسبی دارای ترک اولیه با استفاده از تجهیز آرکان را بررسی کردند. هدف اصلی، ارزیابی چقرمگی شکست چسب در شرایط بارگذاری ترکیبی کششی-برشی (مدهای I و II) و همچنین بارگذاری فشاری-برشی بود. روش‌های سنتی مانند آزمایش‌های تیر یکسرگیردار دولبه (DCB) و نمونه خمشی انتها ترکدار (ENF) محدودیت‌هایی در اندازه‌گیری دقیق طول ترک و درک رفتار تحت بارگذاری ترکیبی و فشاری-برشی دارند. تجهیز آرکان، با قابلیت تنظیم زاویه بارگذاری، به عنوان روشی جایگزین برای اندازه‌گیری خواص شکست چسب‌ها معرفی شده بود [۷].

داسیلوا^۳ و همکارانش روش‌شناسی آزمون آرکان را با سایر روش‌های آزمایشی مانند آزمون اتصال تک لبه، آزمون برش چسبیده ضخیم، آزمون تیر یکسرگیردار دولبه و آزمون پوسته‌کنی T شکل مقایسه کردند و نشان دادند که با استفاده از روش آزمون آرکان،

می‌توان اتصال را تحت بار برشی ترکیب شده با کشش یا فشار با استفاده از دستگاه آزمایش کشش معمولی قرارداد [۸]. کریک‌کدک^۴ و همکارانش از نمونه آزمون آرکان اصلاح شده از جنس فولاد برای بررسی رفتار اتصال چسبی در شرایط بارگذاری برشی - کششی و برشی-فشاری استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان دهنده بررسی مناسب رفتار اتصال چسبی با نمونه پیشنهادی بوده است [۹]. آلفانسو^۵ و همکارانش از نمونه اصلاح شده آزمون آرکان برای بررسی رفتار اتصال چسبی فلز-فلز و کامپوزیت - کامپوزیت در شرایط مختلف بارگذاری استفاده کردند. آن‌ها همچنین تأثیر پارامترهای مهم بر رفتار اتصال چسبی، مانند شرایط سطحی کامپوزیت‌ها، جهت الیاف، رطوبت و وجود گریس را بررسی کردند [۱۰]. سیردیلو^۶ و همکارانش پخت چسب به روش کاتافورز^۷ بر رفتار اتصال چسبی در شرایط بارگذاری با زوایای مختلف را با نمونه U شکل آزمون آرکان با چسبدهای آلومینیومی بررسی کردند. آن‌ها از دو دما برای فرآیند پخت کاتافورز استفاده کردند. آزمون آرکان برای مشخص کردن رفتار مکانیکی اتصالات چسب با استفاده از پنج زاویه بارگذاری مختلف صفر درجه (شرایط برشی)، ۳۰ درجه، ۴۵ درجه، ۶۰ درجه (برشی-کشش ترکیبی) و ۹۰ درجه (کشش) انجام شده بود. آزمایش‌های تجربی نشان داده بود که چرخه‌های پخت اتخاذ شده در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس برای ۱۶ دقیقه و ۱۶۰ درجه سلسیوس برای ۴۵ دقیقه، هر دو قادر به پخت کامل چسب هستند [۱۱]. بنلی^۸ و همکارانش تأثیر نرمی چسبدها بر عملکرد مکانیکی اتصالات چسبی تحت سه شرایط بارگذاری مختلف (برش خالص، بار برشی-کششی ترکیبی و کشش خالص) از طریق آزمون آرکان را بررسی کردند. چسبدهای U شکل از جنس کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن با ضخامت نهایی ۱ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر با چسب‌های اپوکسی سفت و پلی اورتان چسبانده شده بودند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده مناسب بودن این نوع آزمون برای توصیف کامل اتصال چسبی بوده است [۱۲].

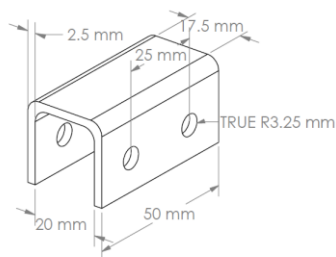
در این تحقیق، با طراحی نمونه U شکل اصلاح‌شده از جنس کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن به‌جای چسبدهای فلزی متداول در مطالعات پیشین، روشی دقیق برای ارزیابی رفتار مکانیکی اتصال چسبی در شرایط مختلف بارگذاری ارائه شده است. تمرکز شکست در ناحیه چسب و عدم خرابی چسبدها،

⁵ Alfonso⁶ Ciardiello⁷ Cataphoresis⁸ Benelli¹ Arcan Test² Stamoulis³ Da Silva⁴ Créac'hcadec

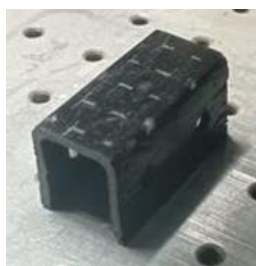
جدول ۱: خواص مکانیکی چسبنده‌ها [۱۱]

$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	E_{33} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)
0.29	7.43	7.43	94.5

بعد از تولید، چسبنده‌ها مطابق ابعاد نشان داده شده در شکل ۲ (الف) برشکاری و سوراخکاری شدند. شکل ۲ (ب) چسبنده نهایی ساخته شده را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۲: چسبنده‌های U (شکل الف) ابعاد چسبنده (ب) چسبنده U شکل

بعد از تولید چسبنده‌ها سطح آنها ابتدا با سنباده شماره ۱۰۰ زبر شدند. سپس از استون برای تمیز کردن سطح آنها استفاده شد. بعد از آماده‌سازی سطح اتصال از چسب اپوکسی دو جزئی R34 که بطور گسترده برای اتصال قطعات کامپوزیتی و فلزی در صنعت خودروسازی بکار می‌رود، برای ایجاد اتصال چسبی استفاده شد. مطابق شکل ۳ (الف) ضخامت چسب ۰/۳ میلی‌متری با استفاده از دو ورق مایلر هر کدام با ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر ایجاد شده است. همچنین ابعاد ناحیه اتصال ۱۷/۵×۲۵ میلی‌متر مربع است. بعد از ایجاد اتصال مطابق دستورالعمل شرکت سازنده چسب اپوکسی استفاده شده، ابتدا نمونه‌ها ۲۴ ساعت در دمای محیط سپس برای پخت نهایی ۳۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس داخل آون قرار داده شدند. خواص مکانیکی چسب اپوکسی براساس مستندات فنی شرکت سازنده مطابق جدول ۲ می‌باشد. شکل ۳ (ب) نمونه نهایی مونتاژ شده آزمون آرکان را نشان می‌دهد.

امکان تحلیل مستقل اتصال را فراهم کرده است. همچنین با بررسی سه زاویه بارگذاری (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) و تحلیل مکانیزم‌های شکست، تأثیر نوع بارگذاری بر استحکام اتصال به طور سیستماتیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، تأثیر پارگی الیاف سطحی چسبنده‌ها به‌عنوان مکانیزم افزایش‌دهنده استحکام اتصال چسبی بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا مراحل آماده‌سازی نمونه‌های آزمون آرکان ارائه و سپس مراحل انجام آزمون آرکان در حالت‌های مختلف بارگذاری بیان خواهد شد.

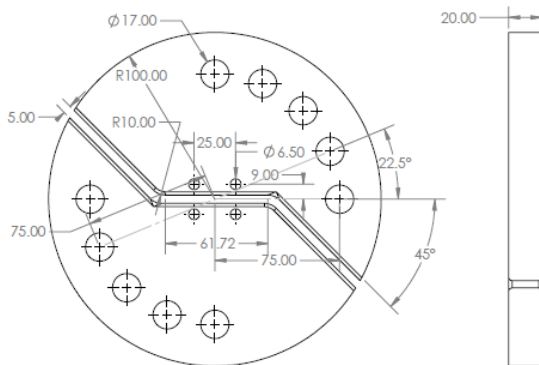
۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی رفتار اتصال چسبی در شرایط مختلف بارگذاری از نمونه آرکان U شکل استفاده شده است. برای تولید چسبنده‌ها از الیاف کربن تک جهته با وزن ۲۵۰ گرم در هر مترمربع به عنوان تقویت کننده و از رزین دوجزئی LR620 به عنوان زمینه استفاده شده است. خواص مکانیکی چسبنده‌ها مطابق جدول ۱ می‌باشد. چسبنده‌های U شکل با استفاده از قالب فولادی و با روش لایه‌گذاری دستی مطابق شکل ۱ تولید شدند. از ۱۲ لایه با جهت [۹۰/۰] برای تولید چسبنده‌ها استفاده شده است. ترتیب لایه‌چینی به شکلی است که لایه سطحی که در معرض اتصال قرار دارد با جهت صفر درجه باشد. مطابق دستورالعمل شرکت سازنده رزین، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداشته شدند، سپس برای پخت نهایی به مدت ۴ ساعت داخل کوره با دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند.



شکل ۱: مراحل تولید چسبنده‌های U شکل

سوراخ‌ها با زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به یکدیگر ماشین‌کاری شده‌اند که امکان بارگذاری در شرایط مختلف را فراهم می‌کنند.



(الف)



(ب)

شکل ۴: فیکسچر آزمون آرکان (الف) نقشه فیکسچر (ب) فیکسچر نهایی ساخته شده

آزمون آرکان توسط دستگاه آزمون کشش زوئیک Z-250 با ظرفیت ۵ تن استفاده شده است. آزمون در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۴۵ درصد انجام شده است. شکل ۵ تجهیزات آزمون آرکان را نشان می‌دهد.



شکل ۵: تجهیزات آزمون آرکان

جدول ۲: خواص مکانیکی چسب اپوکسی

متوسط استحکام برشی تک لبه فلز-فلز ۱۲/۴۰ (مگاپاسکال)
متوسط استحکام برشی تک لبه کامپوزیت-کامپوزیت ۱۰ (مگاپاسکال)
استحکام خمشی (مگاپاسکال) ۴۰



(الف)



(ب)

شکل ۳: نمونه‌های آرکان (الف) مراحل چسباندن (ب) نمونه نهایی

۲-۲- تجهیزات آزمون آرکان

برای انجام آزمون آرکان با استفاده از نمونه U شکل از فیکسچر نشان داده شده در شکل ۴ استفاده شده است. جنس فیکسچر آزمون آرکان از فولاد ST-37 می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، فیکسچر آرکان دارای دو قسمت فولادی نیم‌دایره‌ای شکل می‌باشد که قسمت بالایی به فک ثابت دستگاه آزمون و قسمت پایینی به فک متحرک دستگاه توسط یک پیچ متصل می‌شود. سوراخ‌های با قطر ۱۷ میلی‌متر محل اتصال فیکسچر به دستگاه آزمون می‌باشند، این

جدول ۳: نامگذاری نمونه‌های آرکان

شماره نمونه	نام گذاری نمونه	شرایط بارگذاری
S1	S	بارگذاری برشی
S2		
S3		
ST1	ST	بارگذاری کششی-برشی
ST2		
ST3		
T1	T	بارگذاری کششی
T2		
T3		

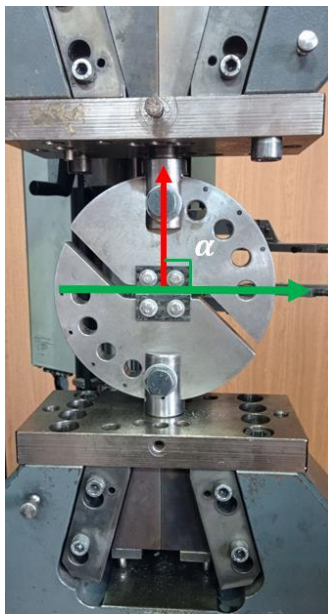
شکل ۶ شرایط بارگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، آزمون آرکان در سه زاویه بارگذاری به شرح زیر انجام شده است:

• بارگذاری برشی خالص ($\alpha = 0^\circ$)

• بارگذاری کششی-برشی ($\alpha = 45^\circ$)

• بارگذاری کششی خالص ($\alpha = 90^\circ$)

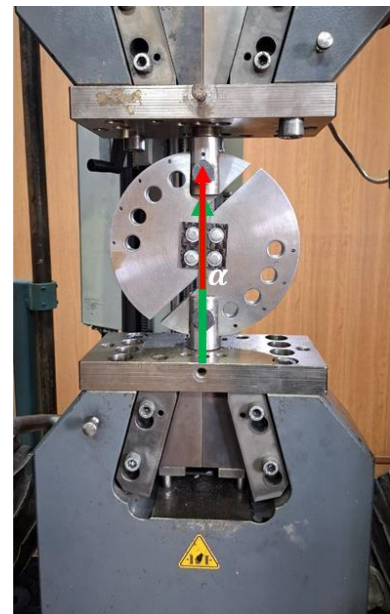
برای هر حالت تعداد سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. جدول ۳ نامگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین آزمون آرکان به صورت کنترل جابه‌جایی و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. در حین آزمون مقادیر نیرو و جابه‌جایی متناظر آن توسط دستگاه آزمون ثبت شده است.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۶: پیکربندی آزمون آرکان. الف) بارگذاری برشی خالص ($\alpha = 0^\circ$) ب) بارگذاری کششی-برشی ($\alpha = 45^\circ$) ج) بارگذاری کششی خالص ($\alpha = 90^\circ$)

۳/۴۸ میلی‌متر می‌باشد. این در حالی است که با توجه به شکل ۷ (ج) کمترین نیروی قابل تحمل اتصال مربوط به نمونه T2 در شرایط بارگذاری کششی خالص به مقدار ۱۱۱۱ نیوتن در جابه‌جایی متناظر ۰/۴۸ میلی‌متر بوده است. بیشترین مقدار کاهش در نیروی قابل تحمل با تغییر شرایط بارگذاری از زاویه صفر درجه به زاویه ۴۵ درجه به مقدار ۶۱/۸۵ درصد می‌باشد، این در حالی است که تغییر زاویه بارگذاری از ۴۵ درجه به ۹۰ درجه باعث کاهش ۲۰ درصدی در بیشینه نیروی قابل تحمل اتصال شده است. باتوجه به منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی اتصالات چسبی در برابر بارگذاری برشی استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهند، اما با تغییر حالت بارگذاری به کششی استحکام اتصال کاهش پیدا می‌کند. این کاهش استحکام بدلیل تغییر در مکانیزم

۳- نتایج

در این بخش ابتدا نمودارهای نیرو-جابه‌جایی به‌دست‌آمده از آزمون آرکان بررسی و سپس مقادیر استحکام ارائه خواهد شد. در نهایت تأثیر شرایط بارگذاری بر سطح شکست نمونه‌ها بررسی خواهد شد.

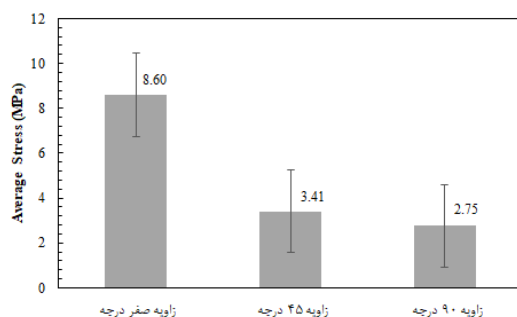
شکل ۷ منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی در شرایط مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است با تغییر از حالت بارگذاری کششی به برشی بیشینه نیروی قابل تحمل اتصال و جابه‌جایی متناظر آن افزایش می‌یابد. باتوجه به شکل ۷ (الف) بیشترین نیروی قابل تحمل اتصال مربوط به نمونه S2 در شرایط بارگذاری برشی خالص به مقدار ۳۹۱۳ نیوتن در جابه‌جایی متناظر

جدول ۴ مقادیر استحکام در شرایط مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. استحکام محاسبه شده در جدول ۴ حاصل تقسیم نیروی بیشینه به سطح مقطع اتصال می‌باشند.

جدول ۴: مقادیر تنش‌های بدست آمده از آزمون آرکان

شرایط بارگذاری	شماره نمونه	مقدار تنش (MPa)	انحراف معیار (MPa)	مقدار متوسط تنش (MPa)
بارگذاری برشی	S1	۸/۳۸		
	S2	۸/۹۴	۰/۲۹	۸/۶۰
	S3	۸/۵۰		
بارگذاری کششی-برشی	ST1	۳/۴۱		
	ST2	۳/۱۶	۰/۲۸	۳/۴۱
	ST3	۲/۸۵		
بارگذاری کششی	T1	۲/۹۶		
	T2	۲/۵۴	۰/۲۱	۲/۷۵
	T3	۲/۷۶		

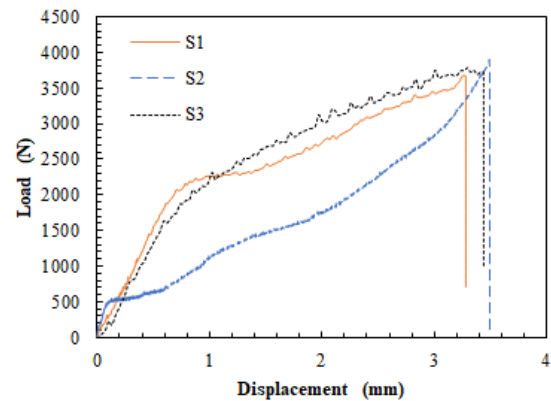
باتوجه به جدول ۳ استحکام متوسط در شرایط بارگذاری برشی (زاویه صفر درجه) ۸/۶۰ مگاپاسکال، در شرایط بارگذاری ترکیبی کششی - برشی (زاویه ۴۵ درجه) ۳/۴۱ مگاپاسکال و در شرایط بارگذاری کششی (زاویه ۹۰ درجه) ۲/۷۵ مگاپاسکال محاسبه شده است. از اطلاعات جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت تغییر زاویه بارگذاری از زاویه صفر درجه به ۴۵ درجه باعث کاهش ۶۰/۳۴ درصدی در استحکام اتصال شده است. این درحالی است که تغییر زاویه بارگذاری از ۴۵ درجه به ۹۰ درجه باعث کاهش ۱۹/۳۵ درصدی در استحکام اتصال شده است. شکل ۸ مقادیر استحکام اتصال چسبی در شرایط مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد.



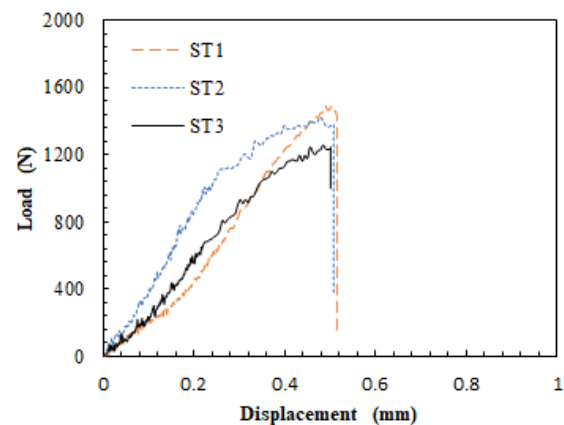
شکل ۸: مقادیر استحکام در شرایط مختلف بارگذاری

شکل ۹ سطح شکست نمونه‌های آرکان با شرایط مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد.

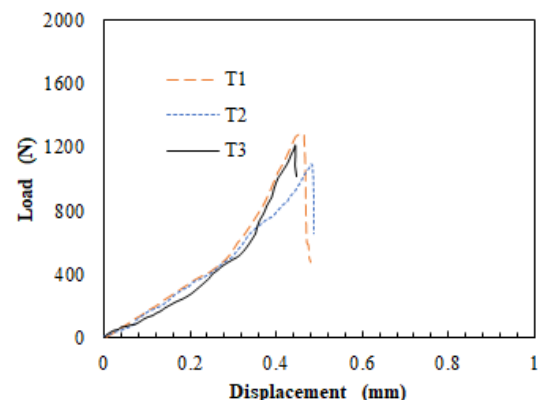
شکست می‌باشد، بصورتی که در اتصال چسبی تحت بارگذاری کششی شکست از لبه‌های اتصال U شکل آغاز می‌شود، اما در بارگذاری برشی شکست از مرکز اتصال آغاز می‌شود [۹].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷: منحنی‌های نیرو-جابجایی با شرایط مختلف بارگذاری.

الف) بارگذاری برشی خالص ($\alpha=0^\circ$) ب) بارگذاری کششی-برشی ($\alpha=45^\circ$)

ج) بارگذاری کششی خالص ($\alpha=90^\circ$)

به شکل ۹ (ب) در شرایط بارگذاری با زاویه ۴۵ درجه تنها دو حالت خرابی اتصال و خرابی چسب قابل مشاهده است. این در حالی است که در بارگذاری با زاویه ۹۰ درجه تنها خرابی اتصال ایجاد شده است. در اتصال چسبی با چسبنده‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن ایجاد حالت خرابی پارگی الیاف باعث افزایش استحکام اتصال می‌شود [۱۳]. با توجه به مکانیزم شکست ایجاد شده در زاویه بارگذاری صفر درجه خرابی پارگی الیاف باعث افزایش قابل توجه استحکام اتصال شده است. همچنین با مقایسه شکل ۹ (ب) و (ج) ایجاد حالت خرابی چسب در زاویه بارگذاری ۴۵ درجه باعث افزایش ۱۹/۳۵ درصدی در استحکام اتصال شده است.

باتوجه به چیدمان صفر و ۹۰ درجه الیاف کربن هنگام تولید نمونه‌های U شکل آرکان و با افزایش ضخامت نمونه در هیچ کدام از شرایط بارگذاری خرابی چسبنده‌ها^۴ مشاهده نشد. این موضوع به این دلیل اهمیت دارد که می‌توان با استفاده از نمونه آرکان اصلاح شده به طور دقیق رفتار اتصال چسبی را بررسی نمود.

۴- تحلیل نتایج

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که استحکام اتصال چسبی وابستگی شدیدی به زاویه بارگذاری دارد و با تغییر حالت بارگذاری از برشی خالص به کششی خالص، روندی نزولی مشاهده می‌شود. برای تبیین این رفتار می‌توان توزیع تنش و مکانیزم‌های شکست فعال شده در هر حالت را مورد بررسی قرار داد.

نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان با مطالعه سیردیلو و همکاران [۱۱] مقایسه نمود. آن‌ها با استفاده از نمونه‌ی U شکل آرکان و چسبنده‌های آلومینیومی نشان دادند که بیشترین استحکام اتصال در شرایط بارگذاری برشی و کمترین در بارگذاری کششی حاصل می‌شود. روند مشاهده شده در تحقیق حاضر نیز مشابه است؛ به طوری که استحکام اتصال در حالت برشی به طور میانگین ۸/۶۰ مگاپاسکال و در حالت کششی ۲/۷۵ مگاپاسکال به دست آمد. این همخوانی رفتاری با نتایج مرجع [۱۱] نشان می‌دهد که طراحی نمونه‌ی اصلاح شده‌ی U شکل قابلیت اطمینان بالایی در ارزیابی عملکرد اتصالات چسبی دارد، حتی با وجود تفاوت در جنس چسبنده‌ها (CFRP در این پژوهش در مقابل آلومینیوم در مرجع [۱۱]). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر جنس چسبنده بر روند کلی تغییرات



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹: سطح شکست نمونه‌های آرکان با شرایط مختلف بارگذاری.
الف) بارگذاری برشی خالص ($\alpha=0^\circ$) ب) بارگذاری کششی - برشی ($\alpha=45^\circ$)
ج) بارگذاری کششی خالص ($\alpha=90^\circ$)

شکل ۹ (الف) نشان دهنده سه حالت خرابی پارگی الیاف^۱، خرابی اتصال^۲ و خرابی چسب^۳ در شرایط بارگذاری صفر درجه است. باتوجه

³ Cohesive Failure

⁴ Adherent Failure

¹ Fiber Tearing

² Adhesive Failure

همچنین باید توجه داشت که به دلیل ناهمسان‌گردی مکانیکی CFRP و لایه‌چینی [۹۰/۰]، در بارگذاری برشی بخشی از بار توسط الیاف منتقل می‌شود، اما در بارگذاری کششی خالص کل بار به چسب تحمیل می‌گردد. این تفاوت در نقش باربری چسبنده‌ها نیز عامل مؤثری در کاهش استحکام اتصال با افزایش زاویه بارگذاری است.

۵- جمع‌بندی

در این مطالعه رفتار اتصال چسبی کامپوزیت-کامپوزیت در شرایط مختلف بارگذاری کششی، ترکیب کششی-برشی و برشی خالص با استفاده از نمونه آرکان U شکل اصلاح شده بررسی شده است. منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی، مقادیر استحکام و سطح شکست نمونه‌ها در شرایط مختلف بارگذاری بررسی شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:

- رفتار اتصال چسبی وابسته به شرایط بارگذاری است و در حالت بارگذاری برشی اتصال چسبی بیشترین مقدار استحکام را از خود نشان می‌دهد.
- در مود بارگذاری برشی ($\alpha=0^\circ$) فعال‌شدن دو مکانیزم شکست ترکیبی پارگی الیاف و خرابی اتصال باعث افزایش تا $60/34$ درصد در استحکام اتصال چسبی می‌شود.
- در حالت بارگذاری 45° درجه نسبت به 90° درجه خرابی چسب می‌تواند تا $19/35$ درصد استحکام را افزایش دهد.
- نتایج تجربی نشان می‌دهند که در هیچ‌یک از شرایط بارگذاری، خرابی در چسبنده‌های کامپوزیتی مشاهده نشده است. این موضوع کارایی و دقت طراحی نمونه‌های آرکان اصلاح‌شده را در ارزیابی مستقل رفتار چسب تأیید می‌کند.

۶- مراجع

- [1] A. Kariman Mghaddam and S. Rahnema, "Experimental Investigation of the Effect of the Functional Pattern of Laser Surface Treatment on the Strength of Aluminum / Composite Adhesive Bonded Joint in the Mode I Fracture," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 23, No. 8, pp. 485-495, 2023, doi: [10.22068/jstc.2023.1990008.1828](https://doi.org/10.22068/jstc.2023.1990008.1828). (in Persian)
- [2] Y. H. Kim, S. Kumar, K. M. Lee, S. Y. Kim, S. W. Yoon, S. Y. Bae, and D. H. Shin, "Advancing carbon fiber and its composites technology: Korea's

استحکام تحت زوایای مختلف بارگذاری تأثیری نداشته و این امر بر اعتبار نتایج تحقیق حاضر می‌افزاید.

در شرایط برشی خالص (0°)، تنش‌ها به طور نسبتاً یکنواخت در سطح چسب توزیع می‌شوند [۸]. در این حالت، استحکام اتصال چسبی به دلیل فعال‌شدن دو مکانیزم شکست ترکیبی افزایش می‌یابد. علاوه بر جدایش چسب از سطح اتصال، بخشی از بار توسط لایه‌های سطحی الیاف CFRP منتقل شده و در نقاطی، تنش موجب پارگی الیاف می‌شود. این پارگی الیاف به‌عنوان یک مکانیزم تقویت‌کننده عمل کرده و انرژی شکست کل اتصال را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، برای گسترش ترک در اتصال، علاوه بر غلبه بر چسبندگی چسب، باید مقاومت مکانیکی الیاف نیز شکسته شود؛ بنابراین بار موردنیاز برای شکست افزایش‌یافته و استحکام اتصال بالاتر می‌رود. این ترکیب انرژی شکست ناشی از جدایش چسب و پارگی الیاف سبب می‌شود که اتصال چسبی در حالت برشی بیشترین مقاومت خود را نشان دهد (میانگین $8/60$ مگاپاسکال). در مقابل، در حالت کششی خالص که شکست محدود به ناحیه چسب است و الیاف نقشی در فرایند شکست ندارند، استحکام اتصال به کمترین مقدار خود ($2/75$ مگاپاسکال) کاهش می‌یابد.

در شرایط ترکیبی کششی-برشی (45°)، ترکیب دو مؤلفه برش و کشش باعث ایجاد تمرکز تنش در لبه‌های اتصال می‌شود. این تمرکز تنش سبب می‌شود که شکست عمدتاً به‌صورت جدایش چسب از چسبنده اتفاق بیفتد [۷]. از آنجایی که این مکانیزم انرژی شکست کمتری نسبت به پارگی الیاف دارد، کاهش قابل‌توجهی در مقاومت اتصال نسبت به حالت برشی خالص رخ می‌دهد.

در شرایط کشش خالص (90°)، تنش‌های عمود بر سطح اتصال به بیشینه مقدار خود می‌رسند و تقریباً تمام بار به چسب منتقل می‌شود [۱۱]. در این حالت هیچ مکانیزم جذب انرژی ثانویه (مانند پارگی الیاف یا خرابی چسب) فعال نمی‌شود و شکست تنها به‌صورت جدایش یک‌سطحی رخ می‌دهد. به همین دلیل، استحکام اتصال در این شرایط حداقل مقدار خود را دارد.

از دیدگاه انرژی شکست می‌توان بیان کرد که در بارگذاری برشی خالص، مجموع انرژی شکست شامل سهم چسب و سهم پارگی الیاف است که منجر به بالاترین مقدار مقاومت می‌شود [۱۳]. در مقابل، در بارگذاری کششی خالص، انرژی شکست صرفاً محدود به گسیختگی چسب بوده و به همین دلیل کمترین استحکام حاصل می‌شود.

- [8] L. F. M. Da Silva, D. A. Dillard, B. Blackman, and R. D. Adams, Eds., *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. John Wiley & Sons, 2012, pp. 50-82.
- [9] R. Créac'Hcade, L. Sohier, and C. Cellard, "A stress concentration-free bonded arcane tensile compression shear test specimen for the evaluation of adhesive mechanical response," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 61, pp. 81-92, 2015, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.05.003).
- [10] L. Alfonso, C. Badulescu, and N. Carrère, "Use of the modified Arcan fixture to study the strength of bonded assemblies for automotive applications," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 80, pp. 104-114, 2018, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2017.09.014](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.09.014).
- [11] R. Ciardiello, L. Greco, M. Miranda, F. Di Sciullo, and L. Goglio, "Experimental investigation on adhesively bonded U-shaped metallic joints using the Arcan test," *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 1, p. 100010, 2020, doi: [10.1016/j.jajp.2020.100010](https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100010).
- [12] A. Benelli, R. Ciardiello, C. B. Niutta, and L. Goglio, "Experimental and numerical characterization of adhesive joints with composite substrates by means of the Arcan test," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 122, p. 103321, 2023, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2022.103321](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103321).
- [13] A. Kariman Moghadam and S. Rahnema, "Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 4, pp. 2116-2127, 2023, doi: [10.22068/jstc.2023.1990008.1828](https://doi.org/10.22068/jstc.2023.1990008.1828). (in Persian)
- strategic growth and innovation," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 256, p. 112266, 2025, doi: [10.1016/j.compositesb.2025.112266](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112266).
- [3] X. Jiang, M. H. Kolstein, and F. S. K. Bijlaard, "Experimental and numerical study on mechanical behavior of an adhesively-bonded joint of FRP-steel composite bridge under shear loading," *Composite Structures*, Vol. 108, pp. 387-399, 2014, doi: [10.1016/j.compstruct.2013.09.045](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.045).
- [4] R. D. F. Moreira, V. Oliveira, F. G. A. Silva, R. Vilar, and M. F. S. F. De Moura, "Mode II fracture toughness of carbon-epoxy bonded joints with femtosecond laser treated surfaces," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 148, pp. 707-713, 2018, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2018.09.029](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.029).
- [5] C. Badulescu, C. Germain, J. Y. Cognard, and N. Carrere, "Characterization and modelling of the viscous behaviour of adhesives using the modified Arcan device," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 29, No. 5, pp. 443-461, 2015, doi: [10.1080/01694243.2014.991483](https://doi.org/10.1080/01694243.2014.991483).
- [6] A. Fereidoon, N. Kordani, Y. Rostamiyan, D. D. Ganji, and M. G. Ahangari, "Effect of carbon nanotubes on adhesion strength of e-glass/epoxy composites and alloy aluminium surface," *World Applied Sciences Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 204-210, 2010. (in Persian)
- [7] G. Stamoulis, N. Carrère, J. Y. Cognard, P. Davies, and C. Badulescu, "Investigating the fracture behavior of adhesively bonded metallic joints using the Arcan fixture," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 66, pp. 147-159, 2016, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2016.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.01.001).



Analysis of Mindlin Plates by Dynamic Relaxation Method

Hossein Estiri^{*1} , Mahdi Adineh²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

Abstract

The Mindlin plate theory, which accounts for shear deformation effects, is employed to ensure accurate modeling of moderately thick plates. This paper investigates the efficiency of various dynamic relaxation methods for the elastic analysis of Mindlin plates. The main objective is to evaluate the advantages of twelve different relaxation schemes. The distinctions among these approaches lie in the determination of artificial parameters such as damping and mass, which are essential for the convergence of dynamic relaxation. The study focuses on assessing these methods based on numerical stability, convergence rate, and computational efficiency. Several Mindlin plate examples with diverse geometries and boundary conditions are solved to compare the performance of different dynamic relaxation techniques. Given the variety of the analyzed cases, the obtained results can serve as benchmark problems for Mindlin plate analysis. Key criteria, including the number of iterations required for convergence and the total computational time, are recorded for each method. The results reveal significant variations in efficiency among the twelve algorithms, with some exhibiting rapid convergence while others require considerably more iterations. A comprehensive ranking based on these computational metrics is established to identify the most efficient and robust techniques for practical applications. Furthermore, the study demonstrates the sensitivity of dynamic relaxation convergence to the selection of artificial parameters. Numerical results indicate that the Underwood method is efficient in terms of analysis time, while the minimum residual energy scheme achieves the fewest iterations for Mindlin plate analysis.

Keywords

Dynamic Relaxation

Mindlin Plate

Mass, Damping

Time Step

Received: 29.06.2025

Revised: 13.09.2025

Accepted: 21.10.2025

*Corresponding Author

Hossein Estiri

Email

h.estiri@gonabad.ac.ir

1- Introduction

The DR method is an explicit iterative technique used to solve static equilibrium problems by converting them into fictitious dynamic systems. The general iterative equations for velocity and displacement are given by:

$$\dot{X}_i^{n+\frac{1}{2}} = \frac{2m_{ii}^n - C_{ii}^n t^n}{2m_{ii}^n + C_{ii}^n t^n} \dot{X}_i^{n-\frac{1}{2}} + \frac{2t^n}{2m_{ii}^n + C_{ii}^n t^n} (p_i^n - f_i^n) \quad (1)$$

$$X_i^{n+1} = X_i^n + t^{n+1} \dot{X}_i^{n+\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, ndof$$

where m and c are the diagonal mass and damping matrices, Δt is the time step, p is the external load vector, and f is the internal force vector. The system evolves in time until the residual force tends to zero, indicating convergence to the static equilibrium solution.

How to Cite this Article:

[1] H. Estiri and M. Adineh, "Analysis of Mindlin plates by dynamic relaxation method," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 153–174, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.531701.1137> (in Persian)



2- Research Methods

This study presents a comprehensive comparative analysis of twelve well-known dynamic relaxation (DR) methods for the elastic analysis of Mindlin plates. The Mindlin plate theory, which incorporates transverse shear deformation effects, is employed to accurately model moderately thick plates. The primary objective is to evaluate the computational efficiency, convergence rate, and numerical stability of these DR techniques, which differ mainly in their approaches to determining fictitious parameters such as mass, damping, and time step. The twelve DR methods compared in this study are: Papadrakakis [1], Underwood [2], Qiang [3], Zhang [4], Nodal Damping [5], Rezaiee-Pajand and Taghavian Hakkak (RPTH) [6], Kinetic Damping (kdDR) [7], Minimum Residual Force (MFT) [8], Rezaiee-Pajand and Alamatian (mdDR) [9], Minimum Residual Energy (MRE) [8], Rezaiee-Pajand and Sarafrazi (RPS) [10], Zero Damping (zdDR) [11].

A variety of plate geometries and boundary conditions were analyzed, including square, rectangular, circular, triangular, L-shaped, and irregular plates, under uniform distributed loads as well as plates with hole. The performance of each method was assessed based on the number of iterations and computational time required to achieve convergence, with a residual force tolerance of 10^{-6} .

The scoring and ranking system assigned a rank from 1 (best) to 12 (worst) for each method in each example. The total score S_i for method i was calculated as:

$$S_{ij} = 100 \times \sum_{j=1}^{12} Q_{ij} \times (13 - j) / 240 \quad (3)$$

Here, the j^{th} grade of the i^{th} technique is denoted by Q_{ij} . For example, the kdDR algorithm is ranked first in one numerical example, based on the number of iterations. Hence, Q_{i1} is 1 for this strategy. Furthermore, Underwood's technique is ranked third for the eleven times, according to the analysis duration. Therefore, Q_{i3} is equal to 11. Number of

structures which cannot be analyzed by using i^{th} procedure is Q_{i0} . For example, the RPTH is not able to achieve the acceptable error in ten examples. As a result, Q_{i0} is equal to 10. Note that, methods which converge to the true answers are inserted into Eq. (3). It should be noted that if an approach is ranked first in all the 20 examples, its score is 240. Consequently, score S_i of this scheme is 100.

3- Results

The numerical results reveal significant variations among the methods. The Underwood and MRE techniques demonstrate superior convergence and efficiency across most examples, while the Papadrakakis and Kinetic Damping methods show slower performance. For instance, the MRE algorithm yields the minimum number of iterations for square and circular plates, whereas Underwood's method exhibits the shortest analysis time. The comparative ranking of the DR methods based on averaged performance across all cases is summarized below:

Table 1: Performance level of methods

Rank	Method	Performance Level
1	MRE (Minimum Residual Energy)	Excellent convergence, very efficient
2	Underwood	Fastest analysis time
3	MFT (Minimum Force Technique)	High convergence rate
4	mdDR (Rezaeepazhand & Alamatian)	Consistent accuracy
5	RPS (Rezaeepazhand & Sarafrazi)	Robust for complex geometries
6	Qiang	Moderate performance
7	Zhang	Good stability
8	zdDR (Zero Damping)	Acceptable for small models
9	RPTH	Limited convergence range
10	Nodal Damping	Stable but slow
11	Kinetic Damping (kdDR)	Poor convergence
12	Papadrakakis	Lowest efficiency

4- Conclusion

Overall, the comparative study demonstrates that the choice of artificial parameters—especially damping and mass—strongly affects the

convergence and computational efficiency of dynamic relaxation methods for Mindlin plate analysis. Among all tested algorithms, the Minimum Residual Energy (MRE) method achieved the highest ranking based on the number of iterations, with the lowest iteration count in 15 out of 20 examples. The Underwood method was the fastest in terms of computational time. The Papadrakakis method consistently required the highest number of iterations and computational time. Methods such as Qiang, RPS, and mdDR exhibited similar behavior in terms of iteration counts across most examples. The study concludes that the MRE and Underwood methods are the most efficient for analyzing Mindlin plates using the dynamic relaxation approach, offering the best balance between convergence speed and computational cost.

5- References

- [1] M. Papadrakakis, "A method for the automatic evaluation of the dynamic relaxation parameters," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 35–48, 1981, doi: [10.1016/0045-7825\(81\)90066-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(81)90066-9).
- [2] P. Underwood, "Dynamic relaxation (in structural transient analysis)," in *Computational Methods for Transient Analysis*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1983, pp. 245–265.
- [3] S. Qiang, "An adaptive dynamic relaxation method for nonlinear problems," *Computers & Structures*, Vol. 30, No. 4, pp. 855–859, 1988, doi: [10.1016/0045-7949\(88\)90117-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(88)90117-4).
- [4] L. G. Zhang and T. X. Yu, "Modified adaptive dynamic relaxation method and its application to elastic–plastic bending and wrinkling of circular plates," *Computers & Structures*, Vol. 33, No. 2, pp. 609–614, 1989, doi: [10.1016/0045-7949\(89\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90035-7).
- [5] L. C. Zhang, M. Kadkhodayan, and Y. W. Mai, "Development of the maDR method," *Computers & Structures*, Vol. 52, No. 1, pp. 1–8, 1994, doi: [10.1016/0045-7949\(94\)90249-6](https://doi.org/10.1016/0045-7949(94)90249-6).
- [6] M. Rezaiee-Pajand and M. Taghavian Hakkak, "Nonlinear analysis of truss structures using dynamic relaxation," *International Journal of Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 11–22, 2006.
- [7] B. H. V. Topping and P. Ivanyi, *Computer Aided Design of Cable Membrane Structures*. Scotland: Saxe-Coburg Publications, 2008, ch. Dynamic Relaxation, pp. 39–84.
- [8] M. Rezaiee-Pajand, M. Kadkhodayan, and J. Alamatian, "Timestep selection for dynamic relaxation method," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 40, No. 1, pp. 42–72, 2012, doi: [10.1080/15397734.2011.599311](https://doi.org/10.1080/15397734.2011.599311).
- [9] M. Rezaiee-Pajand and J. Alamatian, "The dynamic relaxation method using new formulation for fictitious mass and damping," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 34, No. 1, pp. 109–133, 2010, doi: [10.12989/sem.2010.34.1.109](https://doi.org/10.12989/sem.2010.34.1.109).
- [10] M. Rezaiee-Pajand and S. R. Sarafrazi, "Nonlinear structural analysis using dynamic relaxation method with improved convergence rate," *International Journal of Computational Methods*, Vol. 7, No. 4, pp. 627–654, 2010, doi: [10.1142/S0219876210002386](https://doi.org/10.1142/S0219876210002386).
- [11] M. Rezaiee-Pajand and S. R. Sarafrazi, "Nonlinear dynamic structural analysis using dynamic relaxation with zero damping," *Computers & Structures*, Vol. 89, nos. 13–14, pp. 1274–1285, 2011, doi: [10.1016/j.compstruc.2011.04.005](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.04.005).



حل صفحات میندلین به روش رهایی پویا

حسین استیری^{۱*}، مهدی آدینه^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

چکیده

نظریه صفحه‌ی میندلین، که شامل اثرات تغییر شکل برشی است، برای اطمینان از مدل‌سازی دقیق صفحات نسبتاً ضخیم به کار می‌رود. این مقاله به بررسی کارایی روش‌های مختلف رهایی پویا برای تحلیل الاستیک صفحات میندلین می‌پردازد. هدف اصلی، ارزیابی مزایای دوازده شیوه‌ی رهایی است. تفاوت این راه‌کارها در چگونگی تعیین پارامترهای ساختگی مانند میرایی و جرم می‌باشد که برای همگرایی رهایی پویا لازم هستند. این مطالعه بر ارزیابی این روش‌ها بر اساس پایداری عددی، سرعت همگرایی و کارایی محاسباتی تمرکز دارد. چندین نمونه از صفحات میندلین با هندسه‌ها و شرایط مرزی متنوع برای مقایسه‌ی عملکرد راه‌کارهای گوناگون رهایی پویا حل می‌شوند. با توجه به تنوع نمونه‌های حل‌شده، می‌توان از نتایج آن به عنوان مسائل بنچمارک در حل صفحه‌های میندلینی بهره جست. معیارهای کلیدی، از جمله تعداد تکرارهای مورد نیاز برای همگرایی و کل زمان محاسباتی، برای هر روش ثبت شده‌اند. نتایج، تغییرات قابل توجهی در کارایی بین دوازده الگوریتم را نشان می‌دهد. به طوری که برخی دارای همگرایی سریعی هستند؛ در حالی که برخی دیگر به تکرارهای قابل توجهی بیشتری نیاز دارند. یک رتبه‌بندی جامع بر اساس این معیارهای محاسباتی ایجاد شده است که کارآمدترین و قوی‌ترین تکنیک‌ها را برای کاربردهای عملی شناسایی می‌کند. همچنین، این مطالعه حساسیت همگرایی رهایی پویا به انتخاب پارامترهای ساختگی را نشان می‌دهد. نتایج عددی، نمایانگر کارایی مناسب روش آندوود در زمان تحلیل و شیوه‌ی کمینه انرژی پسماند در شمار تکرارها برای تحلیل صفحات میندلینی است.

کلمات کلیدی

رهایی پویا
صفحه‌ی میندلین
جرم
میرایی
گام زمانی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

*نویسنده مسئول

حسین استیری

ایمیل

h.estiri@gonabad.ac.ir

۱- مقدمه

تحلیل سازه‌های صفحه‌ای از مباحث اساسی در مکانیک سازه‌ها محسوب می‌شود که کاربردهای گسترده‌ای در مهندسی عمران، هوافضا و سایر زمینه‌ها دارد. در میان نظریه‌های مختلف صفحات، تئوری صفحه‌ی میندلین به‌طور گسترده برای مدل‌سازی صفحات با ضخامت متوسط استفاده می‌گردد. این نظریه، اثرات تغییر شکل برشی عرضی را در نظر می‌گیرد که در تئوری کلاسیک صفحه‌ی کیرشلف نادیده گرفته می‌شود. طی سال‌ها، روش‌های عددی متعددی برای حل مسائل صفحه‌ی میندلین توسعه‌یافته‌اند. از جمله‌ی این شیوه‌ها می‌توان از روش المان محدود [۱ و ۲]، راه‌کار المان مرزی [۳] و راه‌حل‌های بدون

شبکه [۴] نام برد. با این حال، برای مسائل غیرخطی و مقیاس بزرگ، روش‌های حل تکراری مانند شیوه‌ی رهایی پویا به دلیل کارایی محاسباتی و پایداری، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵ و ۶]. روش رهایی پویا، فن صریح حل دستگاه معادله‌های هم‌زمان است. در این فرایند، از رابطه‌های برداری ساده برای رسیدن به پاسخ بهره‌جویی می‌شود. به همین سبب، رابطه‌های تکراری راه‌کار رهایی پویا صریح می‌باشند. به سخن دیگر، نیاز به وارون ماتریس نیست. از دیدگاه فیزیکی، راه‌حل رهایی پویا برای دستیابی به پاسخ سازه‌ی ایستا، از پاسخ حالت پایدار همان سامانه در حالت پویا بهره می‌جوید. یادآوری می‌کند، روش

How to Cite this Article:

[1] H. Estiri and M. Adineh, "Analysis of Mindlin plates by dynamic relaxation method," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 153-174, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.531701.1137> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

باوجود این پیشرفت‌ها، هنوز اتفاق نظری در مورد کارآمدترین الگوریتم رهایی پویا برای مسائل خمش صفحات، هنگامی که تغییر شکل‌های برشی در نظر گرفته می‌شوند، وجود ندارد.

این مقاله ارزیابی جامعی از دوازده شیوه‌ی شناخته شده‌ی رهایی پویا را برای تحلیل الاستیک صفحات میندین انجام می‌دهد. عملکرد این راه‌حل‌ها از نظر نرخ همگرایی، هزینه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی مختلف صفحات بررسی می‌شود. راه‌کارها بر پایه‌ی تحلیل‌های عددی رتبه‌بندی می‌گردند. یافته‌های این تحقیق به توسعه مکانیک محاسباتی کمک کرده و بینش‌هایی را برای بهینه‌سازی حل‌گرهای تکراری رهایی پویا در سازه‌های صفحه‌ای فراهم می‌کند.

۲- روش رهایی پویا

در فرآیند رهایی پویا، با افزودن ماتریس‌های جرم و میرایی ساختگی به معادلات تعادل استاتیکی سازه، یک سیستم دینامیکی فرضی ایجاد می‌شود. روابط تکراری این روش با بهره‌جستن از شیوه‌ی تفاضل‌های محدود مرکزی به دست می‌آیند. برابری‌های (۱) و (۲)، به ترتیب، سرعت $\dot{X}$ و جابجایی X را در راه‌کار رهایی پویا نشان می‌دهند. این دو رابطه، اساس فن رهایی پویا هستند.

$$\begin{aligned} \dot{X}_i^{n+1/2} = & \frac{2m_{ii}^n - C_{ii}^n t^n}{2m_{ii}^n + C_{ii}^n t^n} \dot{X}_i^{n-1/2} \\ & + \frac{2t^n}{2m_{ii}^n + C_{ii}^n t^n} (p_i^n - f_i^n) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} X_i^{n+1} = & X_i^n \\ & + t^{n+1} \dot{X}_i^{n+1/2}, \quad i = 1, 2, \dots, ndof \end{aligned} \quad (2)$$

ماتریس‌های جرم و میرایی در این شیوه، قطری پنداشته می‌شوند. ماتریس‌های جرم و میرایی، به ترتیب، با m و C ، گام زمانی با t و بردار نیروی داخلی با f نمایش داده می‌شوند. نیروی خارجی اعمالی با p نشان داده شده است. عامل‌های n و i ، به ترتیب، شمارنده‌ی تکرار رهایی پویا و شماره‌ی درجه‌ی آزادی سازه می‌باشند. همچنین، $ndof$ تعداد درجات آزادی کل سیستم را مشخص می‌کند. شیوه‌های گوناگونی برای محاسبه‌ی ماتریس‌های جرم و میرایی و همچنین، گام زمانی وجود دارد. در ادامه، دوازده روش برای محاسبه‌ی این عامل‌ها معرفی می‌شوند.

رهایی پویا بر پایه‌ی تغییرشکل‌های ماندگار ناشی از نیروی ثابت یک دستگاه پویای میرا، استوار است.

روش رهایی پویا که در اصل برای حل مسائل تعادل استاتیکی از طریق حل دستگاه ساختگی دینامیکی توسعه یافته است، به پارامترهای مجازی مانند جرم و ماتریس میرایی وابسته می‌باشد تا پایداری عددی و همگرایی را تضمین کند [۷ و ۸]. انتخاب این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد روش دارد و منجر به توسعه تکنیک‌های شتاب‌دهی مختلف شده است [۹]. مطالعات متعددی به کاربرد روش رهایی پویا در مکانیک سازه‌ها، از جمله تحلیل غشاها [۱۰]، پوسته‌ها [۱۱] و صفحات [۱۲] پرداخته‌اند. با این حال، مقایسه‌ی الگوریتم‌های مختلف رهایی پویا برای صفحات میندین هنوز محدود است.

تحقیقات پیشین، روابط متعددی از شیوه‌ی رهایی پویا را ارائه کرده‌اند. روش‌های صریح و ضمنی [۱۳]، راه‌کارهای میرایی تطبیقی [۱۴] و میرایی جنبشی [۱۵] از جمله‌ی این‌ها می‌باشد. برخی مطالعات بر جرم‌های ساختگی بهینه تمرکز کرده‌اند [۷]. در حالی که برخی دیگر، معیارهای همگرایی مبتنی بر انرژی را معرفی کرده‌اند [۱۶]. روش رهایی پویا در دهه‌ی اخیر پیشرفت‌های چشمگیری داشته است که عمدتاً ناشی از نیاز به راه‌حل‌های عددی کارآمد برای مسائل غیرخطی هندسی و ماده در مکانیک سازه‌ها می‌باشد. این روش به ابزاری همه‌کاره برای فرم یابی، تحلیل گذرا و بهینه‌سازی سازه‌های پیچیده از جمله صفحات میندین تبدیل شده است. توانایی روش‌های رهایی پویا در تحلیل قاب‌ها و خرپاها [۱۷]، صفحات خمشی کلاسیک [۱۲]، قاب‌های سه‌بعدی با و بدون اثر برش [۱۸] و همچنین پوسته‌ها [۱۱] توسط رضایی‌پژند و همکاران ارزیابی شده است. لازم به ذکر است که این سازه‌ها رفتار هندسی غیرخطی داشتند. در یک مطالعه مقایسه‌ای جامع، توانایی ۵۱ روش مختلف رهایی پویا بررسی و نتایج آن ارائه شده است [۱۹].

پژوهش‌گران داخلی نیز در زمینه‌ی روش رهایی پویا، به تحقیق پرداخته‌اند. سرافرازی و لبافی با استفاده از میرایی متمرکز، عامل میرایی را در گام‌های خاصی وارد کردند تا کارمایه جنبشی را به سوی صفر برسد [۲۰]. زردی و علامتیان با استفاده از نگره‌ی گرشگورین بهبودیافته، کران‌های جدیدی برای کمیت جرم ساختگی در رهایی پویای به دست آوردند [۲۱]. لزج عباسی و همکاران، با بهره‌جستن از درون‌یابی لاگرانژ الگوریتم نوینی برای روش رهایی پویا با میرایی جنبشی ارائه دادند [۲۲]. استیری و باغبان از این شیوه برای تعیین نقاط حدی و پیمایش مسیر ایستایی سازه‌ها بهره‌جستند [۲۳ و ۲۴].

۱-۲- روش پادراکاکیس

در این شیوه، گام زمانی ثابت و برابر با یک است. پادراکاکیس، ماتریس‌های جرم و میرایی را ضربی از ماتریس سختی پنداشت. برابری (۳) این را نشان می‌دهد. ضرایب فرضی جرم و میرایی، به ترتیب، با ρ و c نشان داده شده‌اند. این ضرایب را می‌توان از رابطه‌های (۴) و (۵) به دست آورد. درایه‌های قطری ماتریس سختی در ماتریس D جای دارند [۱۳].

$$M = \rho D, \quad C = cD \quad (۳)$$

$$\left(\frac{t^2}{\rho}\right)_{opt} = \frac{4}{\lambda_{Bmin} \lambda_{Bmax}} \quad (۴)$$

$$\left(\frac{ct}{\rho}\right)_{opt} = \frac{4\sqrt{\lambda_{Bmax} \cdot \lambda_{Bmin}}}{\lambda_{Bmax} + \lambda_{Bmin}} \quad (۵)$$

در اینجا، کمینه و بیشینه مقادیر ویژه‌ی ماتریس $D^{-1}S$ به ترتیب، با λ_{Bmin} و λ_{Bmax} نشان داده شده‌اند. مقادیر این عامل‌ها با بهره جستن از معادلات (۶) و (۷) به دست می‌آیند. در روش پادراکاکیس، ابتدا مقادیر λ_{Bmin} و λ_{Bmax} فرض می‌شود و فرآیند رهایی پویا آغاز می‌گردد. هنگامی که مقدار نرخ کاهش خطا بین دو تکرار متوالی (λ_{DR}) به یک مقدار ثابت همگرا شود، مقدار λ_{Bmin} حساب می‌شود. مقدار λ_{DR} ، با برابری (۸) تعیین می‌گردد.

$$\lambda_{Bmin} = -\frac{\lambda_{DR}^2 - \frac{4}{2+ct/\rho} \lambda_{DR} + \frac{2-ct/\rho}{2+ct/\rho}}{\frac{2t^2/\rho}{2+ct/\rho} \lambda_{DR}} \quad (۶)$$

$$|\lambda_{Bmax}| < \max_i \sum_{j=1}^{ndof} |b_{ij}| \quad (۷)$$

$$\lambda_{DR} = \frac{\|X^{n+1} - X^n\|}{\|X^n - X^{n-1}\|} \quad (۸)$$

۲-۲- روش آندروود

رابطه‌ی (۹)، ماتریس جرم این شیوه را نشان می‌دهد. در اینجا، مقدار گام زمانی برابر با ۱ است. همچنین، ماتریس میرایی از رابطه‌ی $C = 2\omega_0 M$ به دست می‌آید. در این برابری، ω_0 کمینه فرکانس

سیستم دینامیکی ساختگی است. مقدار آن از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌گردد. آندروود فرض کرد که اگر عبارت زیر رادیکال این رابطه منفی شود، مقدار میرایی صفر باشد. همچنین، اگر ω_0 بزرگ‌تر از ۲ شود، مقداری کمتر از ۲ (مثلاً ۱/۹) در محاسبات استفاده گردد. در اینجا، S^L ماتریس سختی محلی است و درایه‌های آن با استفاده از معادله‌ی (۱۱) تعیین می‌شوند [۸].

$$m_{ii} = \frac{t^2}{4} \sum_{j=1}^{ndof} |S_{ij}| \quad (۹)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{X^T S^L X}{X^T M X}} \quad (۱۰)$$

$$S_{ii}^{L,n} = \frac{f_i(X^n) - f_i(X^{n-1})}{t \dot{X}_i^{n-\frac{1}{2}}} \quad (۱۱)$$

۳-۲- روش کانگ

در این روش، ماتریس جرم از مجموع مقادیر مطلق درایه‌های هر سطر ماتریس سختی حساب می‌شود. رابطه‌ی (۱۲) این را نشان می‌دهد. افزون بر این، کانگ برابری‌های (۱۳) و (۱۴) را، به ترتیب، برای تعیین میرایی و گام زمانی پیشنهاد داد [۲۵].

$$m_{ii} = \sum_{j=1}^{ndof} |S_{ij}| \quad (۱۲)$$

$$C_{ii} = 2\sqrt{\frac{\omega_0}{1+\omega_0}} m_{ii} \quad (۱۳)$$

$$t = \frac{2}{\sqrt{1+\omega_0}} \quad (۱۴)$$

در روابط فوق، ω_0 فرکانس حداقل سیستم در حالت ارتعاش آزاد است. این عامل با استفاده از اصل ریلی و با بهره جستن از برابری (۱۵) به دست می‌آید. ماتریس سختی با نماد S نمایش داده شده است.

$$\omega_0 = \frac{X^T S X}{X^T M X} \quad (۱۵)$$

۴-۲- روش ژانگ

ژانگ و یو میرایی را از $C = 2\omega_0 M$ حساب کردند. عامل ω_0 از رابطه‌ی (۱۶) به دست می‌آید [۲۶].

$$\dot{\mathbf{X}}^n = \frac{\mathbf{X}^n - \mathbf{X}^{n-1}}{t} \quad (22)$$

۷-۲- فرآیند میرایی جنبشی

در روش رهایی پویا جنبشی، مقدار میرایی برابر با صفر است. در این راه کار، هنگامی که انرژی جنبشی کاهش می یابد، نقطه ی بیشینه در نمودار انرژی جنبشی به دست می آید. در این زمان و برای شروع مجدد فرآیند رهایی پویا، جابجایی ها و سرعت ها به ترتیب با استفاده از روابط (۲۳) و (۲۴) به دست می آیند. باید دانست، در برابری (۲۴)، بردار نیروی پسماند در موقعیت $\mathbf{X}^{n-\frac{1}{2}}$ که در معادله ی (۲۳) محاسبه شده است، تعیین می شود [۱۶].

$$\mathbf{X}^{n-\frac{1}{2}} = \mathbf{X}^{n+1} - \frac{3}{2}t\dot{\mathbf{X}}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{t^2}{2\mathbf{M}}\mathbf{R}^n \quad (23)$$

$$\dot{\mathbf{X}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{t}{2\mathbf{M}}\mathbf{R}^n \quad (24)$$

سپس تکرارهای رهایی پویا با استفاده از این بردارهای جابجایی و سرعت آغاز می شود تا زمانی که انرژی جنبشی مجدداً به حداکثر برسد. این فرآیند تا رسیدن به پاسخ نهایی ادامه می یابد. گام زمانی فرضی در این الگوریتم برابر با یک است. علاوه بر این، ماتریس جرم با استفاده از رابطه ی (۲۵) به دست می آید.

$$m_{ii} = \frac{t^2}{2} \sum_{j=1}^{ndof} |S_{ij}| \quad (25)$$

۸-۲- روش کمینه نیروی پسماند

رضایی پزند و همکاران، تابع نیروی پسماند سیستم دینامیکی ساختگی را به صورت معادله ی (۲۶) نوشتند. با کمینه سازی این تابع نسبت به گام زمانی، برابری (۲۷) برای تعیین گام زمانی تکرارهای رهایی پویا به دست می آید. نمو نیروی داخلی را می توان با رابطه ی (۲۸) محاسبه کرد [۲۸]. در اینجا، ماتریس سختی مماسی با $\mathbf{S}$ نمایش داده شده است. علاوه بر این، ماتریس های جرم و میرایی، به ترتیب، از شیوه ی آندروود و ژانگ محاسبه می شوند.

$$UBF = (\mathbf{R} - t^{n+1}\dot{\mathbf{f}})^2 \quad (26)$$

$$t^{n+1} = \frac{\mathbf{R}^T \dot{\mathbf{f}}}{\dot{\mathbf{f}}^T \dot{\mathbf{f}}} \quad (27)$$

$$\dot{\mathbf{f}} = \mathbf{S}\dot{\mathbf{X}} \quad (28)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{X}^T \mathbf{F}}{\mathbf{X}^T \mathbf{M} \mathbf{X}}} \quad (16)$$

ماتریس جرم از برابری (۹) با گام زمانی برابر با یک به دست می آید. همچنین، این پژوهشگران به جای استفاده از بردار صفر، جابجایی های اولیه غیر صفر را پیشنهاد کردند. رضایی پزند و همکاران نشان دادند که محاسبه ی جابجایی اولیه بر اساس روش ژانگ کارایی کافی ندارد [۱۷]؛ بنابراین، در این مقاله برای شروع فرآیند رهایی پویا از بردار صفر استفاده شده است.

۹-۲- الگوریتم میرایی گره ای

در بیشتر شیوه ها، میرایی در همه ی درجات آزادی یکسان در نظر گرفته می شود. به جای این کار، کدخدایان و همکاران پیشنهاد کردند که میرایی در هر گره متفاوت و برای درجات آزادی یک گره یکسان باشد. ایشان، روابط زیر را برای محاسبه ی ضریب میرایی ارائه دادند [۱۴]. در اینجا، N شمار گره های سازه است. ماتریس جرم نیز مانند معادله ی (۹) و با گام زمانی برابر با یک به دست می آید.

$$C_k = \zeta_k m_{kk} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

$$\zeta_k^n = 2 \left[\frac{(\mathbf{X}_k^n)^T \mathbf{f}_k^n}{(\mathbf{X}_k^n)^T \mathbf{m}_{kk}^n (\mathbf{X}_k^n)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

۹-۲- روش رضایی پزند و تقویان حکاک

رضایی پزند و تقویان حکاک فرض کردند که درایه های قطری ماتریس جرم ضریبی از درایه های قطری ماتریس سختی هستند. معادله ی (۱۹) رویکرد ریاضی این روش را نشان می دهد. این پژوهشگران مقدار α را ۰/۶ پیشنهاد کردند.

$$m_{ii} = \alpha . S_{ii} \quad (19)$$

در این روش، میرایی از روش کانگ و گام زمانی برابر با یک به دست می آید. همچنین، جابجایی به جای برابری (۲) از رابطه ی (۲۰) محاسبه می شود. شتاب $\ddot{\mathbf{X}}$ و سرعت $\dot{\mathbf{X}}$ نیز با استفاده از معادلات (۲۱) و (۲۲) تعیین می گردند. در این روابط، بردار $\mathbf{R}$ بردار نیروی پسماند می باشد [۲۷].

$$\mathbf{X}^{n+1} = \mathbf{X}^n + t\dot{\mathbf{X}}^n + \frac{t^2}{2}\ddot{\mathbf{X}}^n \quad (20)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}^n = \frac{\mathbf{R}^n - \mathbf{C}^n \dot{\mathbf{X}}^n}{\mathbf{M}^n} \quad (21)$$

انتخاب می‌شود. علاوه بر این، گام زمانی برابر با یک است و ماتریس جرم از معادله‌ی (۲۹) به دست می‌آید.

۲-۱۲-۲ روش میرایی صفر

با استفاده از میرایی صفر، رضایی‌پژند و سرافرازی رابطه‌ی (۳۳) را برای نسبت گام زمانی γ پیشنهاد کردند [۳۰]. همچنین، برای محاسبه‌ی کمینه مقدار ویژه λ_1 ، روش تکرار توانی به کار گرفته شد. در روش میرایی صفر، ماتریس جرم از برابری (۲۹) به دست می‌آید. همچنین، بردارهای جابجایی و سرعت، به جای رابطه‌های (۱) و (۲)، به ترتیب، از معادلات (۳۴) و (۳۵) حساب می‌شوند.

$$\gamma = \frac{t^{n+1}}{t^n} = \frac{I}{(I + \sqrt{\lambda_l})^2} \quad (33)$$

$$\dot{\mathbf{X}}^{n+1} = \gamma^n \left(\mathbf{M}^{-1} \mathbf{R} + \dot{\mathbf{X}}^n \right) \quad (34)$$

$$\mathbf{X}^{n+1} = \mathbf{X}^n + \dot{\mathbf{X}}^{n+1} \quad (35)$$

۳- مثال‌های عددی

در این بخش، با استفاده از روش‌های تعریف‌شده در بخش قبل، صفحات مختلف با در نظر گرفتن اثر برش مرتبه‌ی اول، به صورت خطی تحلیل می‌شوند. برای این کار، زبان فترن جهت برنامه‌نویسی شیوه‌های بیان‌شده به کار رفته است. لبه‌هایی که دارای خط‌چین هستند، نمایانگر تکیه‌گاه ساده می‌باشند. لبه‌های گیردار نیز با هاشور توپر نمایش داده شده‌اند. تعداد تکرارها و مدت زمان تحلیل در هر نمونه مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که این روش‌ها از دقت یکسانی برخوردارند. با این حال، تعداد تکرارها و زمان تحلیل برای رسیدن به پاسخ متفاوت می‌باشد. برای همگرایی می‌توان از دو معیار نیروی نامیزان و انرژی استفاده کرد. در این مقاله، چون مقایسه‌ی روش‌ها مورد نظر است، برای اینکه شرایط یکسانی برای همه‌ی شیوه‌ها برقرار شود از معیار نیروی نامیزان استفاده شد. در این پژوهش، خطای نیروی پسماند قابل قبول برای همه روش‌ها برابر با 10^{-4} در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته (E) و نسبت پواسون (ν) به ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و $\frac{1}{3}$ هستند. علاوه بر این، در هر مثال، گرهی که دارای خیز بیشینه می‌باشد با حرف M نشان داده می‌شود. امتیاز هر شیوه، بر اساس شمار تکرارها و مدت زمان تحلیل، به ترتیب،

۲-۹- روش رضایی‌پژند و علامتیان

رضایی‌پژند و علامتیان، برابری‌های (۲۹) و (۳۰) را، به ترتیب، برای جرم و میرایی روش رهایی پویا پیشنهاد دادند. همچنین، کمینه فرکانس ساختگی ω_0 از رابطه‌ی (۱۶) به دست می‌آید. علاوه بر این، گام زمانی یک در محاسبات ایشان استفاده می‌شود [۷].

$$m_{ii} = \text{Max} \left(\frac{(t^n)^2}{2} S_{ii}^n, \frac{(t^n)^2}{2} \sum_{j=1}^{ndof} |S_{ij}^n| \right) \quad (29)$$

$$C_{ii} = \sqrt{\omega_0^2 (4 - t^2 \omega_0^2)} m_{ii} \quad (30)$$

۲-۱۰- روش کمینه انرژی پسماند

رضایی‌پژند و همکاران، تابع انرژی پسماند را به صورت برابری (۳۱) تعریف کردند [۲۸]. سپس، این تابع را نسبت به گام زمانی کمینه کردند. این عملیات منجر به دست آمدن دو مقدار برای گام زمانی می‌شود که یکی از آن‌ها تابع انرژی پسماند را به حداقل می‌رساند.

$$UBE = \sum_{i=1}^{ndof} \left[t^{n+1} \dot{X}_i^{n+\frac{1}{2}} \left(r_i^n - t^{n+1} \dot{f}_i^{n+\frac{1}{2}} \right) \right]^2 \quad (31)$$

از سوی دیگر، اگر معادله مشخصه‌ی (۳۱) جواب حقیقی نداشته باشد، معادله‌ی (۲۷) برای ارزیابی گام زمانی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که ماتریس‌های جرم و میرایی، به ترتیب، از رابطه‌های (۲۹) و (۳۰) به دست می‌آیند.

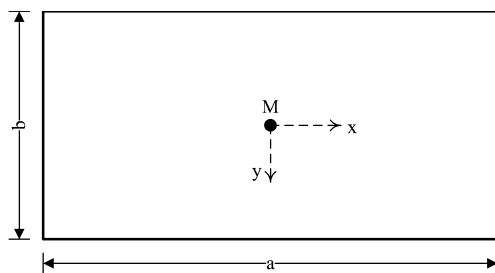
۲-۱۱- روش رضایی‌پژند و سرافرازی

رضایی‌پژند و سرافرازی برای تعیین کمینه فرکانس ارتعاش سیستم، از فرآیند تکرار توانی استفاده کردند. آن‌ها در هر تکرار رهایی پویا، از یک گام الگوریتم تکرار توانی بهره جستند. در شیوه‌ی ایشان، ماتریس میرایی از برابری (۳۲) به دست می‌آید [۲۹].

$$C_{ii}^n = \sqrt{\lambda_l^n (4 - \lambda_l^n)} m_{ii}^n \quad (32)$$

در اینجا، $\lambda_l^n = \lambda^n + 4$ به عنوان مقدار ویژه منتقل‌شده شناخته می‌شود. λ^n ضریب مقدار ویژه در حل با روش تکرار توانی است. در هر گام از رهایی پویا، این ضریب با مقدار ویژه‌ی به دست آمده از اصل ریلی مقایسه می‌گردد. بین این دو مقدار ویژه، عدد کمتر

استفاده در تحلیل‌ها 20×20 انتخاب شده‌اند. به دلیل تقارن، یک چهارم صفحه مدل‌سازی شده است. عرض صفحه (b) برابر با ۱ متر است. ضخامت صفحه‌ی گیردار 0.2 میلی‌متر و این مقدار برای صفحه با تکیه‌گاه ساده برابر با 0.15 میلی‌متر است. برای گسترده‌ی وارد بر صفحه‌ی گیردار و صفحه با تکیه‌گاه ساده، به ترتیب، برابر با 5860 و 10000 کیلو نیوتن بر مترمربع است. بیشترین خیز در وسط صفحه رخ می‌دهد. مقدار آن برای صفحات مربعی گیردار و ساده، به ترتیب، برابر با 0.08688 و 0.07336 میلی‌متر به دست آمد. این مقدار برای ورق گیردار مستطیلی، 0.1577 میلی‌متر بود.



شکل ۱: صفحه مستطیلی

تعداد تکرارهای رهایی پویا و مدت زمان تحلیل در جدول ۲ تا جدول ۴ گزارش شده است. بر اساس جدول ۲، روش MRE برترین شیوه‌ی تحلیل این صفحه بر پایه‌ی شمار تکرارها می‌باشد. بنابراین رتبه این روش یک است. همچنین، روش آندروود، سریع‌ترین راه‌کار در رسیدن به پاسخ است. روش میرایی جنبشی نیز، ضعیف‌ترین شیوه‌ی حل ورق مربعی گیردار بود. نتایج صفحه‌ی مستطیلی با تکیه‌گاه گیردار (جدول ۳) نشان می‌دهد روش RPTH نمی‌تواند صفحه‌ی مستطیلی با تکیه‌گاه گیردار را تحلیل کند. بنابراین، رتبه این روش صفر در نظر گرفته شده است. افزون بر این، کارایی الگوریتم‌های آندروود و میرایی گرهی یکسان است. به سخن دیگر، شماره تکرارها و زمان تحلیل این دو شیوه، یکسان به دست آمد. باید دانست که این موضوع در سایر نمونه‌ها وجود نداشت. روش‌های MRE و میرایی گرهای به‌عنوان کارآمدترین تکنیک‌ها برای تحلیل این صفحه‌ی چهارضلعی، به ترتیب، بر پایه‌ی شمار تکرارها و زمان تحلیل شناخته می‌شوند. روش‌های میرایی جنبشی و پاپادراکاکیس نیز در رتبه‌ی پایینی تحلیل این صفحه جای دارند. برای ورق با تکیه‌گاه‌های ساده، فن‌های MRE و MdDR، به ترتیب، بهترین روش‌ها از نظر شمار تکرار و زمان تحلیل بودند. همچنین، شیوه‌ی میرایی گرهی در رده پایانی حل این صفحه جای داشت.

با رابطه‌های (۳۶) و (۳۷) به دست می‌آید. برپایه‌ی این امتیازها، رتبه‌ی هر راه‌کار تعیین می‌گردد.

$$E_I = 100 \times \left(\frac{I_{max} - I}{I_{max} - I_{min}} \right) \quad (36)$$

$$E_T = 100 \times \left(\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{min}} \right) \quad (37)$$

تعداد تکرارها و مدت زمان تحلیل، به ترتیب، با نمادهای I و T نمایش داده شده‌اند. روشی که بیشترین تعداد تکرار و مدت زمان تحلیل را دارد، امتیاز صفر می‌گیرد. همچنین، امتیاز 100 به روشی اختصاص می‌یابد که کمترین تعداد تکرار و مدت زمان تحلیل را داشته باشد. امتیاز هر روش، رتبه آن را تعیین می‌کند. در جدول ۱ شماره و نماد روش‌هایی که در بخش پیشین معرفی شدند، درج شده‌است. این نمادها و شماره‌ها برای بحث و بررسی نتایج نمونه‌های حل شده به کار می‌رود.

جدول ۱: روش‌های رهایی پویا به کار رفته و علائم آن‌ها

شماره	روش	نماد
۱	پاپادراکاکیس	Papadrakakis
۲	آندروود	Underwood
۳	چیانگ	Qiang
۴	ژانگ	Zhang 1
۵	میرایی گرهای	Nodal Damping
۶	رضایی‌پژند و تقویان حکاک	RPTH
۷	رها‌ی پویای جنبشی	kdDR
۸	کمینه‌سازی نیروی پسماند	MFT
۹	رضایی‌پژند و علامتیان	mdDR
۱۰	کمینه‌سازی انرژی پسماند	MRE
۱۱	رضایی‌پژند و سرافرازی	RPS
۱۲	میرایی صفر	zdDR

۳-۱- صفحه چهار ضلعی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف

اولین مثال، یک صفحه‌ی چهار ضلعی است که بار گسترده‌ی یکنواخت بر آن اعمال شده‌است. این سازه در سه حالت مختلف تحلیل شده است. دو حالت از این صفحه‌ها، مربعی هستند که یکی دارای تکیه‌گاه گیردار و دیگری دارای تکیه‌گاه ساده است. حالت سوم، یک صفحه مستطیلی با تکیه‌گاه گیردار است که نسبت طول به عرض آن برابر با ۲ می‌باشد. شکل ۱، مدل این سازه‌ها را نشان می‌دهد. شبکه‌های مورد

جدول ۲: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه مربعی با تکیه‌گاه گیردار

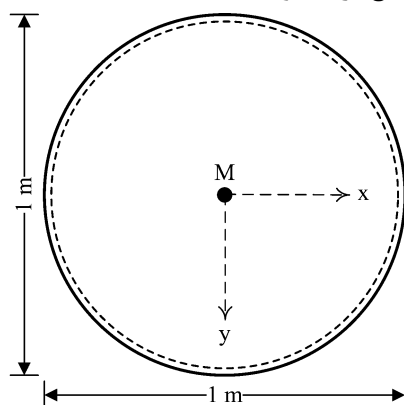
روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	3482	34.5471	11	17.625	1.23261	11
2	2243	89.5648	3	8.891	100	1
3	2557	75.6217	8	12.172	62.8972	8
4	2692	69.627	9	10.86	77.7338	6
5	2389	83.0817	4	9.688	90.9872	2
6	2423	81.5719	5	11.094	75.0876	7
7	4260	0	12	17.734	0	12
8	2011	99.8668	2	10.562	81.1037	4
9	2549	75.9769	6	10.25	84.6319	3
10	2008	100	1	10.563	81.0924	5
11	2550	75.9325	7	15.094	29.8541	9
12	2728	68.0284	10	16.406	15.0175	10

جدول ۴: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه مربعی با تکیه‌گاه ساده

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	8697	84.9483	11	51.546	78.877	11
2	4567	98.2396	7	21.906	99.6179	2
3	4445	98.6323	6	24.234	97.9889	5
4	4673	97.8985	9	22.062	99.5088	3
5	35093	0	12	164.266	0	12
6	4340	98.9702	3	23.719	98.3493	4
7	5620	94.8508	10	27.281	95.8567	8
8	4151	99.5784	2	25.406	97.1688	7
9	4443	98.6387	4	21.36	100	1
10	4020	100	1	25.156	97.3437	6
11	4444	98.6355	5	32.328	92.325	9
12	4595	98.1495	8	33.89	91.232	10

۳-۲- صفحه‌ی دایروی

صفحه‌ی دایروی شکل ۲ مورد تحلیل قرار می‌گیرد. قطر این ورق ۱ متر است. به دلیل تقارن در بارگذاری و هندسه صفحه، یک چهارم آن مدل‌سازی می‌شود. برای تحلیل این صفحه، از ۶۷ المان استفاده شده است. کل بار اعمال شده بر صفحه معادل $915/751$ کیلوپاسکال و ضخامت صفحه، $0/15$ متر است. بیشترین خیز متناظر با این بار که در مرکز صفحه رخ می‌دهد، برابر با $0/06463$ میلی‌متر به دست آمد. نتایج تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است. در اینجا نیز روش‌های RPS، mdDR و کانگ مشابه عمل می‌کنند. دلیل این رفتار در مثال قبلی توضیح داده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، روش MRE کارآمدترین و روش پاپادراکیس کم‌بازده‌ترین روش برای تحلیل این صفحه از منظر شمار تکرار هستند. افزون بر این، راه‌کار mdDR، سریع‌ترین شیوه در رسیدن به پاسخ درست بود.



شکل ۲: صفحه‌ی دایروی

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فرآیندهای RPS و mdDR رفتار مشابهی دارند؛ به عبارت دیگر، تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به پاسخ تقریباً یکسان است. همان‌طور که در روش RPS بیان شد، مقدار ویژه حداقل که با اصل ریلی و روش تکرار توانی محاسبه می‌شود، برای تعیین میرایی به کار می‌رود. تکنیک mdDR نیز از اصل ریلی استفاده می‌کند. از طرف دیگر، معادلات (۳۰) و (۳۲) که برای محاسبه‌ی میرایی استفاده می‌شوند، هم‌ریشه هستند. بنابراین، نتیجه‌گیری می‌شود که فرکانس حداقلی که از اصل ریلی به دست می‌آید کمتر از مقداری است که با روش تکرار توانی حاصل می‌شود. همچنین، باید افزود که روش کانگ تقریباً مشابه RPS و mdDR است، زیرا این روش‌ها نیز از اصل ریلی بهره می‌برند.

جدول ۳: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه مستطیلی با تکیه‌گاه گیردار

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	4229	31.7293	9	22.328	0	11
2	2948	81.8466	3	12.296	98.4688	2
3	3425	63.1847	6	15.688	65.1747	7
4	3600	56.338	8	14.469	77.1398	6
5	2948	81.8466	3	12.14	100	1
6			0			0
7	5040	0	10	20.953	13.4963	9
8	2633	94.1706	2	13.766	84.04	3
9	3421	63.3412	4	13.859	83.1272	4
10	2484	100	1	14.437	77.4539	5
11	3422	63.302	5	20.562	17.3341	8
12	3599	56.3772	7	21.609	7.05732	10

جدول ۵: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه‌ی دایره‌ای

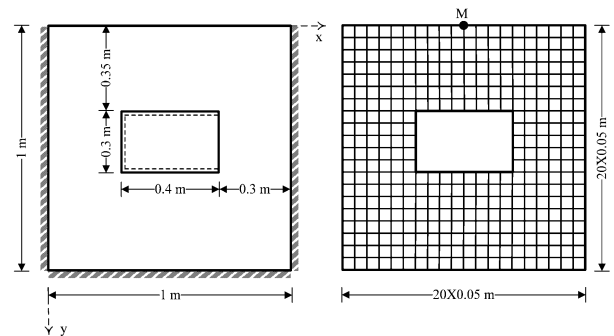
روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	10342	0	11	13.594	0	12
2	4198	93.2888	6	3.375	99.8437	2
3	4163	93.8202	5	4.875	85.1881	6
4	4373	90.6316	8	3.406	99.5408	3
5	8150	33.2827	10	6.047	73.7372	8
6	3908	97.6921	2	4.328	90.5325	5
7	5050	80.3523	9	4.047	93.278	4
8	3920	97.5099	3	6	74.1964	7
9	4162	93.8354	4	3.359	100	1
10	3756	100	1	6.25	71.7538	9
11	4163	93.8202	5	8.344	51.2946	10
12	4296	91.8008	7	8.703	47.787	11

جدول ۶: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه مستطیلی با بازشو

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	5180	67.0676	11	575.203	22.6252	9
2	2883	93.8923	2	179.516	100	1
3	4115	79.5048	7	357.015	65.2909	8
4	4318	77.1342	8	268.422	82.6148	4
5	10923	0	12	681.86	1.7689	11
6	3610	85.4023	4	314.204	73.6624	6
7	4610	73.7242	10	314.625	73.58	7
8	3181	90.4122	3	303.968	75.664	5
9	4103	79.645	5	256.343	84.9768	3
10	2360	100	1	226.906	90.7331	2
11	4104	79.6333	6	648.547	8.28311	10
12	4364	76.597	9	690.906	0	12

۳-۳- صفحه مستطیلی دارای بازشو

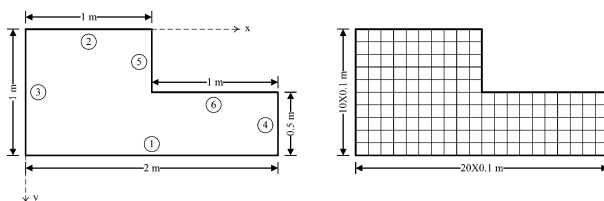
شکل ۳، صفحه مستطیلی با بازشو در مرکز را نشان می‌دهد. این نمونه با شبکه بندی 20×20 تحلیل می‌شود. مقدار بار گسترده‌ی یکنواخت برابر با $915/751$ کیلوپاسکال است. ضخامت صفحه، 0.2 متر می‌باشد. خیز بیشینه در میانه‌ی لبه‌ی بالایی روی می‌دهد. جابجایی این گره در گام نهایی برابر با 0.01908 میلی‌متر بود. تعداد تکرارها و مدت‌زمان تحلیل در جدول ۶ ارائه شده است. بر این اساس، روش میرایی گرهی، بدترین شیوه‌ی حل این صفحه می‌باشد. کارآمدترین روش برای تحلیل این صفحه، الگوریتم‌های MRE و میرایی گرهی هستند. همچنین، فرآیند میرایی صفر بدترین راه‌حل از نظر زمان محاسباتی است. شباهت روش‌های RPS، mdDR و کانگ در این نمونه نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۳: صفحه‌ی مستطیلی با بازشو

۳-۴- صفحه‌ی L شکل

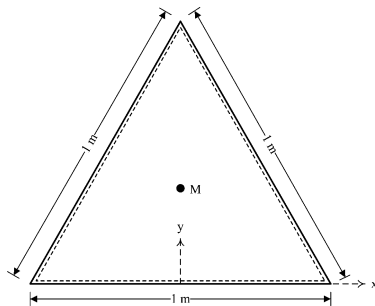
در این جا، صفحه L شکل نشان داده شده در شکل ۴ تحلیل می‌شود. بار گسترده‌ی یکنواخت برابر با $915/751$ کیلوپاسکال می‌باشد. شرایط مرزی در امتداد لبه‌ها با عدد و نماد مشخص شده‌اند. لبه آزاد، تکیه‌گاه گیردار و تکیه‌گاه ساده به ترتیب با C، F و S تعریف می‌شوند. به عنوان مثال، صفحه CSCSSS دارای تکیه‌گاه گیردار در لبه‌های ۱ و ۳ و سایر تکیه‌گاه‌ها ساده هستند. ضخامت ورق SFSSSF برابر 0.25 متر و دو صفحه‌ی دیگر، 0.2 متر است. بیشترین خیز صفحات CCCCCC و CSCSSS در نقطه‌ای با مختصات $(0.5, 0.5)$ رخ می‌دهد. مقدار این خیز برای صفحه‌های CCCCCC و CSCSSS، به ترتیب، برابر با 0.01441 و 0.01876 میلی‌متر به دست آمد. این نقطه برای صفحه SFSSSF در وسط لبه ۲ قرار دارد. جابجایی بیشینه این صفحه برابر با 0.04802 سانتی‌متر بود. رتبه‌بندی روش‌ها در جدول ۷ تا جدول ۹ ارائه شده است. مدت زمان تحلیل برای روش‌های MRE و آندروود کمتر از سایر روش‌هاست. همچنین، روش‌های MRE و MFT به تعداد تکرار کمتری برای رسیدن به پاسخ نیاز دارند. بدترین شیوه‌ها نیز، فرایندهای میرایی جنبشی و پاپادراکاکیس بودند.



شکل ۴: صفحه‌ی L شکل

۳-۵- صفحه‌ی مثلثی

اکنون، صفحه‌ی مثلثی شکل ۵ با بهره جستن از ۶۰ المان تحلیل می‌شود. بار گسترده‌ی یکنواخت به مقدار $1831/501$ کیلوپاسکال بر صفحه اعمال می‌شود. ضخامت صفحه $0/15$ متر در نظر گرفته شده است. بیشترین خیز در مرکز صفحه رخ می‌دهد. روش رهایی پویا، مقدار این خیز را $0/2373$ میلی‌متر به دست آورد. نتایج تحلیل در جدول ۱۰ ارائه شده است. بر این اساس، کمترین تعداد تکرار مربوط به تکنیک MRE است. همچنین، مدت زمان تحلیل برای الگوریتم آندروود کمترین مقدار را دارد. لازم به ذکر است که نیروی پسماند به دست آمده در فرآیند RPTH از مقدار مجاز فراتر رفت. بنابراین، این شیوه توانایی حل این صفحه را نداشت و رتبه این روش صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: صفحه‌ی مثلثی

جدول ۱۰: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه‌ی مثلثی

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	3553	95.0031	10	3.969	89.7416	10
2	1409	99.4559	3	1.047	100	1
3	1562	99.1381	6	1.531	98.3008	4
4	1655	98.945	7	1.172	99.5612	2
5	49297	0	11	29.531	0	11
6			0			0
7	3060	96.027	9	2.266	95.7204	7
8	1251	99.784	2	1.765	97.4793	6
9	1550	99.163	4	1.219	99.3962	3
10	1147	100	1	1.719	97.6408	5
11	1552	99.1589	5	2.625	94.46	8
12	1731	98.7871	8	3	93.1435	9

۳-۶- صفحه‌ی متوازی الاضلاع

در این جا، تحلیل صفحه‌ی متوازی الاضلاع با شبکه‌بندی شکل ۶ انجام می‌شود. مقدار بار گسترده‌ی یکنواخت اعمال شده بر صفحه برابر با $183/150$ پاسکال و ضخامت صفحه $0/2$ متر است. رتبه‌بندی روش‌ها در جدول ۱۱ گزارش شده است. در این نمونه، روش‌های MRE،

جدول ۷: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه‌ی CCCCCC

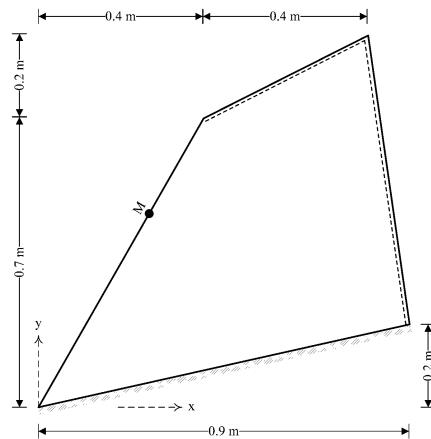
روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	2374	18.5544	11	24.11	0	12
2	1335	77.6892	3	10.109	95.0187	2
3	1611	61.9806	8	15.031	61.6152	8
4	1702	56.8014	9	12.719	77.3057	7
5	1425	72.5669	5	10.781	90.4581	4
6	1347	77.0063	4	12.235	80.5904	6
7	2700	0	12	21.625	16.8646	10
8	1062	93.2271	2	10.328	93.5324	3
9	1587	63.3466	6	11.953	82.5042	5
10	943	100	1	9.375	100	1
11	1588	63.2897	7	20.14	26.9427	9
12	1816	50.313	10	22.25	12.623	11

جدول ۸: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه‌ی SFSSSF

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	4534	84.7078	10	88.219	68.047	11
2	2593	96.5475	3	30.594	100	1
3	2990	94.1259	7	44.078	92.5231	7
4	3141	93.2048	8	36.234	96.8726	5
5	18421	0	12	210.937	0	12
6	2800	95.2849	4	41.188	94.1256	6
7	4630	84.1222	11	55.75	86.051	8
8	2144	99.2863	2	33.687	98.2849	3
9	2983	94.1686	5	35.859	97.0806	4
10	2027	100	1	32.078	99.1771	2
11	2984	94.1625	6	72.688	76.6589	9
12	3183	92.9486	9	75.328	75.195	10

جدول ۹: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه‌ی CSCSSS

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	2699	90.2794	10	35.328	83.0391	11
2	1532	97.4455	3	13.234	99.5676	2
3	1799	95.806	7	19.203	95.1022	7
4	1899	95.1919	8	16.5	97.1243	6
5	17401	0	12	146.328	0	12
6	1557	97.292	4	16.468	97.1482	5
7	3090	87.8784	11	28.047	88.486	8
8	1214	99.3982	2	13.469	99.3918	3
9	1787	95.8796	5	15.406	97.9427	4
10	1116	100	1	12.656	100	1
11	1788	95.8735	6	28.547	88.1119	9
12	1996	94.5963	9	31.344	86.0195	10



شکل ۷: صفحه‌ی چهار ضلعی نامنتظم ۱

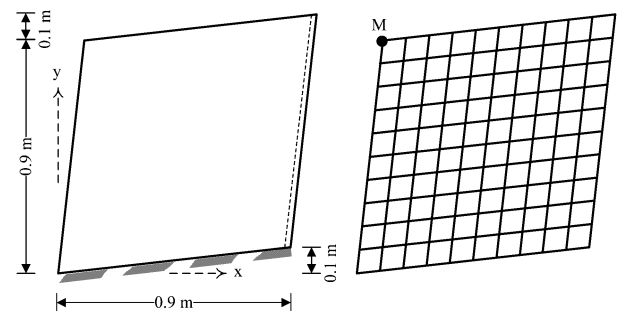
جدول ۱۲: رتبه بندی روش‌ها برای صفحه‌ی چهار ضلعی نامنتظم ۱

رتبه	امتیاز	زمان (ثانیه)	رتبه	امتیاز	تعداد کل تکرارها	روش
10	35.6224	319.922	10	68.7358	6024	1
1	100	87.891	3	96.1865	2756	2
6	87.3717	133.406	6	93.4397	3083	3
3	96.0377	102.172	7	92.1294	3239	4
11	0	448.313	11	0	14207	5
0			0			6
7	79.4036	162.125	9	79.6892	4720	7
5	89.7301	124.906	2	96.9845	2661	8
2	97.2993	97.625	4	93.4985	3076	9
4	94.1347	109.031	1	100	2302	10
8	60.2768	231.062	5	93.4901	3077	11
9	56.5701	244.422	8	92.1042	3242	12

۳-۸- صفحه‌ی چهار ضلعی نامنتظم ۲

یک صفحه‌ی چهارضلعی دیگر مورد تحلیل قرار گرفته است. هندسه‌ی این سازه در شکل ۸ نمایش داده شده است. بار اعمال شده بر این صفحه برابر با $915/751$ کیلوپاسکال و ضخامت صفحه $0/1$ متر است. بیشینه خیز در وسط لبه‌ی آزاد قرار دارد که مقدار آن برابر با $0/08015$ میلی‌متر به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱۳ گزارش شده‌اند. این جدول ناکارآمدی روش رضایی‌پژند و تقویان حکاک را نشان می‌دهد. کاراترین شیوه‌ها از منظر شمار تکرار و زمان تحلیل، به ترتیب، MRE و آندروود بودند. همچنین، باید اضافه کرد که روش‌های RPS، mdDR و کانگ برای رسیدن به پاسخ تعداد تکرار کم و بیش یکسانی دارند. به عبارت دیگر، این روش‌ها رفتار مشابهی از خود نشان داده‌اند.

MFT و آندروود به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم را از نظر تعداد تکرار کسب کرده‌اند. همچنین، مدت زمان تحلیل تا رسیدن به خطای قابل قبول شیوه‌های آندروود، mdDR و ژانگ کمتر از سایر راه‌کارها بود. لازم به ذکر است که روش‌های روش‌های RPS، mdDR و کانگ از نظر تعداد تکرار رفتار مشابهی دارند. مقدار بیشینه خیز در گره‌ی گوشه‌ی این ورق، برابر با $0/06492$ میلی‌متر به دست آمد.



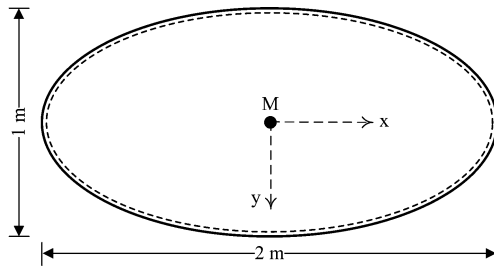
شکل ۶: صفحه‌ی متوازی الاضلاع

جدول ۱۱: رتبه بندی روش‌ها برای صفحه‌ی متوازی الاضلاع

رتبه	امتیاز	زمان (ثانیه)	رتبه	امتیاز	تعداد کل تکرارها	روش
12	0	166.968	12	0	24677	1
1	100	26.469	3	98.9792	4993	2
5	95.2178	33.188	7	97.0534	5376	3
3	97.8199	29.532	9	95.7057	5644	4
11	70.6404	67.719	11	59.109	12922	5
4	96.3744	31.563	4	98.3909	5110	6
8	93.0498	36.234	10	89.742	6830	7
6	94.8178	33.75	2	99.7787	4834	8
2	98.6107	28.421	5	97.0634	5374	9
7	94.7729	33.813	1	100	4790	10
9	87.1771	44.485	6	97.0584	5375	11
10	85.9871	46.157	8	96.3494	5516	12

۳-۷- صفحه‌ی چهار ضلعی نامنتظم ۱

در ادامه، فرآیندهای مختلف رهایی پویا در تحلیل صفحه‌ای که در شکل ۷ نشان داده شده است بررسی می‌شوند. در این تحلیل، از ۲۳۳ المان صفحه خمشی استفاده شده است. این سازه تحت بار گسترده‌ی یکنواخت به مقدار $1831/501$ کیلوپاسکال قرار دارد. ضخامت ورق برابر $0/15$ متر است. بیشینه خیز در گره M با مختصات $(0/24)$ رخ می‌دهد که مقدار آن برابر با $0/04043$ میلی‌متر است. رتبه‌بندی روش‌های به‌کار رفته در جدول ۱۲ درج شده است. بر این پایه، روش RPTH قادر به تحلیل این صفحه نیست. روش‌های آندروود و MRE بهترین رویکرد را در حل این ورق دارند. همچنین، روش‌های RPS، mdDR و کانگ رفتار مشابهی داشتند.



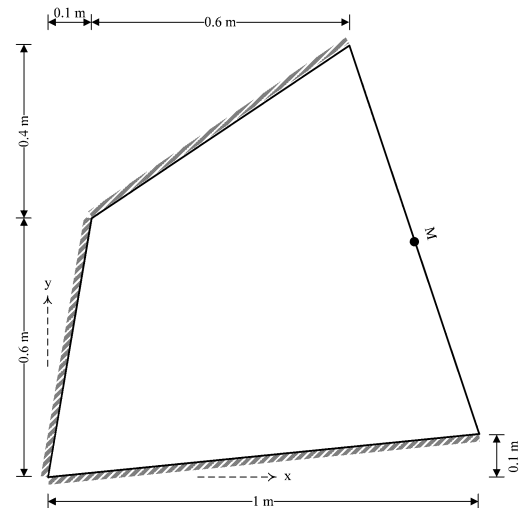
شکل ۹: صفحه‌ی بیضوی

جدول ۱۴: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه‌ی بیضوی

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	6754	0	12	4.421	0	12
2	3162	85.4628	9	1.469	92.6554	4
3	2883	92.1009	6	1.672	86.2837	5
4	3038	88.413	8	1.235	100	1
5	6163	14.0614	11	2.594	57.3446	10
6	2551	100	1	1.36	96.0766	3
7	4380	56.4835	10	1.765	83.3647	6
8	2610	98.5962	3	2.094	73.0383	7
9	2879	92.1961	4	1.297	98.054	2
10	2609	98.62	2	2.172	70.5901	8
11	2880	92.1723	5	2.547	58.8198	9
12	3022	88.7937	7	2.718	53.4526	11

۳-۱۰- صفحه حلقه‌ای

در این مثال، به دلیل تقارن، یک چهارم صفحه صفحه‌ی شکل ۱۰ با ۹۰ المان مدل‌سازی و حل می‌گردد. مقدار بار گسترده‌ی یکنواخت برابر با ۱۸۳/۱۵۰ کیلوپاسکال و ضخامت ورق ۰/۲ متر هستند. جدول ۱۵ پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. برای این سازه، کارآمدترین روش، kdDR است؛ به عبارت دیگر، این راه‌حل کمترین تعداد تکرار و کوتاه‌ترین مدت زمان تحلیل را برای رسیدن به پاسخ نیاز دارد. روش RPTH قادر به تحلیل این صفحه نیست. همچنین، فرآیندهای RPS، mdDR، و کانگ رفتار مشابهی دارند. افزون بر این، مقدار بیشینه خیز برابر با ۰/۰۷۷۵۳ میلی‌متر به دست آمد.



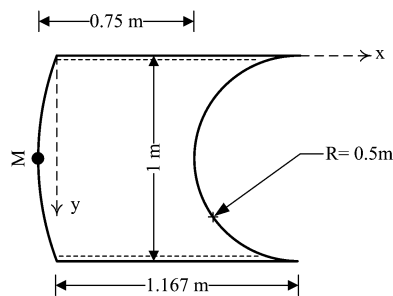
شکل ۸: صفحه‌ی چهار ضلعی نامنتظم ۲

جدول ۱۳: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه‌ی چهار ضلعی نامنتظم ۲

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	4606	0	11	28.141	0	11
2	2115	86.5832	3	10.296	100	1
3	2678	67.0143	7	15.094	73.1129	7
4	2815	62.2523	8	13.687	80.9975	6
5	2302	80.0834	4	11.125	95.3544	3
6		0	0			
7	3870	25.5822	10	19.219	49.9972	8
8	1966	91.7623	2	12.172	89.4873	4
9	2669	67.3271	5	12.891	85.4581	5
10	1729	100	1	11.031	95.8812	2
11	2670	67.2923	6	19.938	45.9681	9
12	2878	60.0626	9	21.375	37.9154	10

۳-۹- صفحه‌ی بیضوی

در این بخش، صفحه‌ی بیضوی شکل ۹ تحلیل می‌شود. مقدار بار گسترده‌ی یکنواخت ۹۱۵/۷۵۱ کیلوپاسکال و ضخامت ورق ۰/۲ متر هستند. به دلیل تقارن، یک چهارم صفحه با ۴۴ المان مدل‌سازی شد. امتیازهای روش‌ها در جدول ۱۴ درج شده‌اند. در میان روش‌های همگرا، الگوریتم رضایی‌پژند و تقویان حکاک بهترین راه‌حل بر پایه‌ی شمار تکرارها و شیوه‌ی ژانگ، سریع‌ترین راه‌کار می‌باشند. افزون بر این، فرآیند پادراکیس ضعیف‌ترین روش است. از سوی دیگر، روش‌های RPS و mdDR رفتار مشابهی دارند. باید دانست، بیشترین خیز در مرکز صفحه رخ می‌دهد که مقدار آن ۰/۰۶۳۶۱ میلی‌متر به دست آمد.



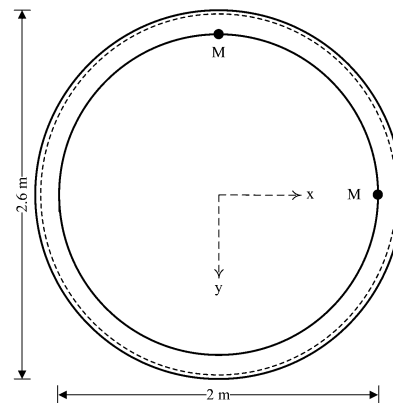
شکل ۱۱: صفحه با لبه‌های قوسی

جدول ۱۶: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه با لبه‌های قوسی

روش	تعداد کل تکرارها	رتبه امتیاز	زمان (ثانیه)	رتبه امتیاز
1	16133	76.1242	10	27.188
2	4943	99.8706	3	5.125
3	6020	97.585	6	8.484
4	6318	96.9527	8	6.109
5	52005	0	11	49.734
6	0	0	0	0
7	7520	94.4019	9	7.688
8	4882	100	1	9.609
9	6016	97.5935	4	6.11
10	4892	99.9788	2	10.265
11	6017	97.5914	5	16.125
12	6210	97.1818	7	17.375

۳-۱۲- صفحه دایره‌ای با بازشوی مستطیلی

در ادامه، صفحه‌ی شکل ۱۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقدار بار گسترده‌ی یکنواخت برابر با $1831/502$ کیلوپاسکال است. ضخامت ورق $0/15$ متر می‌باشد. این سازه متقارن است و یک چهارم آن مش‌بندی می‌شود. برای حل این صفحه از ۵۲ المان استفاده شد. تعداد تکرارها و مدت زمان تحلیل در جدول ۱۷ درج شده است. مقدار بیشینه‌ی خیز برابر با $0/1933$ میلی‌متر به دست آمد. روش RPTH قادر به حل این ورق نیست. در نتیجه، رتبه‌ی آن صفر می‌باشد. روش‌های کانگ و RPS شمار تکرار یکسانی داشتند. قوی‌ترین شیوه‌ها بر پایه‌ی شمار تکرار و زمان تحلیل، به ترتیب، MFT و آندروود بودند.



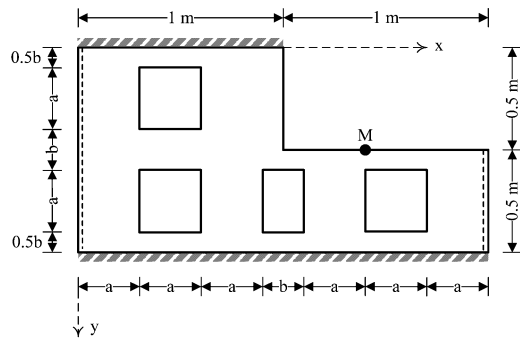
شکل ۱۰: صفحه‌ی حلقوی

جدول ۱۵: رتبه‌بندی روش‌ها برای صفحه‌ی حلقوی

روش	تعداد کل تکرارها	رتبه امتیاز	زمان (ثانیه)	رتبه امتیاز
1	34786	0	10	286.468
2	11136	90.8009	8	70.812
3	10090	94.8169	4	76.969
4	10589	92.901	7	66.985
5	34066	2.76434	9	215.406
6	0	0	0	0
7	8740	100	1	55.703
8	10101	94.7746	5	81.796
9	10089	94.8207	3	64.187
10	9756	96.0992	2	79.984
11	10090	94.8169	4	100.421
12	10212	94.3485	6	101.219

۳-۱۱- صفحه با لبه‌های قوسی

در این بخش، سازه‌ی شکل ۱۱ تحلیل می‌شود. لبه‌ی سمت راست، یک قطاع دایره با شعاع $0/5$ متر و لبه‌ی سمت چپ، یک قوس سه‌نقطه‌ای است. در این مدل از ۷۴ المان استفاده شده است. ضخامت ورق $0/15$ متر می‌باشد. مقدار بار گسترده اعمال شده برابر با $915/750$ کیلوپاسکال است. بیشینه‌ی خیز در نقطه‌ای با مختصات $(0, -0/25)$ رخ می‌دهد که مقدار آن برابر با $0/249$ میلی‌متر به دست آمد. نتایج در جدول ۱۶ ارائه شده‌اند. روش رضایی‌پژند و تقویان حکاک قادر به ارائه پاسخ نمی‌باشد. بر اساس شمار تکرارها، کارآمدترین روش، فرآیند MFT و بر پایه‌ی زمان تحلیل، آندروود است. همچنین، ناکارآمدترین راه‌کارها، الگوریتم‌های میرایی گرهی و پایادراکاکیس بودند. ذکر این نکته ضروری است که روش‌های RPS، mdDR و کانگ رفتار مشابهی از خود نشان داده‌اند. شیوه‌های MFT و MRE نیز شمار تکرار کم و بیش یکسانی داشتند.



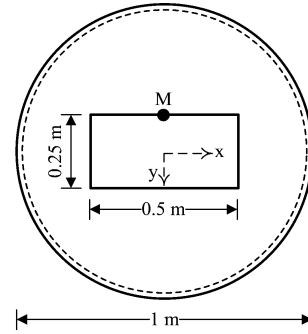
شکل ۱۳: صفحه‌ی L شکل با بازشو

جدول ۱۸: رتبه بندی روش‌ها برای صفحه‌ی L شکل با بازشو

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	4649	8.55873	10	201.187	17.8844	9
2	2736	79.4368	2	71.547	100	1
3	3577	48.2771	6	126.219	65.3701	7
4	3756	41.6451	7	97.468	83.5813	4
5	3942	34.7536	9	102.141	80.6214	5
6			0			0
7	4880	0	11	136.422	58.9074	8
8	3058	67.5065	3	115.063	72.4364	6
9	3568	48.6106	4	92.735	86.5793	3
10	2181	100	1	83.281	92.5675	2
11	4649	8.55873	10	201.187	17.8844	9
12	2736	79.4368	2	71.547	100	1

۳-۱۴- صفحه‌ی مستطیلی با بازشوی دایروی

در این‌جا، صفحه‌ی مستطیلی با بازشوی دایره‌ای شکل ۱۴ حل می‌شود. بار گسترده‌ی یکنواخت وارد بر ورق ۹۱۵/۷۵۱ کیلوپاسکال و ضخامت ۰/۱۵ متر هستند. به دلیل تقارن، یک چهارم صفحه با ۷۶ المان مدل‌سازی می‌گردد. جدول ۱۹ رتبه‌بندی روش‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، روش MFT دارای کمترین تکرار برای رسیدن به پاسخ درست است. از این رو، رتبه‌ی آن یک می‌شود. همچنین، شیوه‌ی آندروود، سریعترین نرخ همگرایی را دارد. باید افزود، فرآیندهای RPS، mdDR و کانگ شمار تکرار یکسانی داشتند. ناکارآمدترین راه‌کار حل این صفحه، الگوریتم پاپادراکاکیس بود. بیشینه خیز این ورق ۰/۲۵۲۱ میلی‌متر به دست آمد.



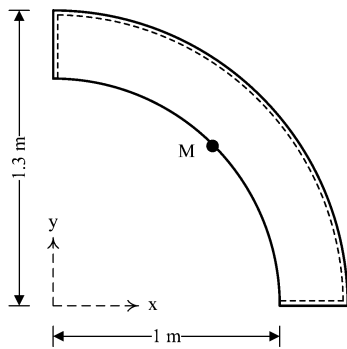
شکل ۱۴: صفحه‌ی دایره‌ای با بازشوی مستطیلی

جدول ۱۷: رتبه بندی برای صفحه‌ی دایره‌ای با بازشوی مستطیلی

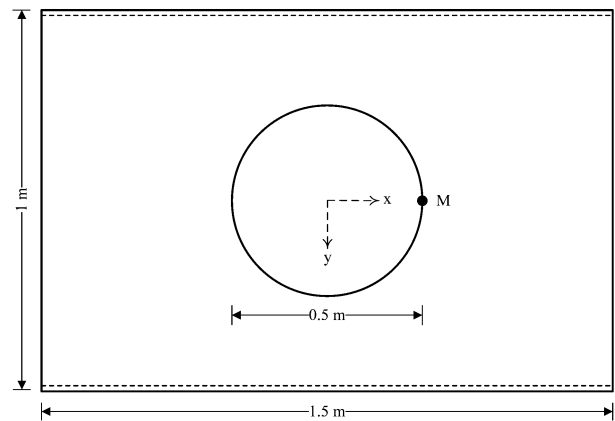
روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	17416	0	10	15.203	0	11
2	5097	92.9455	4	2.937	99.3681	2
3	5178	92.3344	5	3.828	92.15	5
4	5434	90.4029	8	3.015	98.7362	3
5	15314	15.8594	9	8.25	56.327	10
6			0			0
7	5400	90.6594	7	2.859	100	1
8	4701	95.9333	3	5.062	82.1533	6
9	4162	100	1	3.359	95.9494	4
10	4529	97.231	2	5.172	81.2622	7
11	5178	92.3344	5	6.859	67.5956	8
12	5315	91.3007	6	7.047	66.0726	9

۳-۱۳- صفحه L شکل با بازشو

صفحه‌ی شکل ۱۳ با دوازده روش مختلف رهایی پویا تحلیل می‌شود. مقادیر a و b به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۲ هستند. بار گسترده‌ی یکنواخت ۱۸۳/۱۵۰ کیلوپاسکال و ضخامت ورق ۰/۲۵ متر می‌باشند. یادآوری می‌شود که این صفحه بدون بازشو در مثال‌های پیشین تحلیل شد. بیشینه خیز در گره‌ای با مختصات (۱/۴، ۰/۵) رخ می‌دهد که مقدار جابجایی بیشینه برابر با ۰/۰۵۷۶ میلی‌متر است. برای تحلیل این صفحه، ۱۹۹ المان خمشی به کار رفت. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱۸ ارائه شده‌اند. مقدار خطای نیروی پسماند در روش رضایی‌پژند و تقویان حکاک به سمت بی‌نهایت میل می‌کند؛ بنابراین، پاسخ این روش واگرا بوده و رتبه آن صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، تعداد تکرارها در فرآیندهای RPS و کانگ یکسان است و این روش‌ها رفتار مشابهی از خود نشان داده‌اند. لازم به ذکر است که روش‌های MRE و آندروود برترین شیوه‌های حل این صفحه هستند.



شکل ۱۵: یک چهارم صفحه‌ی حلقوی



شکل ۱۴: صفحه‌ی مستطیلی با بازشو دایروی

جدول ۲۰: رتبه‌بندی روش‌ها برای یک چهارم صفحه‌ی حلقوی

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	7429	74.9609	10	57.953	64.014	10
2	4741	92.4655	9	29.219	96.9059	5
3	4292	95.3894	5	31.234	94.5993	7
4	4509	93.9763	7	27.766	98.5691	2
5	18940	0	11	113.875	0	11
6			0			0
7	4590	93.4488	8	28.781	97.4073	4
8	3855	98.2352	2	30.609	95.3147	6
9	4290	95.4024	3	26.516	100	1
10	3584	100	1	28.375	97.872	3
11	4291	95.3959	4	41.735	82.5788	9
12	4425	94.5233	6	41.641	82.6864	8

جدول ۱۹: رتبه‌بندی برای صفحه‌ی مستطیلی با بازشو دایروی

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	26477	0	11	120.562	0	12
2	7079	98.9189	3	25.344	100	1
3	7890	94.7833	7	32.5	92.4846	7
4	8278	92.8047	9	29.156	95.9966	4
5	7637	96.0734	5	27.125	98.1296	2
6	7437	97.0933	4	30.859	94.208	5
7	10220	82.9016	10	35.984	88.8256	9
8	6867	100	1	32.297	92.6978	6
9	7889	94.7884	6	27.984	97.2274	3
10	7001	99.3167	2	33.375	91.5657	8
11	7890	94.7833	7	44.578	79.8	10
12	8039	94.0235	8	45.781	78.5366	11

۳-۱۶- یک چهارم صفحه دایره‌ای

در آخرین نمونه، به تحلیل یک چهارم صفحه دایره‌ای پرداخته می‌شود. شکل ۱۶ هندسه‌ی این سازه را نشان می‌دهد. مدل‌سازی با استفاده از ۱۱۳ المان انجام شد. مقدار بار اعمال‌شده برابر با ۱۸۳/۱۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد. ضخامت صفحه ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شده است. بیشینه‌ی خیز در گره مرکزی لبه بیرونی رخ می‌دهد. مقدار آن، ۱/۹۴۳ میلی‌متر به دست آمد. نتایج در جدول ۲۱ درج شده‌اند. در این‌جا نیز، راه‌کار رضایی پژند و تقویان حکاک توانایی رسیدن به پاسخ را ندارد. افزون بر این، شیوه‌های MRE و میرایی جنبشی، برترین روش‌ها، به ترتیب، از منظر شمار تکرار و زمان تحلیل بودند. ناکارآمدترین روش نیز فرایند پاپادراکاکیس بود.

۳-۱۵- یک چهارم صفحه حلقوی

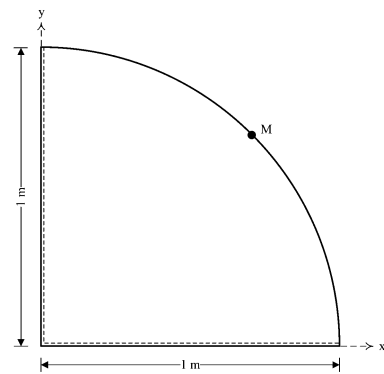
اکنون، صفحه‌ی شکل ۱۵ با ۹۰ المان خمشی حل می‌شود. مقدار بار گسترده‌ی یکنواخت ۱۸۳/۱۵۰ کیلوپاسکال و ضخامت ورق ۰/۲ متر است. بیشینه خیز در وسط لبه داخلی رخ می‌دهد که مقدار آن برابر با ۰/۱۴۰۶ میلی‌متر به دست آمد. جدول ۲۰ تعداد تکرارها و مدت زمان تحلیل را نشان می‌دهد. در این نمونه، شیوه‌ی RPTH توانایی رسیدن به پاسخ را نداشت. برترین روش حل این ورق، شیوه‌های MRE و mdDR بودند. راه‌کار میرایی گرهی نیز ضعیف‌ترین فرایند حل این ورق بود.

۴- رتبه‌بندی روش‌ها

بر اساس نتایج هر نمونه، به هر شیوه رتبه‌ای بین یک تا دوازده اختصاص داده شده است. رتبه‌ی یک نشان‌دهنده بهترین روش و رتبه‌ی دوازده بیانگر ضعیف‌ترین روش است. رتبه‌ی j برای روش i با نماد Q_{ij} نشان داده می‌شود. به عنوان مثال، بر اساس تعداد تکرارها، روش MRE در پانزده مثال، رتبه نخست را کسب کرده است. بنابراین، مقدار Q_{11} برای این روش برابر با پانزده خواهد بود. مقدار Q_{10} نشان‌دهنده تعداد سازه‌هایی است که روش i قادر به حل آن نبوده است. بر اساس مقادیر Q_{ij} ، امتیاز هر روش i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{ij} = 100 \times \sum_{j=1}^{12} Q_{ij} \times (13 - j) / 240 \quad (38)$$

اگر یک روش در هر ۲۰ مثال رتبه اول را کسب کند، امتیاز ۲۴۰ به دست می‌آورد. در نتیجه، امتیاز S_{ij} برای این روش برابر با ۱۰۰ خواهد بود. اگر روشی قادر به ارائه پاسخ نباشد، در معادله‌ی (۳۸) لحاظ نمی‌شود. رتبه‌ها و امتیازها بر اساس شمار تکرارها و زمان تحلیل، به ترتیب، در جدول ۲۲ و جدول ۲۳ درج شده‌اند.



شکل ۱۶: یک چهارم صفحه دایره‌ای

جدول ۲۱: رتبه‌بندی روش‌ها برای یک چهارم صفحه دایره‌ای

روش	تعداد کل تکرارها	امتیاز	رتبه	زمان (ثانیه)	امتیاز	رتبه
1	45043	0	11	426.422	0	11
2	10491	97.4531	4	76.188	99.773	2
3	10559	97.2613	7	91.563	95.393	6
4	11072	95.8144	9	80.359	98.5847	4
5	17982	76.3249	10	130.078	84.421	10
6			0			0
7	10295	98.0059	3	75.391	100	1
8	10057	98.6772	2	94.063	94.6808	7
9	10553	97.2782	5	76.578	99.6619	3
10	9588	100	1	90.484	95.7004	5
11	10557	97.267	6	124.75	85.9388	9
12	10695	96.8777	8	124.047	86.1391	8

جدول ۲۲: رتبه‌بندی روش‌ها بر اساس تعداد تکرارها

رتبه	روش	امتیاز S_{ij}	Q_{ij}												
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	MRE	97.9167	0	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	MFT	89.1667	0	2	12	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	Underwood	73.3333	0	0	2	11	2	0	1	1	1	2	0	0	0
4	mdDR	72.0833	0	1	0	2	8	6	3	0	0	0	0	0	0
5	RPS	62.5	0	0	0	0	2	9	6	3	0	0	0	0	0
6	Qiang	55.8333	0	0	0	0	1	3	7	7	2	0	0	0	0
7	zdDR	42.5	0	0	0	0	0	0	3	4	7	4	2	0	0
8	Zhang	41.25	0	0	0	0	0	0	0	5	9	6	0	0	0
9	RPTH	39.5833	10	1	1	1	6	1	0	0	0	0	0	0	0
10	Nodal Damping	32.5	0	0	0	1	2	2	0	0	0	3	2	6	4
10	kdDR	32.5	0	1	0	1	0	0	0	1	1	4	7	3	2
11	Papadrakakis	20.4167	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	8	2

جدول ۲۳: رتبه‌بندی روش‌ها براساس مدت زمان تحلیل

رتبه	روش	امتیاز S_{ij}	Q_{ij}												
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			J=0	J=1	J=2	J=3	J=4	J=5	J=6	J=7	J=8	J=9	J=10	J=11	J=12
1	Underwood	80.7971	0	10	7	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
2	mdDR	73.1884	0	3	4	7	4	2	0	0	0	0	0	0	0
3	Zhang	66.3043	0	1	3	6	4	1	4	1	0	0	0	0	0
4	MRE	59.7826	0	2	4	1	1	4	2	3	2	1	0	0	0
5	MFT	55.4348	0	0	0	4	2	2	7	5	0	0	0	0	0
6	Qiang	48.913	0	0	0	0	1	6	3	7	3	0	0	0	0
7	kdDR	47.1014	0	3	0	0	3	0	1	3	6	2	1	0	1
8	Nodal Damping	33.6957	0	1	2	1	1	1	0	0	1	0	4	6	3
9	RPS	29.7101	0	0	0	0	0	0	0	0	6	10	4	0	0
10	RPTH	28.6232	10	0	0	1	2	3	3	1	0	0	0	0	0
11	zdDR	22.4638	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	7	5	1
12	Papadrakakis	15.5797	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	9	5

در این شیوه دارند. در دوازده الگوریتم مقایسه شده در این مقاله، این عامل‌ها از روش‌های گوناگونی به دست آمده‌اند. در بیشتر راه‌کارها، گام زمانی برابر یک در نظر گرفته می‌شوند. با وجود این، در مقاله‌ی حاضر، دو روش کمینه انرژی پسماند و روش کمینه نیروی پسماند نیز به کار رفته‌اند که گام زمانی را بر اساس رابطه‌ای به دست می‌آورند که الزاماً برابر یک نیست. این دو شیوه برپایه‌ی شمار تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به پاسخ، در رتبه‌های اول و دوم جای داشتند. اما بر اساس سرعت همگرایی و زمان رسیدن به پاسخ درست، رتبه‌ی چهارم و پنجم را به دست آوردند. افزون بر این، ماتریس میرایی از روش‌های گوناگونی مانند ریلی، میرایی صفر و میرایی جنبشی به دست آمدند. نتایج نشان دادند که تعیین فرکانس بر اساس اصل ریلی و محاسبه‌ی ماتریس میرایی برپایه‌ی آن، بهترین شیوه می‌باشد.

۶- منابع

- [1] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [2] J. N. Reddy, *Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [3] S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1959.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مطالعه مقایسه‌ای بین دوازده روش شناخته‌شده رهایی پویا برای تحلیل الاستیک صفحات میندیلین انجام شد. ابتدا، روش رهایی پویا و رابطه سازی‌های آن معرفی گردید. سپس، الگوریتم‌های پیشین بیان شدند. در ادامه، نمونه‌های گوناگونی با رفتار خطی مورد تحلیل قرار گرفتند. رتبه‌بندی روش‌ها بر اساس تعداد تکرارها و مدت زمان تحلیل در هر مثال تعیین شد. بر اساس این مطالعه، روش رضایی‌پژند و علامتین که گام زمانی را با استفاده از کمینه کردن انرژی پسماند به دست می‌آورد، کمترین تعداد تکرار را برای رسیدن به پاسخ دارد. علامت اختصاری این روش MRE بود. همچنین باید افزود که روش‌های کمینه نیروی پسماند (MFT) و آندروود به ترتیب رتبه‌های بعدی را کسب کردند. علاوه بر این، بر اساس مدت زمان تحلیل، روش‌های آندروود، روش رضایی‌پژند و علامتین (mdDR) و ژانگ به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. از سوی دیگر، فرآیند پادراکیس بیشترین تعداد تکرار و مدت زمان تحلیل را برای دستیابی به دقت مورد نظر نیاز داشت. از این رو، این روش ناکارآمدترین راه‌حل بود. همچنین، در اکثر نمونه‌های حل شده، روش‌های کانگ، RPS و mdDR رفتار مشابهی داشتند؛ به عبارت دیگر، تعداد تکرارها برای این روش‌ها تقریباً یکسان به دست آمد.

روش رهایی پویا به سه عامل ماتریس جرم، ماتریس میرایی و گام زمانی وابسته است. باید دانست، عامل‌های جرم و میرایی اثر بیشتری

- Structures*, Vol. 52, No. 1, pp. 1–8, 1994, doi: [10.1016/0045-7949\(94\)90249-6](https://doi.org/10.1016/0045-7949(94)90249-6).
- [15] P. Cundall, “Explicit finite-difference methods in geomechanics,” in *Proc. 2nd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Blacksburg, VA, USA, 1976.
- [16] B. H. V. Topping and P. Ivanyi, *Computer Aided Design of Cable Membrane Structures*. Scotland: Saxe-Coburg Publications, 2008, ch. Dynamic Relaxation, pp. 39–84.
- [17] M. Rezaiee-Pajand, S. R. Sarafrazi, and H. Rezaiee, “Efficiency of dynamic relaxation methods in nonlinear analysis of truss and frame structures,” *Computers & Structures*, Vol. 112–113, pp. 295–310, 2012, doi: [10.1016/j.compstruc.2012.08.007](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.08.007).
- [18] M. Rezaiee-Pajand and H. Estiri, “Comparative analysis of three-dimensional frames by dynamic relaxation methods,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp. 1–16, 2017, doi: [10.1080/15376494.2017.1285462](https://doi.org/10.1080/15376494.2017.1285462).
- [19] M. Rezaiee-Pajand, H. Estiri, and M. Mohammadi-Khatami, “Creating better dynamic relaxation methods,” *Engineering Computations*, Vol. 36, No. 5, pp. 1483–1521, 2019, doi: [10.1108/EC-08-2018-0384](https://doi.org/10.1108/EC-08-2018-0384).
- [20] S. R. Sarafrazi and S. F. Labbafi, “Dynamic relaxation with concentrated damping,” *Modares Civil Engineering Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 146–156, 2017.
- [21] A. Zardi and J. Alamatian, “A novel formulation for fictitious mass in viscous dynamic relaxation method,” *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 15–30, 2018 (in Persian), doi: [10.22067/civil.v31i1.53685](https://doi.org/10.22067/civil.v31i1.53685).
- [22] M. Abbasi, A. Namdchi, and J. Alamatian, “A new formulation for kinetic dynamic relaxation method based on Lagrange interpolation,” *Sharif Journal of Civil Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 61–69, 2021 (in Persian), doi: [10.24200/j30.2020.53836.2603](https://doi.org/10.24200/j30.2020.53836.2603).
- [23] H. Estiri and A. Baghban, “Finding limit points by dynamic relaxation method,” *Journal of*
- [4] G.-R. Liu and Y.-T. Gu, *An Introduction to Meshfree Methods and Their Programming*. Berlin, Germany: Springer, 2005.
- [5] A. S. Day, “An introduction to dynamic relaxation,” *The Engineer*, Vol. 219, pp. 218–221, 1965.
- [6] J. Otter *et al.*, “Discussion: Dynamic relaxation,” in *ICE Proceedings*, Vol. 37, No. 4, pp. 723–750, 1967.
- [7] M. Rezaiee-Pajand and J. Alamatian, “The dynamic relaxation method using new formulation for fictitious mass and damping,” *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 34, No. 1, pp. 109–133, 2010, doi: [10.12989/sem.2010.34.1.109](https://doi.org/10.12989/sem.2010.34.1.109).
- [8] P. Underwood, “Dynamic relaxation (in structural transient analysis),” in *Computational Methods for Transient Analysis*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1983, pp. 245–265.
- [9] M. Kadkhodayan, J. Alamatian, and G. J. Turvey, “A new fictitious time for the dynamic relaxation (DXDR) method,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 74, No. 6, pp. 996–1018, 2008, doi: [10.1002/nme.2201](https://doi.org/10.1002/nme.2201).
- [10] M. R. Barnes, “Form-finding and analysis of prestressed nets and membranes,” *Computers & Structures*, Vol. 30, No. 3, pp. 685–695, 1988, doi: [10.1016/0045-7949\(88\)90304-5](https://doi.org/10.1016/0045-7949(88)90304-5).
- [11] M. Rezaiee-Pajand and H. Estiri, “Geometrically nonlinear analysis of shells by various dynamic relaxation methods,” *World Journal of Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 381–405, 2017, doi: [10.1108/WJE-10-2016-0109](https://doi.org/10.1108/WJE-10-2016-0109).
- [12] M. Rezaiee-Pajand and H. Estiri, “A comparison of large deflection analysis of bending plates by dynamic relaxation,” *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2016, doi: [10.3311/PPci.8728](https://doi.org/10.3311/PPci.8728).
- [13] M. Papadrakakis, “A method for the automatic evaluation of the dynamic relaxation parameters,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 35–48, 1981, doi: [10.1016/0045-7825\(81\)90066-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(81)90066-9).
- [14] L. C. Zhang, M. Kadkhodayan, and Y. W. Mai, “Development of the maDR method,” *Computers &*

- dynamic relaxation,” *International Journal of Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 11–22, 2006.
- [28] M. Rezaiee-Pajand, M. Kadkhodayan, and J. Alamatian, “Timestep selection for dynamic relaxation method,” *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 40, No. 1, pp. 42–72, 2012, doi: [10.1080/15397734.2011.599311](https://doi.org/10.1080/15397734.2011.599311).
- [29] M. Rezaiee-Pajand and S. R. Sarafrazi, “Nonlinear structural analysis using dynamic relaxation method with improved convergence rate,” *International Journal of Computational Methods*, Vol. 7, No. 4, pp. 627–654, 2010, doi: [10.1142/S0219876210002386](https://doi.org/10.1142/S0219876210002386).
- [30] M. Rezaiee-Pajand and S. R. Sarafrazi, “Nonlinear dynamic structural analysis using dynamic relaxation with zero damping,” *Computers & Structures*, Vol. 89, nos. 13–14, pp. 1274–1285, 2011, doi: [10.1016/j.compstruc.2011.04.005](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.04.005).
- Structure & Steel Research*, Vol. 16, No. 37, pp. 21–35, 2023.
- [24] H. Estiri and A. Baghban, “Tracing equilibrium paths using the dynamic relaxation method,” *Journal of Structural Mechanics and Solids*, Vol. 12, No. 6, pp. 35–48, 2022 (in Persian), doi: [10.22044/jsfm.2023.12271.3646](https://doi.org/10.22044/jsfm.2023.12271.3646).
- [25] S. Qiang, “An adaptive dynamic relaxation method for nonlinear problems,” *Computers & Structures*, Vol. 30, No. 4, pp. 855–859, 1988, doi: [10.1016/0045-7949\(88\)90117-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(88)90117-4).
- [26] L. G. Zhang and T. X. Yu, “Modified adaptive dynamic relaxation method and its application to elastic-plastic bending and wrinkling of circular plates,” *Computers & Structures*, Vol. 33, No. 2, pp. 609–614, 1989, doi: [10.1016/0045-7949\(89\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90035-7).
- [27] M. Rezaiee-Pajand and M. Taghavian Hakkak, “Nonlinear analysis of truss structures using



Development of a New Empirical Model for Predicting Thermal Conductivity of ZnO-Ethylene Glycol Nanofluid Based on Temperature, Particle Size, and Concentration

Mehrdad Safikhani¹ , Ashkan Ghafouri^{*2} , Ali Moarrefzadeh³

1.M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Mahs.C., Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

3. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Mahs.C., Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

Abstract

Base fluids generally have low thermal conductivity, but adding solid nanoparticles improves this property. In this research, spherical zinc oxide (ZnO) nanoparticles with diameters of 10-30, 35-45 and 80-100 nm were stabilized in ethylene glycol using a two-step method. CTAB surfactant and ultrasonic agitation were used to prevent particle aggregation. Nanofluids were prepared with volume fractions of 0.2 to 1% at temperatures of 20 to 60°C. Thermal conductivity was measured using the transient hot-wire method with a KD2-Pro device. Results showed that decreasing nanoparticle size, increasing temperature and increasing volume fraction significantly improved thermal conductivity, with the maximum increase (about 18%) observed at the highest temperature, smallest particle size and highest volume fraction. The effect of volume fraction was more remarkable at lower concentrations. Temperature increases facilitated heat transfer by weakening molecular bonds. Comparison of experimental data with analytical models showed that the difference between results increases with higher temperatures and volume fractions. Finally, a multivariate empirical model was developed and validated to predict the thermal conductivity of ZnO/EG nanofluid, which effectively describes the dependence of thermal conductivity on temperature, particle size and concentration.

Keywords

Nanofluid

Volume Fraction

Nanoparticle Diameter

Thermal Conductivity

Empirical Correlation

Received: 08.08.2025

Revised: 26.09.2025

Accepted: 21.10.2025

*Corresponding Author

Ashkan Ghafouri

Email

ashkan.ghafouri@iau.ac.ir

1- Introduction

The utilization of solid particles in fluids to enhance heat transfer has been extensively studied for many years. While microparticles presented challenges such as sedimentation, corrosion, and pressure drop, a significant breakthrough occurred in 1995 when Choi [1] introduced nanoparticles, revolutionizing this field. Nanoparticles have emerged as an ideal solution due to their superior stability, increased surface area, and ability to mitigate issues like corrosion and pressure drop. Two key characteristics of nanofluids are their enhanced

stability and significantly improved thermal conductivity. Although numerous studies have investigated zinc oxide nanofluids, the influence of nanoparticle diameter has received comparatively less attention. Most existing research has focused on examining variations in thermal conductivity based on volume fraction, temperature, and base fluid type.

Several notable studies have contributed to our understanding of nanofluids. Lee et al. [2]

How to Cite this Article:

[1] M. Safikhani, A. Ghafouri, and A. Moarrefzadeh, "Development of a new empirical model for predicting thermal conductivity of ZnO-ethylene glycol nanofluid based on temperature, particle size, and concentration," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 175–189, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.540032.1155> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

investigated nanofluids containing aluminum oxide and copper oxide nanoparticles in water and ethylene glycol, finding that the maximum thermal conductivity enhancement (20%) occurred in ethylene glycol with 4 vol% copper oxide nanoparticles having an average diameter of 35 nm. Masuda et al. [3] demonstrated that 13 nm aluminum oxide nanoparticles at 3.4 vol% could increase water's thermal conductivity by up to 30%, while larger particles (40 nm) only provided a 10% improvement. Jang et al. [4] proposed two primary mechanisms for enhanced heat transfer in nanofluids: (1) increased energy transfer due to nanoparticle motion and (2) improved thermal conductivity. Koblinski et al. [5] identified four influential factors: Brownian motion of particles, the interfacial layer between particles and fluid, heat transfer within nanoparticles, and heat transfer within nanoparticle clusters. Wang et al. [6] further confirmed the role of interfacial layers between fluid molecules and nanoparticles in facilitating heat transfer.

Recent advancements have addressed various aspects of nanofluid performance. Choi et al. [7] highlighted limitations in theoretical models predicting nanofluid thermal conductivity, noting that experimental values often exceed theoretical predictions. Lee et al. [8] examined the effects of pH and surfactants on the thermal conductivity of water/aluminum oxide nanofluids, finding these parameters significantly influence thermal performance. Das et al. [9] reported a 15% increase in thermal conductivity for water/aluminum oxide nanofluids at 4 vol% with a temperature change of 30°C. In a comprehensive study, Esfe et al. [10] optimized zinc oxide/ethylene glycol nanofluids using a combination of genetic algorithms and response surface methodology. Their multi-objective optimization approach achieved optimal thermal efficiency at 0.5 vol% with a minimum cost of \$360 per liter, while maintaining thermal performance and reducing production costs by 10%.

This study presents an experimental investigation of the thermal conductivity of zinc oxide/ethylene glycol nanofluids, specifically examining the simultaneous effects of nanoparticle volume

fraction, fluid temperature, and particle size. To date, no comprehensive study has been reported on the influence of zinc oxide nanoparticle diameter on the thermal conductivity of this specific system. Furthermore, existing models have been unable to accurately predict the thermal behavior of this nanofluid while accounting for all three key parameters. By developing a new empirical model that describes the dependence of thermal conductivity on volume fraction, temperature, and particle size, this research provides a valuable reference for industrial applications and future studies. The results offer a scientific foundation for designing high-efficiency heat transfer systems with optimized costs.

2- Research Methods

This study measured nanofluid thermal conductivity using the hot-wire method with a KD2-Pro thermal conductivity analyzer (Decagon Devices, USA). Precise temperature control was maintained by circulating temperature-regulated water through an external bath surrounding the sample beaker. The instrument was calibrated using glycerin prior to measurements. Zinc oxide/ethylene glycol nanofluids were prepared through a two-step method, with nanoparticles (10-30 nm, 35-45 nm, and 80-100 nm diameters, 99%+ purity) dispersed using ultrasonic homogenization for 3-5 hours to achieve stability. The nanofluids were tested at volume fractions ranging from 0.2% to 1%. Particle morphology and size distribution were verified using transmission electron microscopy, confirming near-spherical shapes and uniform dispersion. Specific surface area measurements showed significant variation across particle sizes (20-65 m²/g), influencing thermal performance. All measurements adhered to strict repeatability and reproducibility protocols.

3- Results

This research thoroughly examined the effects of particle diameter and volume fraction at constant temperature on thermal conductivity, the influence of diameter and temperature at fixed volume

fraction on thermal conductivity, and the impact of volume fraction and temperature at constant particle size on thermal conductivity, with detailed analysis accompanied by variation graphs. The main achievement of this study was developing a coherent multivariate correlation through regression analysis. The primary objective was to predict thermal conductivity based on three independent variables: nanoparticle volume fraction (ϕ), particle diameter (d_{np}), and nanofluid temperature (T). The model, derived through multiple linear regression, estimates nanofluid thermal conductivity as a function of volume fraction while accounting for the significant effects of temperature and particle diameter. The regression analysis employed simultaneous data entry. Five different models with varying relational patterns were comprehensively evaluated, with their results presented in Table 1.

Table 1: Error and deviation of the proposed models compared to experimental results

Model	R Square	Error %	σ^2	σ
7	1.09	1.19	1.56	0.895
8	0.87	0.76	1.14	0.878
9	1.19	1.42	1.44	0.885
10	0.83	0.69	1.10	0.887
11	0.98	0.97	1.08	0.937

A comparison graph of the models with experimental results is shown in Figure 1. Ultimately, the fifth model (presented below) emerged as the most accurate with the highest precision ($R^2=0.94$).

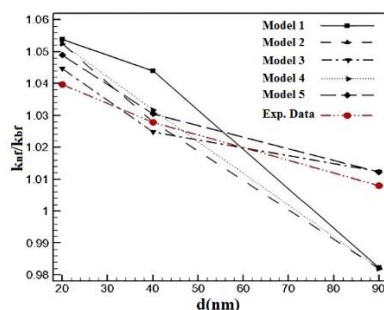


Figure 1: Comparison chart of thermal enhancement ratio predicted by various models versus experimental results for different particle diameters

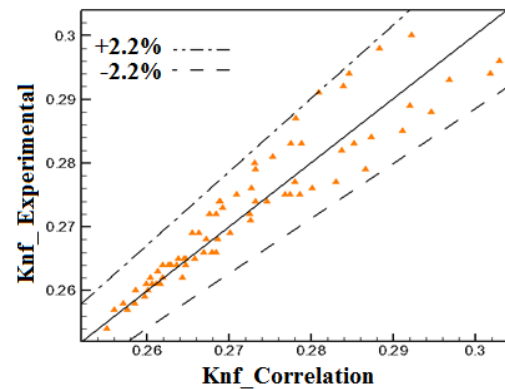


Figure 2: Comparison of thermal conductivity between experimental results and Model 5 predictions according to Equation (11)

Figure 2 demonstrates the comparison between experimental laboratory data and the model's predictions.

The developed model provides a reliable predictive tool for determining nanofluid thermal conductivity while simultaneously considering the interactive effects of these three crucial parameters. This comprehensive approach offers significant insights for thermal system design and optimization in nanofluid applications.

4- Conclusion

This experimental study investigated the thermal conductivity of ZnO/ethylene glycol nanofluids, examining temperature, particle diameter, and volume fraction effects. The two-step preparation method with ultrasonic homogenization ensured stable nanofluid dispersion, while thermal conductivity measurements employed the transient hot-wire method (KD2-Pro). Multivariate empirical models were developed to predict thermal conductivity, showing: (1) consistent thermal conductivity enhancement with increasing volume fraction across all temperatures; (2) temperature elevation improved conductivity due to weakened molecular bonds and intensified Brownian motion, though stability limits this effect; (3) higher volume fractions increased conductivity through greater solid particle density, with maximum 18% improvement observed at peak temperature (50°C), highest concentration (1 vol%), and smallest particle size (10-30nm); (4) comparative analysis

revealed growing discrepancies between experimental and semi-empirical results at elevated temperatures and concentrations, though the proposed model ($R^2=0.94$) effectively captured these parametric relationships. The findings demonstrate synergistic effects between the studied parameters, providing critical insights for thermal system optimization using nanofluids.

5- References

- [1] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, Nov. 12–17, 1995, Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 1995.
- [2] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li, and J. A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," *J. Heat Transfer*, Vol. 121, No. 2, pp. 280–288, May 1999, doi: [10.1115/1.2825978](https://doi.org/10.1115/1.2825978)
- [3] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles," *Netsu Bussei*, Vol. 7, No. 4, pp. 227–233, 1993, doi: [10.2963/jjtp.7.227](https://doi.org/10.2963/jjtp.7.227)
- [4] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58–64, Feb. 2000, doi: [10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- [5] P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, and J. A. Eastman, "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855–863, Feb. 2002, doi: [10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2)
- [6] X. Wang, X. Xu, and S. U. S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474–480, Oct. 1999, doi: [10.2514/2.6486](https://doi.org/10.2514/2.6486)
- [7] S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, and E. A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 2252–2254, 2001, doi: [10.1063/1.1408272](https://doi.org/10.1063/1.1408272)
- [8] X. F. Li, D. S. Zhu, X. J. Wang, N. Wang, J. W. Gao, and H. Li, "Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H₂O nanofluids," *Thermochimica Acta*, Vol. 469, pp. 98–103, Mar. 2008, doi: [10.1016/j.tca.2008.01.008](https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.01.008)
- [9] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," *J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567–574, Jul. 2003, doi: [10.1115/1.1571080](https://doi.org/10.1115/1.1571080)
- [10] M. H. Esfe, H. Hajmohammad, S. M. Motallebi, and D. Toghraie, "Cost and efficiency optimizations of ZnO/EG nanofluids using non-dominated sorting genetic algorithm coupled with a statistical method," *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 175–186, 2024, doi: [10.1007/s11814-023-00003-2](https://doi.org/10.1007/s11814-023-00003-2) (in Persian)
- [11] M. Hemmat Esfe and S. Saedodin, "Experimental investigation and proposed correlations for temperature-dependent thermal conductivity enhancement of ethylene glycol based nanofluid containing ZnO nanoparticles," *J. Heat Mass Transf. Res.*, Vol. 1, No. 1, pp. 47–54, 2014, doi: [10.22075/jhmtr.2014.153](https://doi.org/10.22075/jhmtr.2014.153) (in Persian)

ارائه یک مدل تجربی جدید برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول بر اساس دما، اندازه و غلظت نانوذرات

مهرداد صفی‌خانی^۱، اشکان غفوری^{۲*}، علی معرف‌زاده^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

کلمات کلیدی

نانوسیال

کسر حجمی

قطر نانوذرات

ضریب هدایت حرارتی

مدل تجربی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

*نویسنده مسئول

اشکان غفوری

ایمیل

ashkan.ghafouri@iau.ac.ir

چکیده

سیالات معمولاً ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند، اما افزودن نانوذرات جامد این ویژگی را بهبود می‌بخشد. در این پژوهش، نانوذرات کروی اکسید روی (ZnO) با قطرهای ۱۰-۳۰، ۳۵-۴۵ و ۸۰-۱۰۰ نانومتر به روش دو مرحله‌ای در اتیلن‌گلیکول پایدار شده‌اند. برای جلوگیری از تجمع ذرات، از سورفکتانت CTAB و همزن فراصوت استفاده شد. نانوسیالات با کسرهای حجمی ۰/۲ تا ۱٪ و در دمای ۲۰ تا ۶۰°C تهیه شدند. ضریب هدایت حرارتی با روش سیم داغ گذرا به کمک دستگاه KD2-Pro اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش قطر نانوذرات، افزایش دما و افزایش کسر حجمی، هدایت حرارتی را به‌طور معناداری بهبود می‌دهند؛ به‌طوری‌که بیشترین افزایش (حدود ۱۸٪) در بالاترین دما، کمترین اندازه ذرات و بیشترین کسر حجمی مشاهده شد. همچنین، تأثیر کسر حجمی در مقادیر پایین چشمگیرتر بود. افزایش دما با تضعیف پیوندهای مولکولی، انتقال حرارت را تسهیل کرد. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های تحلیلی نشان داد که اختلاف نتایج با افزایش دما و کسر حجمی بیشتر می‌شود. در نهایت، یک مدل تجربی چندمتغیره برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ZnO/EG ارائه و اعتبارسنجی شد. این مدل وابستگی هدایت حرارتی به دما، اندازه و غلظت نانوذرات را با $R^2=0/94$ به‌خوبی توصیف می‌کند.

۱- مقدمه

مطالعات موجود، تغییرات ضریب هدایت حرارتی را بر اساس کسر حجمی، دما و نوع سیال پایه بررسی کرده‌اند.

لی و همکاران [۲] در تحقیقات خود روی نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس در آب و اتیلن گلیکول دریافتند که بیشترین افزایش هدایت حرارتی (۲۰٪) مربوط به اتیلن گلیکول حاوی ۴٪ حجمی نانوذرات اکسید مس با قطر متوسط ۳۵ نانومتر بوده است. ماسودا و همکاران [۳] نشان دادند که نانوذرات اکسید آلومینیوم با قطر ۱۳ نانومتر در کسر حجمی ۳/۴٪ می‌توانند هدایت حرارتی آب را تا ۳۰٪ افزایش دهند، در حالی که ذرات بزرگ‌تر

استفاده از ذرات جامد در سیالات به‌منظور بهبود انتقال حرارت، سال‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. ذرات میکرو مشکلاتی مانند رسوب‌گذاری، خوردگی و افت فشار ایجاد می‌کردند تا اینکه در سال ۱۹۹۵، چوی [۱] با معرفی نانوذرات، انقلابی در این زمینه ایجاد کرد. نانوذرات به‌دلیل پایداری بالا، سطح تماس بیشتر و کاهش مشکلاتی مانند خوردگی و افت فشار، گزینه‌ای ایده‌آل هستند. دو ویژگی کلیدی نانوسیالات، پایداری بالا و ضریب هدایت حرارتی بسیار بهبودیافته است. تحقیقات متعددی بر روی نانوسیالات اکسید روی انجام شده، اما تأثیر قطر نانوذرات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بیشتر

How to Cite this Article:

[1] M. Safikhani, A. Ghafouri, and A. Moarrefzadeh, "Development of a new empirical model for predicting thermal conductivity of ZnO-ethylene glycol nanofluid based on temperature, particle size, and concentration," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 175-189, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.540032.1155> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیک: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

سورفکتانت، افزایش هدایت حرارتی بسیار بیشتری ایجاد می‌کنند. همچنین پایداری بالاتر این نانوسیالات توسط پتانسیل زتا در یک بازه دو ماهه تأیید گردید. پژوهشگران در این مقاله، یک معادله ریاضی جامع برای پیش‌بینی هدایت حرارتی بر اساس دما، غلظت و نسبت پایه سیال ارائه کردند که با داده‌های تجربی تطابق خوبی داشت. رحمتی‌نژاد و عظیم‌پور [۱۳] روش‌های افزایش پایداری نانوسیالات را بررسی کردند.

نتایج نشان داد ترکیب فراصوت و سورفکتانت‌ها مؤثرترین روش برای جلوگیری از تجمع ذرات و حفظ خواص حرارتی است. همچنین پراکندگی نور پویا (DLS) و طیف‌سنجی UV-Vi به‌عنوان روش‌های اصلی ارزیابی پایداری معرفی شدند. رشیدی و همکاران [۱۴] به مدل‌سازی و تحلیل حساسیت هدایت حرارتی نانوسیال آلومینا-اتیلن گلیکول/آب پرداختند. آن‌ها از دو روش هوشمند پرسپترون چندلایه و روش گروهی پردازش داده برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل MLP با تابع انتقال تابع پایه شعاعی (RBF) با مقادیر R^2 بسیار نزدیک به یک (۰/۹۹۹۸)، بالاترین دقت را دارد. همچنین تحلیل حساسیت آن‌ها مشخص کرد که هدایت حرارتی سیال پایه بیشترین تأثیر را بر روی هدایت حرارتی نانوسیال دارد. در حوزه مدل‌سازی رفتار نانوسیالات و ارائه همبستگی‌های تجربی می‌توان به پژوهش‌های سالاری و همکاران [۱۵]، غفوری و همکاران [۱۶] و پورمحمود و همکاران [۱۷] نیز اشاره نمود. در خصوص کاربرد نانوسیالات، یعقوبی و پورمیرزاآقا [۱۸] عملکرد رادیاتور خودرو را با نانوسیالات اکسید آلومینیم و اکسید مس بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از نانوسیال اکسید مس با غلظت ۱٪ در دور موتور ۱۱۵۲rpm، انتقال حرارت را تا ۵۲/۳۹ درصد نسبت به آب بهبود می‌بخشد که بیشترین افزایش مشاهده‌شده بود. نانوسیال اکسید آلومینیم نیز در همین شرایط ۵۲/۲۹ درصد بهبود عملکرد نشان داد. نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل تجربی جدید برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی/اتیلن گلیکول با در نظرگیری توأمان سه پارامتر کلیدی کسر حجمی، دمای سیال و اندازه ذرات است. این در حالی است که مطالعات پیشین نه‌تنها بررسی جامعی درباره تأثیر قطر نانوذرات بر روی این سامانه خاص ارائه نداده‌اند، بلکه فاقد مدلی هستند که بتواند اثر هم‌زمان این سه پارامتر را پیش‌بینی کند. مدل ارائه شده در این پژوهش که بر پایه داده‌های آزمایشگاهی گسترده استوار است، مرجع معتبری برای طراحی بهینه سیستم‌های انتقال حرارت با بازدهی بالا در کاربردهای صنعتی فراهم

(۴۰ نانومتر) تنها ۱۰٪ بهبود ایجاد می‌کنند. ژان و همکاران [۴] دو مکانیسم اصلی برای افزایش انتقال حرارت در نانوسیالات معرفی کردند: (۱) افزایش انتقال انرژی ناشی از حرکت نانوذرات و (۲) بهبود هدایت حرارتی. کبلینسکی و همکاران [۵] چهار عامل مؤثر را شناسایی کردند که شامل حرکت براونی ذرات، لایه مرزی بین ذره و سیال، انتقال حرارت درون نانوذرات و انتقال حرارت در خوشه‌های نانوذرات می‌شود. وانگ و همکاران [۶] نیز نقش لایه‌های مرزی بین مولکول‌های سیال و نانوذرات را در تسهیل انتقال حرارت تأیید کردند.

همچنین چوی و همکاران [۷] به محدودیت‌های موجود در مدل‌های تئوری پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات اشاره کرده‌اند و نشان دادند که مقادیر تجربی معمولاً بالاتر از پیش‌بینی‌های نظری هستند. لی و همکاران [۸] تأثیر pH و مواد فعال سطحی را بر هدایت حرارتی نانوسیالات آب/اکسید آلومینیوم بررسی کردند و دریافتند که این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر بهبود هدایت حرارتی دارند. داس و همکاران [۹] نیز افزایش ۱۵٪ هدایت حرارتی را در نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم با کسر حجمی ۴٪ و تغییر دمای ۳۰ درجه سلسیوس گزارش کردند. اسفه و همکاران [۱۰] بهینه‌سازی نانوسیالات اکسید روی/اتیلن گلیکول را با ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش سطح پاسخ بررسی کردند. این مطالعه نشان داد با استفاده از عدد مورومتسف به‌عنوان شاخص کارایی و بهینه‌سازی چندهدفه، می‌توان به بازدهی حرارتی بهینه در کسر حجمی ۵/۰٪ با حداقل هزینه ۳۶۰ دلار بر لیتر دست یافت. نتایج حاکی از کاهش ۱۰٪ هزینه‌های تولید نانوسیال همراه با حفظ کارایی حرارتی بود. پژوهشگران با ارائه یک رابطه تجربی، الگوی بهینه‌ای برای تعادل بین هزینه و عملکرد حرارتی پیشنهاد دادند. یاشوانتا و ونوینود [۱۱] به بررسی رفتار رئولوژیکی و هدایت حرارتی نانوسیال گرافیت-اتیلن گلیکول پرداختند. آن‌ها نانوسیال را با غلظت‌های حجمی مختلف تهیه کرده و تأثیر دما و نرخ برش بر ویسکوزیته و همچنین تأثیر اندازه نانوذرات بر هدایت حرارتی را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که ویسکوزیته با افزایش غلظت، کمی افزایش ولی با افزایش دما کاهش چشمگیری (۵۸ درصد) می‌یابد. همچنین مشخص شد که هدایت حرارتی برای نانوذرات با اندازه کوچک‌تر (زیر ۵۰ نانومتر) در مقایسه با اندازه بزرگ‌تر (زیر ۱۰۰ نانومتر) به میزان ۱۶/۳ درصد بیشتر است. سوراکاسی و همکاران [۱۲] به بررسی پایداری و خواص ترموفیزیکی نانوسیالات حاوی نانولوله کربنی چنددیواره اکسیدشده در پایه اتیلن گلیکول/آب پرداختند. نتایج نشان داد که نانولوله‌های اکسیدشده در مقایسه با نانولوله‌های اصلاح‌شده با

یکی از پارامترهای بسیار مهم در تغییر ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات، دما است. از این رو کنترل صحیح و یکنواخت دمای محفظه حاوی نانوسیال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به این منظور و باتوجه به نحوه عملکرد و ملاحظات سنسور TS1 دستگاه KD2-Pro برای انجام این پروژه، از یک حمام بروکفیلد به منظور گذر آب با دمایی خاص اطراف بشر حاوی نانوسیال استفاده شده است. با گذر آب با دمایی خاص از جداره خارجی ظرف، دمای سیال درون ظرف پس از مدتی کنترل شده و در محدوده معینی ثابت می‌شود.

می‌کند و مبنای علمی مستحکمی برای مطالعات آتی در این حوزه محسوب می‌شود.

۲- روش انجام پژوهش

در این پژوهش، به منظور اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، از روش سیم داغ^۱ و در قالب دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی KD2-Pro ساخت شرکت دکاگون امریکا، استفاده شده است. شکل ۱ (الف) شمایی کلی از دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی KD2-Pro را نشان می‌دهد.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۱: (الف): دستگاه KD2-Pro. (ب): دستگاه حمام بروکفیلد و (پ): دستگاه همزن اولتراسونیک

وسيله پراکنده کردن نانوذرات در سیال پایه از دستگاه مخصوص همزن اولتراسونیک استفاده شده است. در شکل ۱ (پ) دستگاه همزن اولتراسونیک به نمایش در آمده است. کسر حجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۲٪، ۰/۴٪، ۰/۶٪، ۰/۸٪ و ۱٪ در قطرهای ۱۰ تا ۳۵ تا ۴۵ و ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر می باشد. لازم به ذکر است که نانوذرات مورد استفاده، از محصولات شرکت نانوسنی کورپوریشن^۲ تهیه شده است. مشخصات نانو ذرات در جدول ۱ به نمایش در آمده است.

جدول ۱: مشخصات نانو ذرات

ZnO	فرمول شیمیایی
۸۱/۳۷	وزن مولکولی
۱۹۷۵° C	نقطه ذوب
۲۳۶۰° C	نقطه جوش
۵۶۰۶ kg/m ³	چگالی
۷۹/۹۲۴۰۶۱ Da	جرم تک‌ایزوتوپی
۷۹/۹۲۴۱ g/mol	جرم دقیق

به منظور کنترل دمای دقیق نانوسیال درون ظرف داخلی از حسگرهای اندازه‌گیری دقیق استفاده گردید. در شکل ۱ (ب) حمام بروکفیلد متصل به دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی KD2-Pro به نمایش در آمده است. به منظور اطمینان از صحت عملکرد دستگاه تحلیل حرارتی KD2-Pro می‌توان از اندازه‌گیری ضریب هدایت سیالات پایه‌ای مانند آب و یا مایع کالبراسیون این دستگاه، استفاده نمود. با استفاده از مایع کالبراسیون موجود در دستگاه، می‌توان ضمن اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی به صحت و دقت عملکرد دستگاه پی‌برد. بدین منظور پیش از انجام آزمایشات در ابتدا با استفاده از پاراب TS1، ضریب هدایت حرارتی گلیسرین موجود در کیف دستگاه اندازه‌گیری شد و از کالیبره بودن دستگاه اطمینان حاصل گردید. اولین گام در انجام بررسی تجربی حاضر، آماده‌سازی نانوسیال و پراکندگی نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد. در این تحقیق برای آماده سازی نانوسیال اکسید روی/اتیلن گلیکول از روش دومرحله‌ای استفاده شده است. به منظور آماده سازی نانوسیال به

² Nanosany Corporation

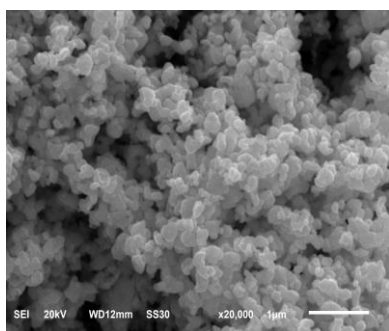
¹ Hot Wire

موضوع مهمی که در جدول مشخصه‌ها حائز اهمیت است، تفاوت آشکار سطح ویژه (SSA) در قطره‌های مختلف است. سطح ویژه نانوذرات با کوچک‌تر شدن قطر به میزان بسیار زیادی افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده افزایش سطح مؤثر نسبت به حجم نانوذرات در یک درصد وزنی یا حجمی خاص است. این افزایش قابل توجه، عملکرد حرارتی نانوسیال را تحت تأثیر قرار می‌دهد و انتظار می‌رود با افزایش یا کاهش قطر نانوذرات، برخی کارکردها و خواص حرارتی نانوسیال نیز دستخوش تغییر شود. نانوسیال با کسرهای حجمی فوق‌الذکر با پایداری مقادیر مشخصی از نانوذرات اکسید روی در قطره‌های مختلف در سیال پایه اتیلن گلیکول و ترکیب آن به وسیله دستگاه اولتراسونیک به دست می‌آید. از دستگاه اولتراسونیک پروبی به مدت ۳ تا ۵ ساعت برای هم‌زدن سیال و شکستن توده‌های ذرات برای دستیابی به نانوسیال پایدار استفاده شد.

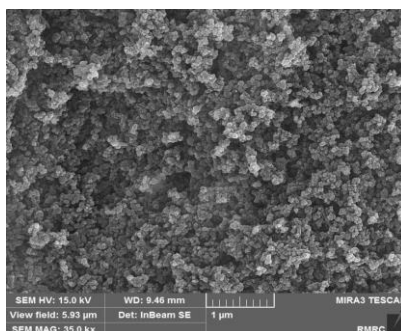
مشخصه‌های نانوذرات اکسید روی خریداری شده در جدول ۲ به ترتیب برای نانوذرات با قطر ۱۰ تا ۳۰، ۳۵ تا ۴۵ و ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر آمده است.

جدول ۲: مشخصه‌های نانوذرات اکسید روی

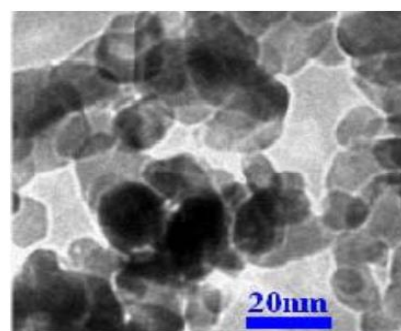
مشخصات	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
قطر ذرات (نانومتر)	۱۰۰-۸۰	۴۵-۳۵	۳۰-۱۰
درجه خلوص (%)	+۹۹٪	+۹۹٪	+۹۹٪
رنگ	شیری	شیری	شیری
فاز بلوری	تک‌بلور	تک‌بلور	تک‌بلور
ظاهرشناسی بلور	شبه کروی	شبه کروی	شبه کروی
چگالی حقیقی (g/cm ³)	۵/۶۰۶	۵/۶۰۶	۵/۶۰۶
سطح ویژه (m ² /g)	۶۰-۲۰	۶۵	۶۰-۲۰



(پ)

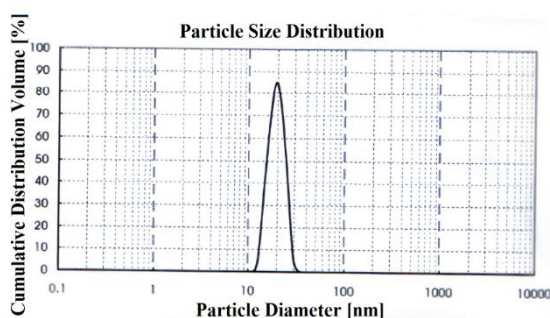


(ب)



(الف)

شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به نانوذرات اکسید روی (الف) در قطرهای ۱۰ تا ۳۰ (ب) در قطرهای ۳۵ تا ۴۵ (پ) در قطرهای ۸۰ تا ۱۰۰



شکل ۳: نمودار توزیع قطر و فراوانی نانو اکسید روی تهیه شده در قطر ۳۰-۱۰ نانومتر

همچنین در این تحقیق از تصاویر میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) به منظور درک خواص ساختاری نانوذرات اکسید روی در قطره‌های مختلف استفاده شده است. این روش پیشتر در محدوده وسیعی از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲ تصاویر TEM مربوط به سه قطر مختلف مورد استفاده در این تحقیق را به صورت مجزا نمایش می‌دهد. شکل ۳ نیز نمودار توزیع و فراوانی نانوذره تهیه شده در یکی از قطر ها را نمایش می‌دهد.

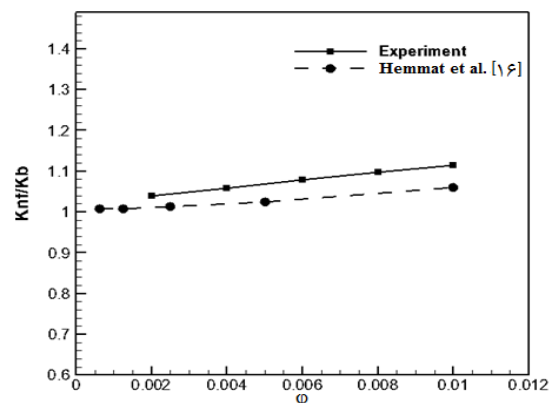
در جدول ۳ خطای دستگاه‌ها و وسایل مورد استفاده در آزمایشگاه نانوسیالات مورد استفاده برای این تحقیق آورده شده است.

جدول ۳: دقت دستگاه‌ها و وسایل مورد استفاده در آزمایشگاه

نام وسیله آزمایشگاهی	دقت دستگاه
ترازو	۰/۰۰۰۱g
پیت ژوزه	۰/۱ml
دستگاه KD2-Pro	۰/۰۵ W/m.K
حمام پروکفیلد	۰/۱ °C

همچنین در این تحقیق به چند نکته و اصل اندازه‌گیری در آزمایشگاه توجه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تکرارپذیری^۱ و تجدیدپذیری^۲ اشاره نمود.

پیش از ارائه نتایج پژوهش، به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از نتایج مدل به دست آمده در این بخش، داده‌های پژوهش‌های پیشین [۱۱] با نتایج کار حاضر مقایسه شده که در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج این پژوهش با نتایج تجربی همت و همکاران [۱۹] تا حد زیادی همخوانی دارد.



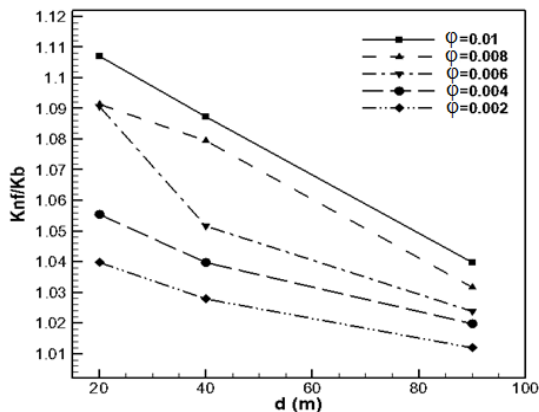
شکل ۴: نمایش ضریب هدایت حرارتی بدست آمده از رابطه (۱۱) بر حسب مقادیر بدست آمده از مطالعات پیشین

۳- نتایج و یافته‌های پژوهش

۳-۱- تأثیر قطر و کسر حجمی در دمای ثابت بر ضریب هدایت

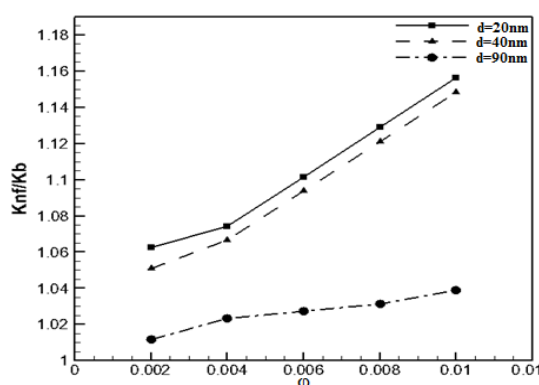
مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در قطرهای مختلف نانوذرات و کسرهای حجمی گوناگون در شکل ۵ و شکل ۶ آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود کاهش قطر منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد که این افزایش در کسرهای حجمی بالاتر محسوس‌تر می‌باشد. در کسر حجمی ۱٪ و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با قطر ۱۰ تا ۳۰ نانومتر نسبت به سیال پایه حدود ۱۱٪ است در حالی که نانوسیال با قطر ذرات ۳۵ تا ۴۵ نانومتر نسبت به سیال پایه

۹٪± ضریب بهبود هدایت حرارتی افزایش داشته است. طبق مقادیر حاصله، تغییر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی برای قطر ۸۰ تا ۱۰۰ نیز در حدود ۴/۵٪± نسبت به سیال پایه افزایش داشته است.



شکل ۵: تأثیر قطر بر ضریب هدایت نانوسیال در کسر حجمی ثابت

علت مشهود بودن بهبود هدایت حرارتی در کسرهای حجمی بالاتر با کاهش قطر، به هم‌افزایی دو مکانیزم برمی‌گردد: کاهش قطر هم باعث افزایش سطح تماس (انتقال حرارت بهتر در فصل مشترک) و هم تشدید حرکت براونی (انتقال انرژی جنبشی) می‌شود. در غلظت‌های بالا، تراکم ذرات ریز این دو اثر را تقویت کرده و سینرژی ایجاد می‌کند که منجر به بهبود کارایی قابل توجه انتقال حرارت می‌شود. در شکل ۶ تأثیر کسر حجمی در قطر ثابت آورده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص می‌باشد با افزایش کسر حجمی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد.



شکل ۶: تأثیر کسر حجمی بر ضریب هدایت نانوسیال در قطر ثابت

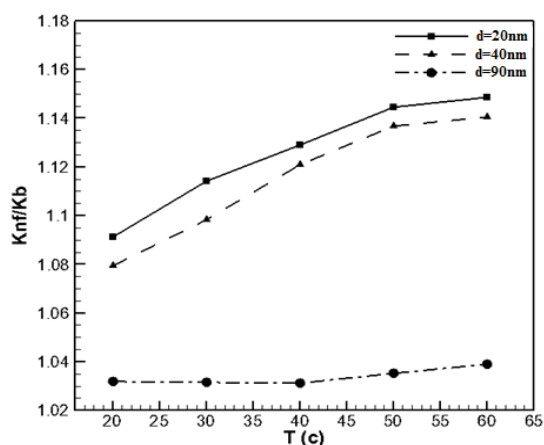
در قطر ۱۰ تا ۳۰ نانومتر که با نماد قطر ۲۰ به نمایش در آمده است، میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در کسر حجمی یک درصد نسبت به سیال پایه ۱۶٪± می‌باشد و در قطر ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر که با

² Reproducibility

¹ Repeatability

این میزان افزایش نشان‌دهنده سهم قابل‌توجه دما در افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است. ازسوی دیگر می‌توان نتیجه گرفت در نظر گرفتن پارامترهای اثرگذار و مهمی مانند دما یا قطر نانوذرات در روابط و مدل‌های تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات می‌تواند باعث عدم کرائی و کاهش نتیجه‌بخشی آن‌ها شود. همچنین بسیاری از مدل‌هایی که تاکنون به‌صورت تحلیلی و یا تجربی ارائه گردیده‌اند، میزان اثرگذاری این پارامترها را ناچیز فرض کرده و یا اثر این پارامترها را به‌صورت مستقیم لحاظ نکرده‌اند؛ بنابراین در ادامه ضمن قیاس داده‌های تجربی موجود با مدل‌های کلاسیک، به ارائه یک مدل وابسته به دما و قطر نانوذرات پرداخته خواهد شد.

در شکل ۸ تأثیر دما در قطر ثابت آورده شده است. همانطور که از شکل مشخص می‌باشد با افزایش دما در کسر حجمی ۰/۸ درصد نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد. در قطر ۱۰ تا ۳۰ نانومتر که با نماد قطر ۲۰ به نمایش در آمده است، میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه در همان دما در حدود ۱۵٪ می‌باشد و در قطر ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر که با نماد قطر ۹۰ به نمایش در آمده است، میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه همان دما در حدود ۴٪ می‌باشد.



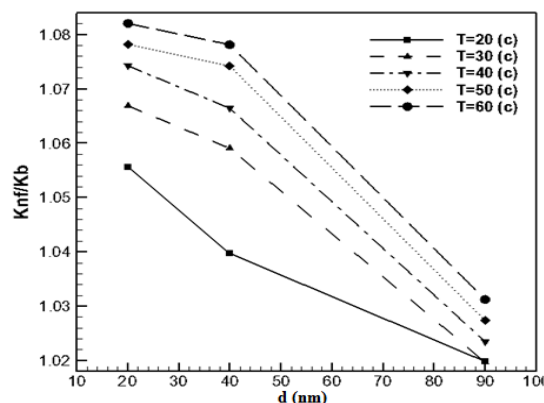
شکل ۸: تأثیر دما بر ضریب هدایت نانو سیال در قطر ثابت

این نتایج مجدداً بر نقش کلیدی اندازه ذرات تأکید دارد، به‌طوری که افزایش دما تأثیر تشدیدکننده حرکت براونی را دارد. ذرات کوچک‌تر به دلیل سطح ویژه بسیار بالاتر و حرکت براونی شدیدتر ناشی از دما، بهبود حرارتی چشمگیری نشان می‌دهند، درحالی‌که ذرات درشت‌تر به دلیل سطح تماس کمتر و تحرک محدودتر، بهبود کمتری را تجربه می‌کنند.

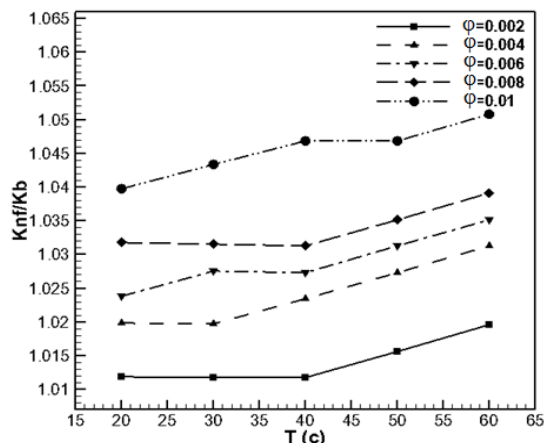
نماد قطر ۹۰ به نمایش در آمده است، میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در کسر حجمی یک درصد نسبت به سیال پایه ۴٪ می‌باشد. این روند نشان می‌دهد که با افزایش قطر میزان تغییر ضریب بهبود حرارتی کاهش می‌یابد. این روند کاهشی کاملاً منطبق بر انتظارات تئوریک است؛ زیرا با افزایش قطر نانوذرات، سطح ویژه آن‌ها به طور قابل توجهی کاهش یافته و شدت حرکت براونی نیز تضعیف می‌گردد. در نتیجه، هر دو مکانیزم اصلی انتقال حرارت (انتقال از طریق فصل مشترک و انتقال انرژی جنبشی) کارایی خود را از دست داده و سهم نانوذرات در بهبود هدایت حرارتی کل نانوسیال کاهش می‌یابد.

۳-۲- تأثیر قطر و دما در کسر حجمی ثابت بر ضریب هدایت

مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در قطرهای مختلف نانوذرات و دماهای مختلف در شکل ۷ و شکل ۸ آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود کاهش قطر منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد، زیرا از یک سو نسبت سطح به حجم نانوذرات را افزایش داده و سطح تماس برای انتقال حرارت را گسترش می‌دهد، و از سوی دیگر حرکت براونی را تشدید می‌کند که این امر مکانیزم انتقال حرارت از طریق ریزهمرفت را تقویت می‌نماید. این افزایش در دماهای بالاتر محسوس‌تر می‌باشد. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۰/۲ درصد تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با قطر ۱۰ تا ۳۰ نانومتر نسبت به سیال پایه برابر ۸/۸٪ است و در حالی که ذرات با قطر برابر ۳۵ تا ۴۵ نانومتر برابر ۷/۸٪ می‌باشد. طبق مقادیر حاصله نیز تغییر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی برای قطر ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۳/۴٪ می‌باشد. این افزایش در ضریب هدایت حرارتی با توجه به دما را می‌توان به افزایش انرژی جنبشی ملکول‌های نانوسیال و بهبود سطح انرژی آن‌ها با افزایش دما مرتبط دانست.



شکل ۷: تأثیر قطر بر ضریب هدایت نانو سیال در دمای ثابت



شکل ۱۰: تأثیر دما بر ضریب هدایت نانو سیال در کسر حجمی ثابت

این افزایش ناشی از تشدید حرکت براونی نانوذرات با افزایش دماست که انتقال حرارت را تسهیل می‌کند. میزان بهبود کمتر در کسر حجمی بالاتر (۰/۱) می‌تواند به دلیل تجمع نسبی ذرات و محدودیت در تحرک آزادانه آن‌ها در مقایسه با سیال رقیق‌تر (۰/۲) باشد که ذرات در آن پراکندگی و تحرک بهتری دارند.

۴- ارائه یک رابطه هم‌بستگی چندمتغیره منسجم به روش رگرسیون

در این مطالعه هدف پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی بر حسب سه متغیر کسر حجمی نانوذرات (ϕ)، قطر نانوذرات (d_{np}) و دمای نانوسیال (T) که هرچه متغیرهای مستقلی هستند، این مدل که برای تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به شکل تابع عواملی مانند کسر حجمی نانوذرات و تأثیر عوامل بسیار مهم و تأثیرگذاری مانند دما و قطر نانوذرات است، از روش رگرسیون خطی چندمتغیره، به‌دست‌آمده است. ورود داده‌ها در فرایند تحلیل رگرسیونی به روش هم‌زمان صورت‌گرفته است. در روش تحلیل رگرسیونی چندین رابطه پایه وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر هستند:

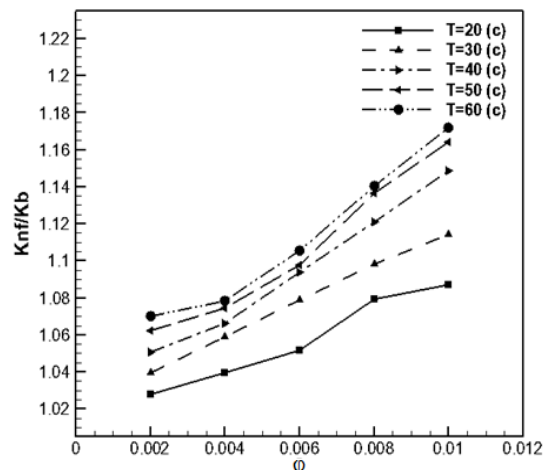
$$\frac{k_1}{k_2} = 1 + AX^1 + BX^2 + CX^3 + DY^1 + EY^2 + FY^3 + GZ^1 + HZ^2 + IZ^3 \quad (1)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = A(1 + \frac{X_1}{X_2})^a (1 + \frac{Y_1}{Y_2})^b (1 + \frac{Z_1}{Z_2})^c \quad (2)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = 1 + AX^a (\frac{Y_1}{Y_2})^b (\frac{Z_1}{Z_2})^c \quad (3)$$

۳-۳- تأثیر کسر حجمی و دما در قطر ثابت بر ضریب هدایت

مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در کسر حجمی مختلف و دماهای مختلف در شکل ۹ و شکل ۱۰ آمده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش کسر حجمی منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد که این افزایش در دماهای بالاتر محسوس‌تر می‌باشد. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و با قطر ۴۰ نانومتر تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با کسر حجمی یک درصد نسبت به سیال پایه برابر ۱۷٪+ است. در حالی که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با کسر حجمی یک درصد نسبت به سیال پایه در دما را برابر ۹٪+ است. این کاهش در ضریب هدایت حرارتی با توجه به دما را می‌توان به کاهش انرژی جنبشی ملکول‌های نانوسیال و کاهش سطح انرژی آن‌ها با کاهش دما مرتبط دانست.



شکل ۹: تأثیر کسر حجمی بر ضریب هدایت نانو سیال در دمای ثابت

در شکل ۱۰ تأثیر دما در کسر حجمی ثابت آورده شده است. همانطور که از شکل مشخص می‌باشد با افزایش دما در قطر ثابت ۹۰ نانومتر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ثابت یک درصد میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه در همان دما در حدود ۵/۱٪+ می‌باشد و در کسر حجمی ثابت ۰/۲ درصد میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه در همان دما در حدود ۲٪+ می‌باشد.

نزدیک‌تر باشد، رابطه رگرسیون بهتری ارائه می‌دهد. بنابراین رابطه (۱۱) به دلیل ارائه بهتر همبستگی داده‌ها و همچنین خطاهای کمتر که در جدول ۴ قابل مشاهده هستند، در پژوهش حاضر به عنوان رابطه پایه انتخاب گردید.

جدول ۴: خطا و انحراف مدل های پیشنهادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی

شماره مدل	R Square	میانگین خطای نسبی %	σ^2 واریانس	σ انحراف معیار
(۷)	۰/۸۹۵	۱/۵۶	۱/۱۹	۱/۰۹
(۸)	۰/۸۷۸	۱/۱۴	۰/۷۶	۰/۸۷
(۹)	۰/۸۸۵	۱/۴۴	۱/۴۲	۱/۱۹
(۱۰)	۰/۸۸۷	۱/۱۰	۰/۶۹	۰/۸۳
(۱۱)	۰/۹۳۷	۱/۰۸	۰/۹۷	۰/۹۸

خطای نسبی

$$\text{Error} = \frac{\text{Model Value} - \text{True Value}}{\text{True Value}} \times 100 \quad (12)$$

واریانس

$$\sigma^2 = \frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{n} \quad (13)$$

انحراف معیار

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{n}} \quad (14)$$

همچنین در جدول ۴ خطای مدل های پیشنهادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش های مختلف محاسبه خطا و انحراف معیار مطابق روابط (۱۲) تا (۱۴) آورده شده است [۲۰].

۴-۱- تحلیل مدل ضریب هدایت حرارتی

به منظور تحلیل و بررسی مدل ضریب هدایت حرارتی ارائه شده، در شکل ۱۱ نتایج کار حاضر با نتایج مدل ارائه شده طبق رابطه (۱۱) مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، حداکثر اختلاف مقادیر بدست آمده از مدل پیشنهادی و مقادیر تجربی پژوهش های پیشین ۲/۲ درصد است که مقدار رضایت بخشی است و اعتبار مدل بدست آمده را صحت گذاری می‌کند.

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp \left[A + B \frac{X_1}{X_2} + B \frac{Y_1}{Y_2} + C \frac{Z_1}{Z_2} \right] \quad (4)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp \left[A \left(1 + \frac{X_1}{X_2} \right)^a \left(1 + \frac{Y_1}{Y_2} \right)^b \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^c \right] \quad (5)$$

همبستگی داده ها توسط هر پنج رابطه بررسی گردید. مقدار R^2 که میزان پراکندگی رگرسیون به پراکندگی کل داده ها را نشان می‌دهد و از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد [۲۰].

$$R^2 = \frac{\left(n \sum XYZ - (\sum X)(\sum Y)(\sum Z) \right)^2}{\left(\sqrt{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \sqrt{n(\sum Y^2) - (\sum Y)^2} \sqrt{n(\sum Z^2) - (\sum Z)^2} \right)} \quad (6)$$

در رابطه فوق n تعداد داده ها و x, y و z متغیرهای مستقل است.

$$\begin{aligned} \frac{k_{nf}}{k_{bf}} = & 1.022 + (-2.799\varphi) + (1871.465\varphi^2) \\ & + (-89754.879\varphi^3) + (0.002T) + \\ & (-4.948 \times 10^{-6} T^2) + (-6.991 \times 10^{-8} T^3) \\ & + (-0.000309d) + (-6.934 \times 10^{-8} d^3) \end{aligned} \quad (7)$$

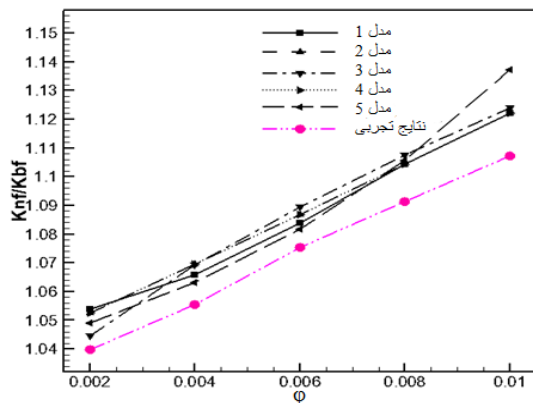
$$\begin{aligned} \frac{K_{nf}}{K_{bf}} = & 1.039920 \left(1 + \frac{\varphi}{100} \right)^{8.066} \\ & \times \left(1 + \frac{T}{60} \right)^{0.084} \left(1 + \frac{d}{90} \right)^{-0.141} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = 1 + \left[1.059253 \times \varphi^{0.635} \left(\frac{T}{70} \right)^{0.467} \left(\frac{d}{100} \right)^{-0.848} \right] \quad (9)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \exp \left[0.038 + 0.059 \frac{T}{70} + 8.018\varphi - 0.099 \frac{d}{100} \right] \quad (10)$$

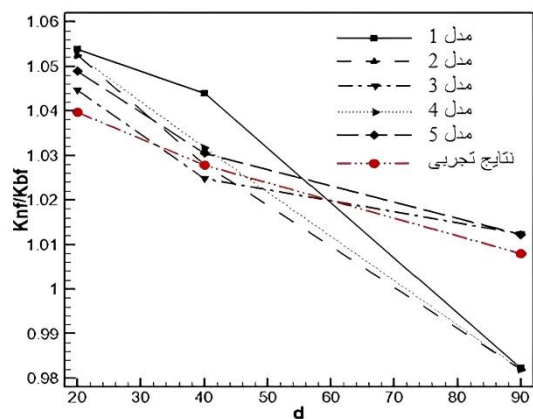
$$\begin{aligned} \frac{K_{nf}}{K_{bf}} = & \exp(0.04365 \left(1 + \frac{\varphi}{100} \right)^{124.478} \\ & \times \left(1 + \frac{T}{70} \right)^{1.341} \left(1 + \frac{d}{100} \right)^{-2.781}) \end{aligned} \quad (11)$$

از تحلیل داده ها R^2 روابط (۷) تا (۱۱) به ترتیب ۰/۸۹۵ و ۰/۸۷۸ و ۰/۸۸۵ و ۰/۸۸۷ و ۰/۹۳۷ حاصل شد. هر چه میزان R^2 به ۱



شکل ۱۳: نمودار مقایسه ضریب بهبود حرارتی ارائه شده توسط مدل‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی در کسرهای حجمی مختلف

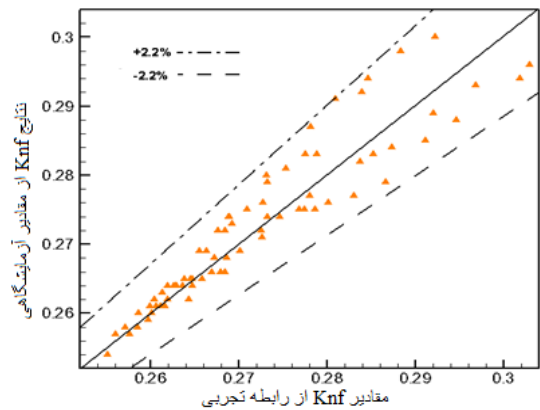
مدل‌های ارائه شده برای ضریب بهبود حرارتی در قطرهای مختلف برای نانوذره ZnO در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۰/۲ درصد با هم مقایسه شده و نتایج در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با افزایش قطر مدل شماره ۱، ۲ و ۴ انحراف زیادی پیدا می‌کنند و نتایج آن‌ها تا حدودی غیرواقعی می‌گردد و نشان می‌دهد که نتایج ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از سیال پایه کمتر شده است. همچنین مدل شماره ۵ نتایج متناسب و همخوانی بیشتری با داده‌های تجربی دارد.



شکل ۱۴: نمودار مقایسه ضریب بهبود حرارتی ارائه شده توسط مدل‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی در قطرهای مختلف

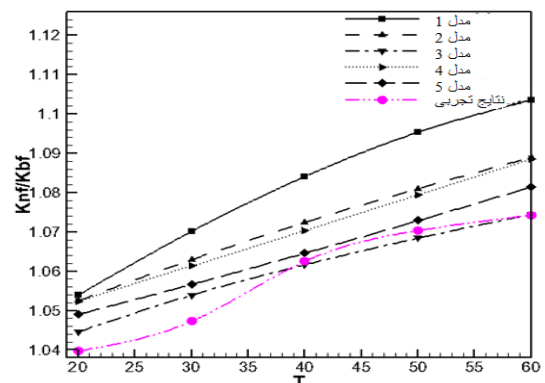
باتوجه به نتایج به دست آمده از تحلیل نمودارها، مدل (۱۱) به عنوان مدل نهایی و پیشنهادی این پژوهش انتخاب و مجدد به شکل زیر بازنویسی می‌گردد.

$$\frac{Kn_f}{K_{bf}} = \exp(0.04365 \left(1 + \frac{\phi}{100}\right)^{124.478} \times \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{1.341} \left(1 + \frac{d}{100}\right)^{-2.781}) \quad (11)$$



شکل ۱۱: نمایش ضریب هدایت حرارتی نتایج کار حاضر با نتایج مدل (۱۱)

همچنین در این بخش به مقایسه مدل‌های به دست آمده از نتایج تجربی و نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. مدل‌های ارائه شده برای ضریب بهبود حرارتی در دماهای مختلف برای نانوذره ZnO کسر حجمی ۰/۲ درصد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر با هم مقایسه شده و نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که روابط به دست آمده از تطابق رضایت‌بخشی برخوردار هستند، ولی مدل شماره ۵ و شماره ۳ در این بخش نتایج مناسب‌تری دارند. البته روابط با افزایش دما انحراف بیشتری پیدا می‌کنند. بیشترین انحراف مربوط به مدل اول با حدود ۲ درصد و کمترین انحراف مربوط به مدل سوم با حدود ۰/۲۵ درصد نسبت به نتایج تجربی است.



شکل ۱۲: نمودار مقایسه ضریب هدایت حرارتی ارائه شده توسط مدل‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی در دماهای مختلف

مدل‌های ارائه شده برای ضریب بهبود حرارتی در کسر حجمی مختلف برای نانوذره ZnO در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر با هم مقایسه شده و نتایج در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

۴. از مقایسه روابط موجود جهت تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات و نتایج حاصل شده از آزمایش مشخص گردید که اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نیمه تجربی با افزایش دما و افزایش کسر حجمی بیشتر می شود. همچنین روابط موجود رفتار ضریب هدایت حرارتی را به خوبی می توانند مدل کنند.

۶- منابع

- [1] S.U.S. Choi and J.A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," in ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, CA, Nov. 12–17, 1995.
- [2] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, and J.A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," J. Heat Transfer, Vol. 121, pp. 280–288, 1999, doi: [10.1115/1.2825978](https://doi.org/10.1115/1.2825978)
- [3] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma, "Altration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles," Netsu Bussei, Vol. 4, 1993.
- [4] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 21, pp. 58–64, 2000, doi: [10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- [5] P. Keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, and J.A. Eastman, "Mechanics of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluid)," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 45, pp. 855–863, 2002, doi: [10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2)
- [6] X. Wang, X. Xu, and S.U.S. Choi, "Thermal Conductivity of Nanoparticle–Fluid Mixture," J. Thermophys. Heat Transfer, Vol. 13, No. 4, pp. 474–480, Oct. 1999, doi: [10.2514/2.6486](https://doi.org/10.2514/2.6486)
- [7] S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, and E.A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension," Appl. Phys. Lett., Vol. 79, pp. 2252–2254, 2001, doi: [10.1063/1.1408272](https://doi.org/10.1063/1.1408272)
- [8] X.F. Li, D.S. Zhu, X.J. Wang, N. Wang, J.W. Gao, and H. Li, "Thermal conductivity enhancement dependent PH and chemical surfactant

این مدل برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی/اتیلن گلیکول در محدوده های $100 \text{ nm} < d < 10 \text{ nm}$ و 60°C و $20^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$ و $0.02 < \phi < 0.1$ ارائه شده است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی ضریب هدایت گرمایی نانوسیال اکسید روی/اتیلن گلیکول پرداخته شد و پارامترهای دما، قطر ذرات و کسر حجمی لحاظ شده است. در این تحقیق برای آماده سازی نانوسیال اتیلن گلیکول/اکسید روی از روش دومرحله ای استفاده شد و به منظور آماده سازی نانوسیال به وسیله پراکنده کردن نانوذرات در سیال پایه، از دستگاه مخصوص همزن اولتراسونیک استفاده می شود. از روش سیم داغ گذرا (THW)، و به کارگیری پاراب KS1 دستگاه KD2-Pro، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بررسی می گردد. سپس با استفاده از نتایج و مقادیر تجربی به دست آمده، مدل های تجربی چندمتغیره، به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی با لحاظ کردن پارامترهای مورد بررسی در این آزمایش ارائه شد و در انتها حاشیه انحراف مدل پیشنهادی با داده های تجربی موجود مورد سنجش قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

۱. در تمام دماها با افزایش کسر حجمی افزایش در ضریب هدایت گرمایی مشاهده شد.

۲. افزایش دما در کسرهای حجمی مختلف از نانوذرات، افزایش در ضریب هدایت گرمایی را به دنبال دارد که می توان دلیل آن را سست شدن پیوندهای بین مولکولی و افزایش حرکت براونی و همچنین تداخل بیشتر نانولایه های ایجاد شده در اطراف ذرات دانست. با افزایش دما سیال قابلیت حرارتی بیشتری پیدا می کند. البته این افزایش دما تا زمانی باعث افزایش ضریب هدایت گرمایی می شود که ذرات از حالت پایدار خارج نشده و پیوندهای ایجاد شده بین ذرات و سیال از بین نروند.

۳. افزایش کسر حجمی به دلیل تراکم بیشتر ذرات معلق جامد در حجم معین باعث افزایش ضریب هدایت گرمایی می شود. زیرا این ذرات نسبت به سیال پایه ضریب هدایت گرمایی بالاتری دارند. بیشترین افزایش در ضریب هدایت گرمایی مربوط به بیشترین دما و بیشترین کسر حجمی و کمترین قطر حدود ۱۸ درصد گزارش می شود.

Experimental Techniques, Vol. 47, No. 1, pp. 83–90, 2023, doi: [10.1007/s40799-022-00567-4](https://doi.org/10.1007/s40799-022-00567-4)

[15] M. Salari, M.R. Assari, A. Ghafouri, and N. Pourmahmoud, "Empirical correlations for thermal conductivity and dynamic viscosity of MgO-EG," Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 43, art. 111, 2021, doi: [10.1007/s40430-020-02773-w](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02773-w)

[16] A. Ghafouri, M. Salari, and A. Falavand Jozaei, "Effect of variable thermal conductivity models on the combined convection heat transfer in a square enclosure filled with a water–alumina nanofluid," Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 58, No. 1, pp. 103–115, 2017, doi: [10.1134/S0021894417010126](https://doi.org/10.1134/S0021894417010126)

[17] N. Pourmahmoud, A. Ghafouri, and I. Mirzaee, "Thermal performance analysis of nanofluid thermal conductivity models in a cooling chamber," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 31, No. 1, pp. 28–38, 2017, doi: [10.2514/1.T4658](https://doi.org/10.2514/1.T4658)

[18] A. Yaghoubi and H. Pourmirzaagha, "Experimental study of heat transfer enhancement in Peugeot 206 automobile radiator using oxide nanofluids," Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 1–17, 2025. (in Persian)

[19] M.H. Esfe and S. Saedodin, "Experimental investigation and proposed correlations for temperature-dependent thermal conductivity enhancement of ethylene glycol based nanofluid containing ZnO nanoparticles," Journal of Heat and Mass Transfer Research, Vol. 1, No. 1, pp. 47–54, 2014, doi: [10.22075/JHMTR.2014.153](https://doi.org/10.22075/JHMTR.2014.153)

[20] J. Topping, Errors of Observation and Their Treatment, Springer, Dordrecht, 2012, doi: [10.1007/978-94-011-6928-8](https://doi.org/10.1007/978-94-011-6928-8)

for Cu-H₂O nanofluids," Thermochimica Acta, Vol. 469, pp. 98–103, 2008, doi: [10.1016/j.tca.2008.01.008](https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.01.008)

[9] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," J. Heat Transfer, Vol. 125, pp. 567–574, 2003, doi: [10.1115/1.1571080](https://doi.org/10.1115/1.1571080)

[10] M.H. Esfe, H. Hajmohammad, S.M. Motallebi, and D. Toghraie, "Cost and efficiency optimizations of ZnO/EG nanofluids using non-dominated sorting genetic algorithm coupled with a statistical method," Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 175–186, 2024, doi: [10.1007/s11814-023-00003-2](https://doi.org/10.1007/s11814-023-00003-2)

[11] K.M. Yashawantha and A. Venu-Vinod, "ANFIS modelling of effective thermal conductivity of ethylene glycol and water nanofluids for low temperature heat transfer application," Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 24, art. 100936, 2021, doi: [10.1016/j.tsep.2021.100936](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100936)

[12] R. Surakasi, J. Sagari, K.B. Vinjamuri, B. Sanduru, and S. Vadapalli, "Stability and Thermo-Physical Properties of Ethylene Glycol Based Nanofluids for Solar Thermal Applications," International Journal of Heat & Technology, Vol. 39, No. 1, pp. 137–144, 2021, doi: [10.18280/ijht.390114](https://doi.org/10.18280/ijht.390114)

[13] B. Rahmati-Nejad and F. Azimpour-Shishvan, "Enhancement of nanofluid stability and its estimation methods," Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 7–19, 2023, doi: [10.22034/stme.2023.162633](https://doi.org/10.22034/stme.2023.162633) (in Persian)

[14] M.M. Rashidi, M. Alhuyi Nazari, I. Mahariq, and N. Ali, "Modeling and sensitivity analysis of thermal conductivity of ethylene glycol-water based nanofluids with alumina nanoparticles,"



Design of an optimal sliding mode controller for modeling and dynamic analysis of hand motion in baseball throwing

Hamid Makarem¹ , Seyyed Arash Haghpanah^{*2}

1. M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

2. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract

Baseball is one of the most popular sports in the United States, and numerous studies have examined various aspects of its throwing mechanics, including ball release characteristics, upper-limb biomechanics, common shoulder and elbow injuries, and performance differences between left- and right-handed players. Given the high incidence of overuse injuries—particularly among pitchers—there is a growing need for advanced control strategies to optimize joint and muscle coordination during throwing. This study aims to develop an optimal control framework based on Sliding Mode Control (SMC) integrated with a detailed dynamic model of the upper limb during the baseball pitching motion. The proposed model enables precise regulation of joint angles and torques, helping maintain athletic performance while reducing musculoskeletal injury risk. The outcomes of this research have potential applications in rehabilitation systems, pitching skill training, and the development of assistive robotic technologies.

Keywords

Baseball pitching
shoulder and elbow angles
shoulder and elbow joint
torques
Sliding Mode Controller
MATLAB Simulink

Received: 19.07.2025

Revised: 15.10.2025

Accepted: 03.11.2025

*Corresponding Author

Seyyed Arash Haghpanah

Email

Haghpanah@shirazu.ac.ir

1- Introduction

Baseball is one of the most widely practiced sports in the United States, and the pitching motion has long been a major focus of biomechanical research due to its repetitive, high-load nature and its strong association with shoulder and elbow injuries[1-4]. Although previous studies have extensively examined the kinematics, kinetics, and injury mechanisms of pitching, fewer investigations have explored the use of control strategies to actively optimize joint motion and reduce musculoskeletal risks during the throw[5-7]. This study aims to develop a detailed dynamic model of the upper limb during the baseball pitching motion and to design a

robust controller based on Sliding Mode Control (SMC) for accurate tracking of joint angles and regulation of applied torques[8]. The proposed approach leverages the inherent robustness of SMC against model uncertainties and external disturbances, enabling more realistic simulation of the pitching motion and offering potential for reducing injury risk in repetitive high-speed actions. The outcomes of this research provide valuable insights for rehabilitation technologies, motor-skill training, and the development of assistive robotic systems for sports applications[9, 10].

How to Cite this Article:

[1] H. Makarem and S. A. Haghpanah, "Design of an optimal sliding mode controller for modeling and dynamic analysis of hand motion in baseball throwing," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 191–204, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535646.1150> (in Persian)



2- Research Methods

To derive the dynamic equations of the baseball pitching motion, coordinate frames were assigned to the shoulder and elbow joints, modeling the upper limb with three degrees of freedom at the shoulder (abduction–adduction, flexion–extension, and internal–external rotation) and one degree of freedom at the elbow (flexion–extension)[11-13]. Joint angle trajectories were obtained using high-speed motion capture of eight collegiate baseball players (mean height 1.86 m, mean weight 84 kg) and processed through a Direct Linear Transformation (DLT) algorithm for full 3D reconstruction[14, 15].

According to Figure 1 for the kinematic modeling of the arm, the Denavit–Hartenberg (D–H) convention was employed to describe the position and orientation of each joint-attached coordinate frame. Based on the identified D–H parameters, homogeneous transformation matrices were formulated and sequentially multiplied to compute rotation matrices and position vectors for all segments.

Anthropometric properties—including segment length, mass, density, radius of gyration, and center of mass—were determined from established regression tables using the average body parameters of the participants[16, 17]. These data were then used to construct the inertia matrices, Coriolis and centrifugal terms, and the gravitational torque vector required for assembling the full dynamic model of the upper limb[18, 19].

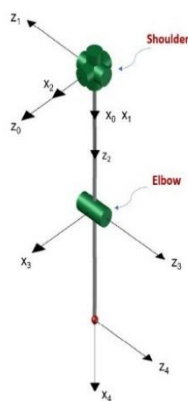


Figure 1: Coordinate system setup

3- Results

The dynamic model of the upper limb was formulated using the Lagrangian approach, with joint torques serving as control inputs for tracking the experimentally identified reference trajectories. Simulation results show that the proposed Sliding Mode Controller successfully tracks the desired joint motions with high accuracy. The overall RMS tracking error was approximately 0.67° , with peak errors ranging from 1.15° to 2.87° , which is acceptable for fast pitching motions ($T \approx 0.5$ s). The tracking error rapidly decreased during the initial 0.1–0.2 s, converging to a narrow steady-state band of $\pm 0.57^\circ$, indicating fast sliding-surface convergence and strong robustness to modeled disturbances.

The use of a saturation function instead of a sign function effectively reduced chattering while maintaining acceptable tracking precision. According to Figure 2–Figure 5, analysis of joint torques revealed higher torque demands at the shoulder compared to the elbow, consistent with the greater injury risk reported for the shoulder during high-speed throwing. A sharp initial increase in shoulder torque was also observed, corresponding to the rapid arm elevation at the onset of the pitching motion. External disturbances and model uncertainties were incorporated into the simulations to evaluate the robustness of the proposed controller. The results demonstrate that the Sliding Mode Controller effectively maintains system stability under these perturbations, keeping the tracking error within a very small range. This behavior highlights the inherent robustness of SMC against uncertainties and disturbances, confirming its suitability for controlling fast and highly dynamic pitching motions. Comparative analysis of the simulated and desired joint trajectories indicates nearly complete overlap, with only minor deviations occurring during rapid motion segments. These small errors are quickly corrected by the controller, demonstrating that the proposed Sliding Mode Controller not only guarantees theoretical stability but also achieves precise practical tracking of the pitching motion. According to Figure 6–Figure 9 the

proposed Sliding Mode Controller demonstrated high accuracy in tracking the desired joint trajectories, with RMS errors below 1° for all degrees of freedom and maximum errors not exceeding 3° , which are negligible from a biomechanical perspective. Simulated and reference trajectories nearly completely overlap, with differences barely noticeable in graphical comparisons. In addition to ensuring stability, the controller exhibited strong robustness against disturbances and model uncertainties. These results indicate that the approach is effective and reliable for high-speed precision-demanding biomechanical tasks such as baseball pitching.

4- Conclusions

This study presents the design and implementation of a robust Sliding Mode Controller (SMC) for a four-degree-of-freedom biomechanical model of the upper limb, comprising three shoulder and one elbow degree of freedom, to analyze and control the baseball pitching motion. Joint trajectories.

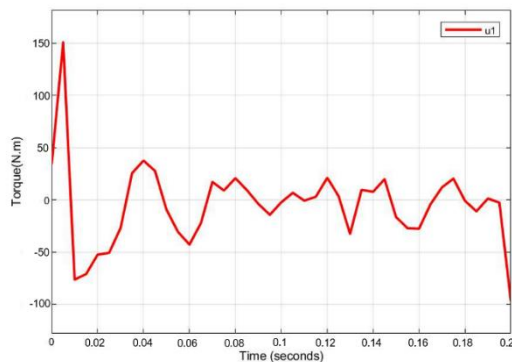


Figure 2: Shoulder abduction/adduction

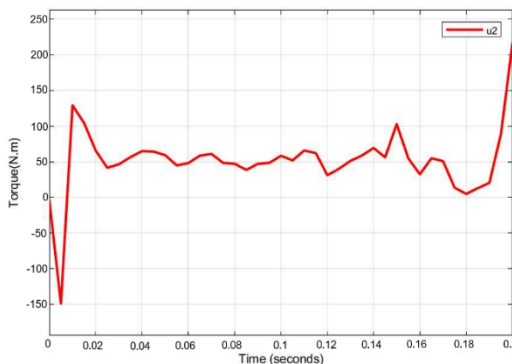


Figure 3: Shoulder flexion/extension

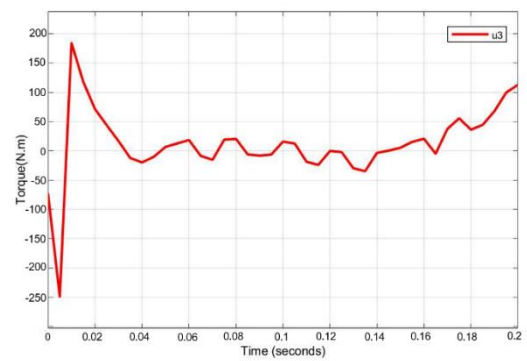


Figure 4: Shoulder rotation

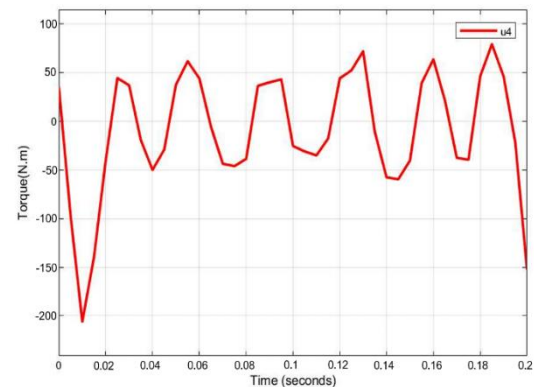


Figure 5: elbow flexion/extension

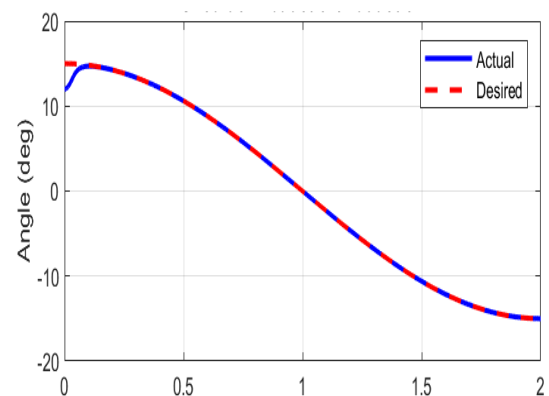


Figure 6: Shoulder abduction/adduction angle

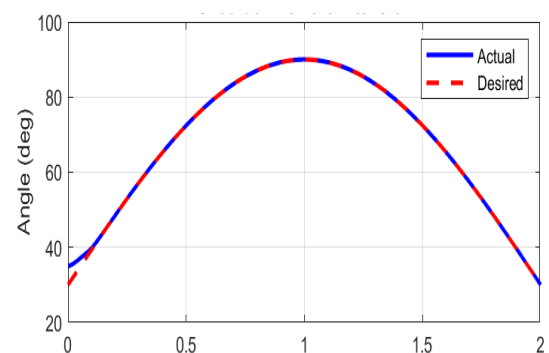


Figure 7: Shoulder flexion/extension angle

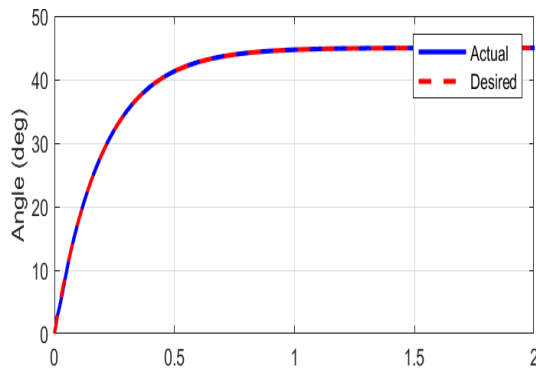


Figure 8: Shoulder rotation angle

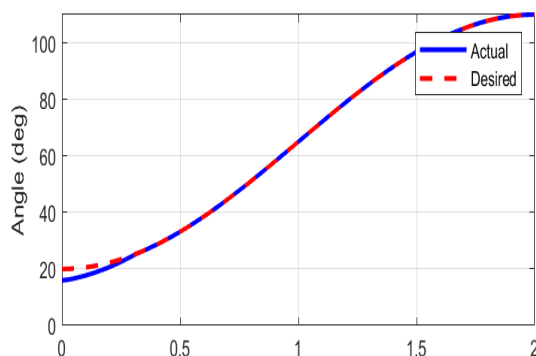


Figure 9: Elbow flexion/extension

5- References

- [1] B. Ata, "Adaptive backstepping decoupled fast terminal sliding mode control for underactuated systems under uncertainties and actuator faults," *IEEE Access*, 2025.
- [2] Y.-W. Bai and I.-H. Hsieh, "Using a wearable device to assist the training of the throwing motion of baseball players," in *Proc. 2019 IEEE Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2019, pp. 1–6.
- [3] X. Chu, W. Li, H. Pan, and Y. Kong, "Fuzzy-adaptive sliding mode control with pitch transient prescribed performance control for nacelle suspension," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025.
- [4] R. L. Crotin *et al.*, "Analysis of injuries and pitching performance between Major League Baseball and Nippon Professional Baseball: A two-team comparison between 2015 and 2019," *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, Vol. 9, No. 5, p. 23259671211008810, 2021, doi: [10.1177/23259671211008810](https://doi.org/10.1177/23259671211008810).
- [5] M. K. Dawane and G. Malwatkar, "Comparative study on implementation of PID control architecture and sliding mode control with IoT integration on inverted pendulum systems," in *Interdisciplinary Approaches to AI, Internet of Everything, and Machine Learning*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2025, pp. 49–72.
- [6] R. F. Escamilla, G. S. Fleisig, D. Groeschner, and K. Akizuki, "Biomechanical comparisons among fastball, slider, curveball, and changeup pitch types and between balls and strikes in professional baseball pitchers," *The American Journal of Sports Medicine*, Vol. 45, No. 14, pp. 3358–3367, 2017, doi: [10.1177/0363546517730052](https://doi.org/10.1177/0363546517730052).
- [7] X. Fu, H. Ai, and L. Chen, "Repetitive learning sliding mode stabilization control for a flexible-base, flexible-link and flexible-joint space robot capturing a satellite," *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 17, p. 8077, 2021, doi: [10.3390/app11178077](https://doi.org/10.3390/app11178077).
- [8] T. J. Hamer, S. Chung, and A. B. Rosen, "Comparison of biomechanical factors before and after UCL surgery in baseball athletes: A systematic review with meta-analysis," *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, Vol. 9, No. 3, p. 2325967120988736, 2021, doi: [10.1177/2325967120988736](https://doi.org/10.1177/2325967120988736).
- [9] M. Harrell *et al.*, "Increased pitch-specific velocity, spin rate, and horizontal movement lead to increased odds of undergoing ulnar collateral ligament reconstruction in professional baseball pitchers using Baseball Savant data," *Arthroscopy*, 2025.
- [10] Y. Hashimoto, T. Nagami, S. Yoshitake, and H. Nakata, "The relationship between pitching parameters and release points of different pitch types in Major League Baseball players," *Frontiers in Sports and Active Living*, Vol. 5, p. 1113069, 2023, doi: [10.3389/fspor.2023.1113069](https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1113069).
- [11] J. Lan, R. J. Patton, and X. Zhu, "Fault-tolerant wind turbine pitch control using adaptive sliding mode estimation," *Renewable Energy*, Vol. 116, pp. 219–231, 2018, doi: [10.1016/j.renene.2017.09.063](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.063).
- [12] Z. Li, L. Wang, L. Wang, X. Liu, Z. Wang, and L. Liu, "A super-twisting sliding-mode control strategy for a heaving point absorber wave energy

converter,” *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 13, No. 7, p. 1214, 2025, doi: [10.3390/jmse13071214](https://doi.org/10.3390/jmse13071214).

[13] E. Olubayode, *Bayesian Analysis of Strike Likelihood in Baseball: Evaluating the Impact of Pitch Dynamics and Batter Characteristics*, Ph.D. dissertation, Graduate College, University of Oklahoma, 2025.

[14] D. M. Scarborough, A. J. Bassett, L. W. Mayer, and E. M. Berkson, “Kinematic sequence patterns in the overhead baseball pitch,” *Sports Biomechanics*, Vol. 19, No. 5, pp. 569–586, 2020, doi: [10.1080/14763141.2018.1495574](https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1495574).

[15] D. M. Scarborough, N. K. Leonard, L. W. Mayer, L. S. Oh, and E. M. Berkson, “The association of baseball pitch delivery and kinematic sequence on stresses at the shoulder and elbow joints,” *Journal of Sports Science & Medicine*, Vol. 20, No. 1, p. 94, 2021.

[16] M. J. Solomito, E. J. Garibay, E. Golan, and C. W. Nissen, “Elbow flexion post ball release is

associated with the elbow varus deceleration moments in baseball pitching,” *Sports Biomechanics*, Vol. 20, No. 3, pp. 370–379, 2021, doi: [10.1080/14763141.2019.1605779](https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1605779).

[17] B. C. Tham and D. B. Pham, “Modeling and second-order sliding mode control for a full three-dimensional rideable ballbot,” *International Journal of Modelling and Simulation*, Vol. 45, No. 3, pp. 948–969, 2025.

[18] T. Yamaguchi, S. Suzuki, S. Suzuki, T. Nishi, T. Fukuda, and D. Nasu, “Effect of finger–ball friction on upper limb movement during fastball pitching in baseball,” *Scientific Reports*, Vol. 15, No. 1, p. 27759, 2025, doi: [10.1038/s41598-025-27759-0](https://doi.org/10.1038/s41598-025-27759-0).

[19] H. Zhang, Q. Jiang, and A. Li, “The impact of resistance-based training programs on throwing performance and throwing-related injuries in baseball players: A systematic review,” *Heliyon*, Vol. 9, No. 12, 2023, doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e22659](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22659)



طراحی کنترلر مود لغزشی بهینه برای مدل سازی و تحلیل دینامیکی حرکت دست در پرتاب بیسبال

حمید مکارم^۱ ID، سیدآرش حق پناه^{۲*} ID

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

ورزش بیسبال یکی از پرطرفدارترین ورزش‌ها در ایالات متحده آمریکا به‌شمار می‌رود و تاکنون از جنبه‌های گوناگونی از جمله نوع و مکانیزم پرتاب توپ، سرعت و زاویه پرتاب، تحلیل بیومکانیکی حرکات اندام فوقانی، آسیب‌های شایع در ناحیه شانه و آرنج و تفاوت‌های عملکردی میان بازیکنان چپ‌دست و راست‌دست مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نرخ بالای آسیب‌دیدگی‌های ناشی از حرکات تکرارشونده در این رشته ورزشی، به‌ویژه در بازیکنان پست پرتاب‌گر، نیاز به توسعه راهکارهای کنترلی برای بهینه‌سازی حرکات عضلانی و مفصلی احساس می‌شود. هدف این پژوهش طراحی یک کنترل‌کننده بهینه مبتنی بر روش کنترل مود لغزشی (SMC) به همراه مدل‌سازی دقیق دینامیکی حرکت اندام فوقانی هنگام پرتاب توپ بیسبال است. این مدل، امکان کنترل دقیق زوایا و گشتاورهای اعمال‌شده بر مفاصل را فراهم می‌سازد، به‌گونه‌ای که بتوان ضمن حفظ عملکرد ورزشی، ریسک آسیب‌های اسکلتی-عضلانی را کاهش داد. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی سامانه‌های توان‌بخشی، آموزش مهارت‌های پرتاب و ساخت ربات‌های همیار ورزشی کاربرد داشته باشد.

کلمات کلیدی

پرتاب بیسبال

زوایای شانه و آرنج

گشتاورها روی مفاصل شانه و آرنج

کنترل‌کننده مود لغزشی

سیمولینک متلب

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

*نویسنده مسئول

سیدآرش حق پناه

ایمیل

Haghpanah@shirazu.ac.ir

۱- مقدمه

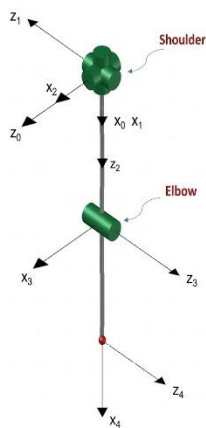
ورزش بیسبال یکی از محبوب‌ترین و پرطرفدارترین ورزش‌ها در ایالات متحده آمریکا به‌شمار می‌رود که با بهره‌گیری از ابزارهایی همچون چوب و توپ و با حضور ۹ بازیکن در هر تیم، در میدانی چمن‌دار برگزار می‌شود. تاریخچه این ورزش به قرن نوزدهم میلادی بازمی‌گردد و برخی منابع آن را برگرفته از ورزش سنتی انگلیسی کرکت می‌دانند. در دهه‌های اخیر، با پیشرفت فناوری‌های تحلیل حرکت و رشد دانش بیومکانیک، بیسبال به‌عنوان بستری غنی برای پژوهش‌های علمی در حوزه حرکت‌شناسی، تحلیل دینامیکی بدن و پیشگیری از آسیب‌های ورزشی مورد توجه قرار گرفته است [۱-۴].

پرتاب توپ یکی از حرکات کلیدی در این ورزش است که نیازمند هماهنگی دقیق میان مفاصل، عضلات و سیستم عصبی عضلانی بدن بازیکن می‌باشد. این حرکت شدیداً تکراری و سرعتی بوده و فشار زیادی را به مفاصل شانه و آرنج وارد می‌کند. مطالعات متعددی به بررسی عوامل مؤثر در افزایش عملکرد پرتاب و کاهش آسیب‌دیدگی اختصاص یافته‌اند [۵-۷]. به‌عنوان مثال، پژوهش‌هایی به رابطه میان حداکثر سرعت توپ و آسیب‌دیدگی مفصل آرنج پرداخته‌اند، برخی دیگر همبستگی میان گشتاورهای تولیدی و بروز صدمات مفصلی را بررسی کرده‌اند و نیز مطالعاتی درباره تفاوت پرتاب در بازیکنان چپ‌دست و راست‌دست یا ارتباط زمان‌بندی عضلات و سینماتیک شانه

How to Cite this Article:

[1] H. Makarem and S. A. Haghpanah, "Design of an optimal sliding mode controller for modeling and dynamic analysis of hand motion in baseball throwing," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 191-204, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535646.1150> (in Persian)





شکل ۱: قرار دادن دستگاه‌های مختصات روی مفصل‌های شانه و آرنج

در مرحله بعد، به منظور توصیف موقعیت و جهت‌گیری دستگاه‌های مختصات متصل به هر مفصل در مدل سینماتیکی بازو، از روش دناویت-هارتنبرگ^۴ استفاده می‌شود. این روش یک ابزار استاندارد در تحلیل سینماتیکی سازه‌های زنجیره‌ای مانند بازوهای رباتیکی و اندام‌های بیومکانیکی است که با تعریف چهار پارامتر اصلی، امکان محاسبه ماتریس‌های تبدیل همگن بین دو دستگاه مختصات متوالی را فراهم می‌سازد. بر این اساس، با تعیین پارامترهای DH شامل زاویه پیچش، فاصله اتصال، فاصله پیشروی و زاویه چرخش برای هر لینک، ماتریس تبدیل طبق روابط استاندارد زیر به دست می‌آیند. جدول ۱ پارامترهای دناویت هارتنبرگ را نشان می‌دهد.

جدول ۱: دناویت هارتنبرگ

فازها	θ	d	α	a
0-1	θ_1	0	$\frac{\pi}{2}$	0
1-2	$\theta_2 + \frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$	0
2-3	θ_3	ℓ_1	$\frac{\pi}{2}$	0
3-4	$\theta_4 + \frac{\pi}{2}$	0	0	ℓ_2

$$T(d, \theta, \alpha, a) = \begin{pmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

و آرنج با سرعت پرتاب صورت گرفته است [۸ و ۹]. با این حال، اکثر تحقیقات پیشین بیشتر به تحلیل پسینی حرکات ورزشی و آسیب‌ها پرداخته‌اند و کمتر به طراحی سامانه‌های کنترلی به منظور هدایت، بهینه‌سازی و پیشگیری از آسیب‌دیدگی در حین انجام حرکت تمرکز داشته‌اند. در چنین بستری، توسعه مدل‌های دقیق دینامیکی و طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم می‌تواند نقش مؤثری در بهبود ایمنی و عملکرد ورزشکاران ایفا کند [۱۰-۱۲].

هدف اصلی این پژوهش، مدل‌سازی دقیق حرکت پرتاب توپ در ورزش بیسبال و طراحی یک کنترل‌کننده مقاوم مبتنی بر روش کنترل مود لغزشی (Sliding Mode Control - SMC) به منظور ردیابی دقیق زوایای مفصلی و کنترل گشتاورهای وارد بر اندام فوقانی بازیکن است. استفاده از این روش کنترلی، با توجه به مقاومت بالای آن در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مدل، می‌تواند شبیه‌سازی حرکت واقعی را بهتر نشان دهد و نتایج حاصل از آن به کاهش احتمال آسیب‌دیدگی در طی حرکات تکراری کمک کند و همچنین در کاربردهایی چون توان‌بخشی، آموزش مهارت‌های حرکتی و توسعه ربات‌های همیار ورزشی مؤثر واقع شود.

در ادامه این مقاله، ابتدا مدل حرکتی و دینامیکی پرتاب معرفی می‌شود. سپس طراحی کنترل‌کننده SMC ارائه و پیاده‌سازی می‌گردد. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته مورد بحث قرار گرفته و نتیجه‌گیری کلی ارائه خواهد شد.

۲- روش کار

معادلات دینامیکی: برای به دست آوردن معادلات دینامیکی در حرکت پرتاب توپ بیسبال، ابتدا دستگاه‌های مختصات، روی مفاصل شانه و آرنج قرار داده می‌شود که این درجات آزادی عبارت‌اند از دور کردن - نزدیک کردن^۱، خمش - کشش^۲، چرخش^۳ مفصل شانه و ۱ درجه آزادی خمش - کشش مفصل آرنج، شکل ۱ مدل ارائه شده به همراه دستگاه‌های مختصات مفاصل را نشان می‌دهد.

زاویه‌های دلخواه مفصل‌های شانه و آرنج با فیلم‌برداری پرتاب توپ تند توسط هشت نفر از بازیکنان بیسبال دانشگاهی (با میانگین قد ۱۸۶ سانتی‌متر و میانگین وزن ۸۴ کیلوگرم) با استفاده از روش تبدیل خطی مستقیم (DLT) در حرکت سه‌بعدی محاسبه شد.

³ Rotation

⁴ Denavit-Hartenberg

¹ Abduction-Adduction

² Flexion-Extension

۳- طراحی کنترلر

۳-۱- تعریف خطا و سطح لغزش

برای ردیابی یک مسیر مرجع، خطای تعقیب به صورت زیر تعریف می شود:

$$d\dot{q} - \dot{q} = \dot{e} \text{ و } dq - q = e \quad (۱۲)$$

سطح لغزشی به فرم کلاسیک انتخاب می شود:

$$s = e' + \Lambda e \quad (۱۳)$$

که در آن $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$ یک ماتریس قطری با ضرایب مثبت است. هدف، واداشتن سیستم به حرکت روی سطح $s=0$ است که تضمین می کند خطاها نمایی به صفر میل کنند.

با جایگذاری معادله دینامیکی:

$$q'' = M^{-1}(q)(\tau - C(q, \dot{q})\dot{q}' - G(q) + d(t)) \quad (۱۴)$$

۳-۲- مشتق سطح لغزشی

با مشتق گیری از رابطه قبل داریم:

$$s' = e'' + \Lambda e' = q'' - q''d + \Lambda(q' - q'd) \quad (۱۵)$$

در نتیجه:

$$s' = M^{-1}(q)(\tau - C(q, \dot{q})\dot{q}' - G(q) + d(t)) - q''d + \Lambda e \quad (۱۶)$$

۳-۳- کنترلر معادل (Equivalent Control)

اگر نامعینی و اغتشاش در نظر گرفته نشود و شرط $\dot{s} = 0$ اعمال گردد، گشتاور معادل به صورت زیر به دست می آید:

$$\tau_{eq} = M(q)(q''d - \Lambda e') + C(q, \dot{q})\dot{q}' + G(q) \quad (۱۷)$$

این ترم تضمین می کند که در غیاب اغتشاش، مسیر مطلوب دقیقاً دنبال شود.

۳-۴- تحلیل پایداری

تابع لیاپانوف پیشنهادی به صورت زیر می باشد:

$$V = \frac{1}{2} s^T M(q) s \quad (۱۸)$$

مشتق زمانی از رابطه فوق داریم:

حال، ماتریس های تبدیل بین فریم صفر و سایر فریم ها با ضرب کردن ماتریس های تبدیل به صورت متوالی به دست آورده می آید. با داشتن ماتریس های تبدیل بین فریم صفر و هر فریم دلخواه، می توان ماتریس چرخش و بردار جابجایی (P) بین فریم صفر و هر فریم دلخواه را به دست آورد [۱۳].

$$R = \text{Transformation matrix}(1:3, 1:3) \quad (۲)$$

$$P = \text{Transformation matrix}(1:3, 4) \quad (۳)$$

سپس ماتریس های ژاکوبین به دست می آیند که فرمول محاسبه ماتریس های ژاکوبین به شرح زیر است.

$$Jp(Li) = [Jp1(Li) \dots Jpi(Li) \dots 0 \dots 0] \quad (۴)$$

$$Jo(Li) = [Jo1(Li) \dots Joi(Li) \dots 0 \dots 0] \quad (۵)$$

$$Jpj(Li) = zj - 1 * (PLi - Pj - 1) \quad (۶)$$

$$Joj(Li) = zj - 1 \quad (۷)$$

با داشتن قد متوسط و وزن کل متوسط بدن $H=1.86$ متر، $M=84$ کیلوگرم از بین هشت فرد دانشگاهی و با استفاده از جدول داده های آنترپومتریکی، طول، جرم، شعاع ژیراسیون، چگالی و پارامترهای مرکز جرم برای دو بخش (۱. بازوی بالایی، ۲. ساعد و دست) به دست می آیند [۱۴-۱۶].

سپس ماتریس های اینرسی و کوریولیس و بردار گرانش محاسبه می گردد [۱۷-۱۹]:

$$B(q) = \sum_{i=1}^n (m_{li} J_p^{liT} J_p^{li} + J_o^{liT} R_i I_i^T R_i J_o^{li}) \quad (۸)$$

$$c_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \frac{\partial b_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial b_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial b_{jk}}{\partial q_i} \right) \dot{q}_k \quad (۹)$$

$$g(q) = - \sum_{j=1}^n (m_{lj} g^T J_{pj}^{lj}(q)) \quad (۱۰)$$

در نهایت معادله دینامیکی سیستم به صورت زیر نوشته می شود:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u \quad (۱۱)$$

۴- بحث

مدل دینامیک دست به روش لاگرانژ استخراج گردید. در این مدل ورودی‌ها گشتاورهای هر مفصل است که به کمک طراحی کنترلر مسیر مطلوب به دست آمده از آزمایش دنبال گردید. شکل‌های ۵ تا ۸ گشتاور اعمالی به هر مفصل را که کنترلر به دست آورده است نشان می‌دهد. شبیه‌سازی ردیابی مفاصل در شکل ۹ تا شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترلر مود لغزشی طراحی شده قادر است مسیر مطلوب مفاصل را با دقت بالایی دنبال کند. مقدار RMS خطای کلی حدود ۰/۶۷ درجه بود و بیشینه خطاها در بازه ۱/۱۵ تا ۲/۸۷ درجه قرار داشت که برای حرکات سریع پرتابی (T≈0.5 s) قابل قبول و عملی است. مشاهده می‌شود که خطاها در ابتدای حرکت (تقریباً ۰/۱ تا ۰/۲ ثانیه) به سرعت کاهش یافته و سیستم وارد ناحیه خطای کوچک (۵۷±درجه) می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده همگرایی سریع سطح لغزشی و مقاومت مناسب نسبت به اختلالات مدل شده است. استفاده از تابع اشباع به جای sign نیز چترینگ^۱ را کاهش داده درحالی‌که دقت ردیابی را در حد قابل قبول حفظ کرده است. مقایسه گشتاور مفاصل نشان می‌دهد که گشتاورهای اعمالی به مفصل شانه نسبت به آرنج بزرگ‌تر است و ریسک آسیب به مفصل شانه در این ورزش نیز بیشتر است. در ابتدای حرکت نیز مقدار این گشتاور نسبت به طول مسیر یک جهش داشته است که ناشی از بالا آوردن دست برای شروع حرکت است.

۵- تحلیل نتایج و نمودارها:

۵-۱- بررسی تعقیب و ردیابی مسیر

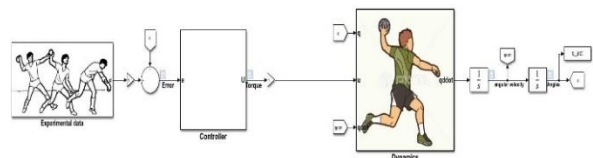
در شبیه‌سازی انجام شده، مسیر مطلوب برای چهار درجه آزادی بازو (سه درجه مفصل شانه و یک درجه مفصل آرنج) به عنوان ورودی مرجع تعریف شد. نتایج به وضوح نشان می‌دهند که پاسخ سیستم تحت کنترلر مود لغزشی تقریباً منطبق با مسیر مرجع است. در نمودارهای مقایسه‌ای (زاویه مرجع و زاویه شبیه‌سازی)، انطباق بین دو منحنی بسیار نزدیک است و اختلاف تنها در مقیاس بسیار کوچک مشاهده می‌شود. این همگرایی سریع بیانگر توانایی کنترلر در جبران اغتشاشات مدل و نامعینی‌های موجود در دینامیک بازو است.

$$\dot{V} = sT(\tau - \tau_{eq} + d(t)) \quad (19)$$

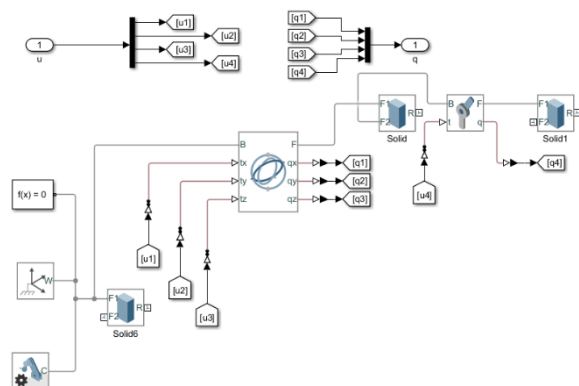
با جایگذاری قانون کنترل و فرض $d(t) \leq d$:

$$\dot{V} \leq -sTKsat(\phi s) + \|s\| d \quad (20)$$

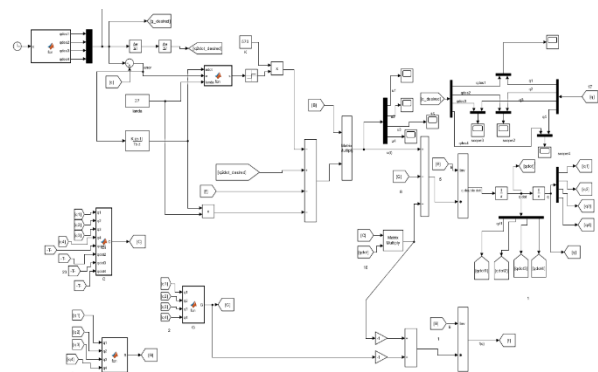
اگر ضرایب K به گونه‌ای انتخاب شوند که $K > \bar{d} + \eta$ (با $\eta > 0$) آنگاه $\dot{V} < 0$ و پایداری سیستم و همگرایی سطح لغزشی تضمین می‌شود. در نتیجه خطاها به ناحیه‌ای کوچک اطراف صفر همگرا خواهند شد. شکل ۲ تا شکل ۴ مدل دینامیکی به همراه کنترل طراحی شده را در نرم افزار متلب نشان می‌دهد.



شکل ۲: ترکیب مدل دینامیکی و کنترل در matlab simulink



شکل ۳: مدل دینامیکی سیستم در matlab simscape multibody



شکل ۴: طراحی کنترل کننده مود لغزشی در matlab simulink

¹ Chattering

۲-۵- بررسی خطاها

برای تحلیل کمی، خطاهای تعقیب زاویه در هر چهار مفصل محاسبه شدند. جدول ۲ مقادیر خطای RMS و بیشینه خطا را نشان می دهد.

جدول ۲: مقادیر خطای RMS و بیشینه خطا برای مفاصل

مفصل	خطای RMS	بیشینه خطا
شانه - درجه آزادی ۱	1/00°	2/86°
شانه - درجه آزادی ۲	0/32°	1/15°
شانه - درجه آزادی ۳	0/49°	1/72°
آرنج	0/66°	2/29°
میانگین کل	0/67°	—

این مقادیر نشان می دهند که خطا در سطحی بسیار پایین کنترل شده و سیستم قادر است با دقت بالا مسیر مطلوب را دنبال کند.

۳-۵- بررسی سطح لغزشی

نمودارهای مربوط به سطح لغزشی S نشان می دهند که پس از گذشت مدت زمان کوتاهی، سطح لغزشی به صفر همگرا می شود و در ناحیه مرزی تعیین شده توسط پارامتر ϕ باقی می ماند. این امر به طور مستقیم صحت تحلیل پایداری مبتنی بر لیاپانوف و عملکرد مقاوم کنترلر را تأیید می کند.

۴-۵- اثر اغتشاش و نامعینی

در طی شبیه سازی، وجود اغتشاشات خارجی و نامعینی های مدل در نظر گرفته شد. نمودارها نشان می دهند که در حضور این اغتشاشات، کنترلر توانسته است پاسخ سیستم را پایدار نگه دارد و خطا را در محدوده بسیار کوچک حفظ کند. این ویژگی همان خاصیت اصلی کنترلر مود لغزشی یعنی مقاوم بودن در برابر نامعینی ها را به خوبی نشان می دهد.

$$\Delta(q, \dot{q}, t) + d(t) + \tau = G(q) + \dot{q}C(q, \dot{q}) + \ddot{q}M(q) \quad (21)$$

۵-۵- مقایسه مسیر مطلوب و شبیه سازی

با توجه به نمودارهای مقایسه ای، می توان گفت که مسیرهای شبیه سازی شده تقریباً همپوشانی کامل با مسیرهای مطلوب دارند. تنها در برخی لحظات تغییرات سریع، مقدار اندکی اختلاف مشاهده می شود که به سرعت توسط کنترلر جبران می گردد؛ بنابراین، می توان نتیجه گرفت که کنترلر طراحی شده نه تنها از نظر تئوری پایدار است، بلکه در عمل نیز توانسته است ردیابی دقیقی فراهم کند.

۶-۵- جمع بندی نتایج

شکل ۱۳ خطای ردیابی مفاصل را نشان می دهد. مقادیر خطای RMS در تمامی درجات آزادی کمتر از ۱° بوده است که از نظر بیومکانیکی قابل چشم پوشی است.

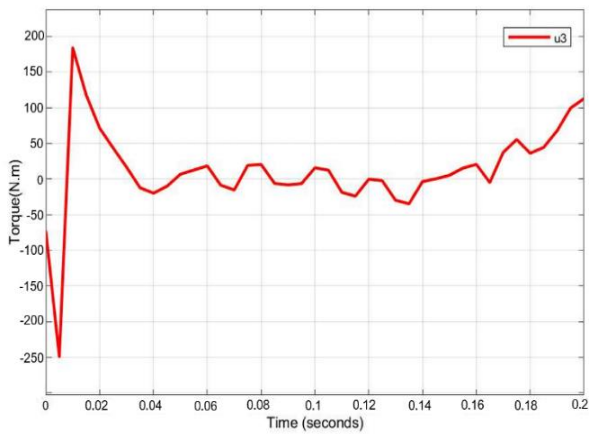
حداکثر خطا نیز در هیچ یک از مفاصل از ۳° تجاوز نکرده است که دقت بالای کنترلر را نشان می دهد. مسیر مطلوب و مسیر شبیه سازی شده تقریباً همپوشانی کامل دارند و اختلاف بین آن ها در مقیاس نمودار به سختی قابل مشاهده است.

کنترلر مود لغزشی علاوه بر تضمین پایداری، قابلیت بالایی در مقابله با اغتشاش و عدم قطعیت مدل نشان داده است.

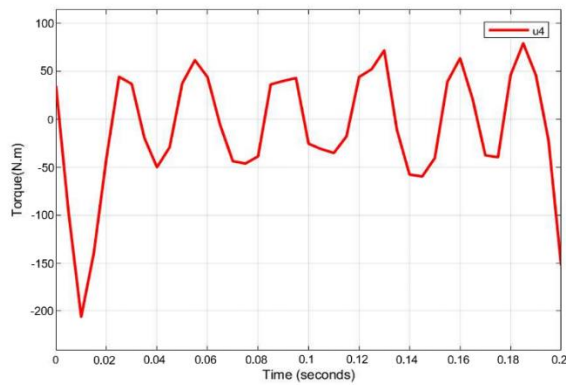
نتایج نشان می دهند که این رویکرد برای کاربردهای بیومکانیکی مانند پرتاب بیسبال که نیازمند سرعت بالا و دقت زیاد هستند، مناسب و کارآمد است.

۶- نتیجه گیری

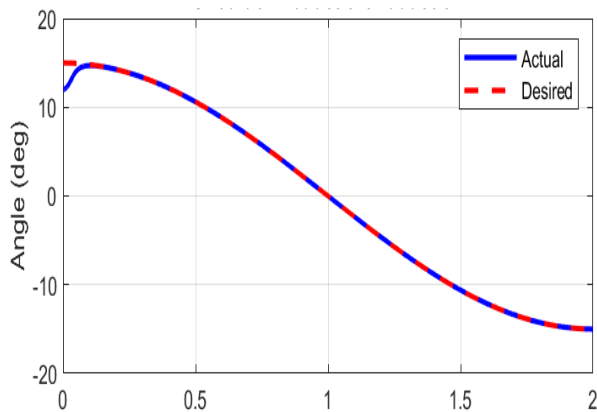
در این پژوهش یک کنترلر مود لغزشی برای بازوی بیومکانیکی با چهار درجه آزادی شامل سه درجه در شانه و یک درجه در آرنج طراحی و پیاده سازی شد. نتایج شبیه سازی نشان دادند که کنترلر پیشنهادی قادر است با دقت بالا مسیر مطلوب را ردیابی کرده و خطای RMS را در سطحی کمتر از ۱° حفظ نماید. همگرایی سریع سطح لغزشی و مقاومت سیستم در برابر اغتشاشات و نامعینی های دینامیکی، بیانگر کارایی بالای این رویکرد در مسائل بیومکانیکی است. از دیدگاه آسیب شناسی ورزشی، این نتایج اهمیت ویژه ای دارند. پرتاب بیسبال از جمله حرکات پیچیده و پرشتاب است که فشار مکانیکی بالایی به مفصل شانه و آرنج وارد می کند. انحراف اندک در مسیر حرکتی می تواند منجر به بارهای غیرمعتاد و افزایش ریسک آسیب هایی نظیر پارگی کپسول شانه، آسیب به لیگامان های آرنج و سندروم های overuse شود. کنترل دقیق مسیر و سرعت مفاصل با استفاده از مدل سازی و الگوریتم های مقاوم مانند مود لغزشی می تواند به شناسایی الگوهای حرکتی پرخطر کمک کرده و مبنایی برای طراحی پروتکل های پیشگیرانه در تمرینات و بازتوانی فراهم آورد؛ بنابراین، ارتباط مستقیم بین یافته های کنترلی این پژوهش و حوزه آسیب شناسی ورزشی قابل مشاهده است: هر چه خطا و نوسانات حرکتی کمتر باشد، احتمال بروز نیروهای غیرطبیعی در مفاصل نیز کاهش یافته و از آسیب های ناشی از پرتاب های مکرر جلوگیری خواهد شد. بدین ترتیب، کنترلرهای مقاوم نه تنها در رباتیک و بیومکانیک کاربرد دارند، بلکه می توانند به عنوان



شکل ۷: گشتاور کنترلی روی شانه (روتیشن)

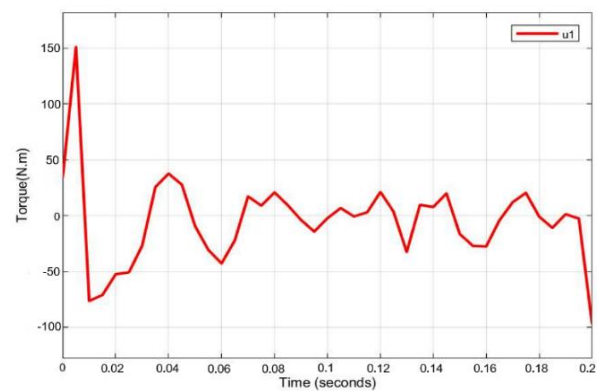


شکل ۸: گشتاور کنترلی روی آرنج (فلشکن - اکستنشن)

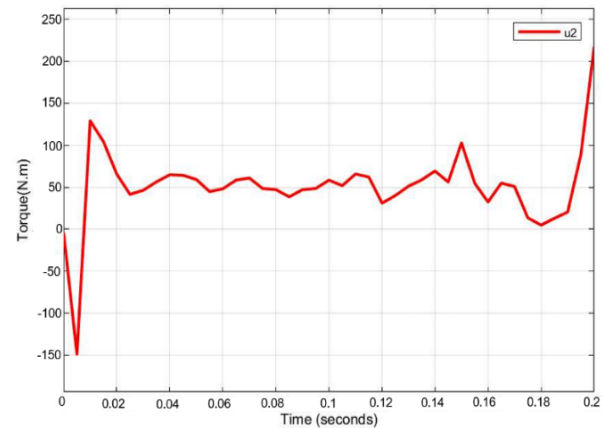


شکل ۹: زاویه ابداکشن - ادداکشن شانه

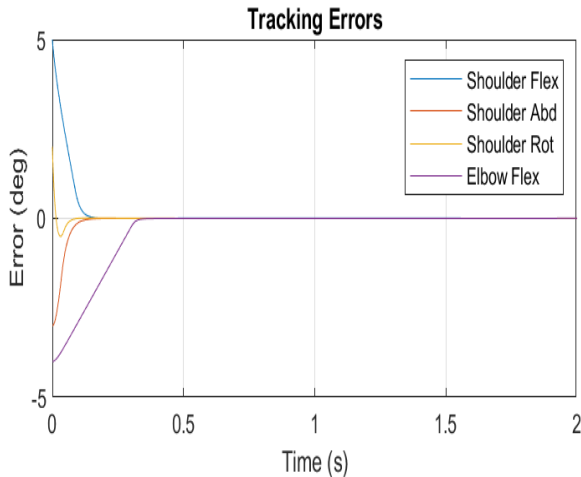
ابزار تحلیلی و پیشگیرانه در مطالعات پزشکی ورزشی نیز به کار گرفته شوند. به طور کلی، می توان نتیجه گرفت که طراحی کنترلرهای مقاوم نه تنها برای کاربردهای مهندسی و رباتیک مفید است، بلکه می تواند در حوزه های ورزشی و پزشکی نیز ارزشمند باشد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که استفاده از مدل های دقیق دینامیکی همراه با کنترلرهای مقاوم، راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد حرکات پرشتاب ورزشی و کاهش آسیب های ناشی از بارهای مکانیکی نامتقارن است. در نتیجه، ترکیب بینش مهندسی کنترل با آسیب شناسی ورزشی می تواند چشم اندازی نوین برای توسعه سیستم های توان بخشی هوشمند و طراحی برنامه های تمرینی ایمن و کارآمد ایجاد کند.



شکل ۵: گشتاور کنترلی روی شانه (ابداکشن - ادداکشن)



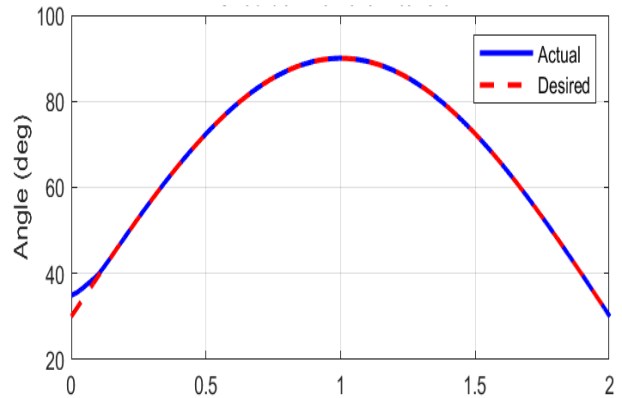
شکل ۶: گشتاور کنترلی روی شانه (فلشکن - اکستنشن)



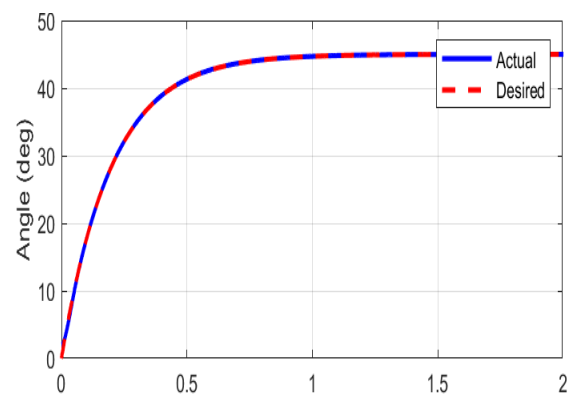
شکل ۱۳: خطاهای ردیابی

۷- منابع

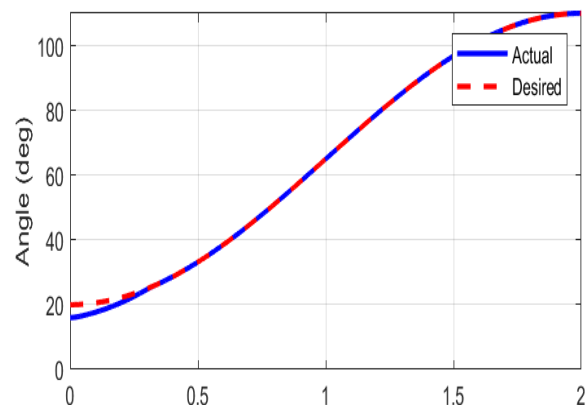
- [1] B. Ata, "Adaptive backstepping decoupled fast terminal sliding mode control for underactuated systems under uncertainties and actuator faults," *IEEE Access*, 2025.
- [2] Y.-W. Bai and I.-H. Hsieh, "Using a wearable device to assist the training of the throwing motion of baseball players," in *Proc. 2019 IEEE Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2019, pp. 1–6.
- [3] X. Chu, W. Li, H. Pan, and Y. Kong, "Fuzzy-adaptive sliding mode control with pitch transient prescribed performance control for nacelle suspension," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025.
- [4] R. L. Crotin *et al.*, "Analysis of injuries and pitching performance between Major League Baseball and Nippon Professional Baseball: A two-team comparison between 2015 and 2019," *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, Vol. 9, No. 5, p. 23259671211008810, 2021, doi: [10.1177/23259671211008810](https://doi.org/10.1177/23259671211008810).
- [5] M. K. Dawane and G. Malwatkar, "Comparative study on implementation of PID control architecture and sliding mode control with IoT integration on inverted pendulum systems," in *Interdisciplinary Approaches to AI, Internet of Everything, and Machine Learning*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2025, pp. 49–72.



شکل ۱۰: زاویه فلکشن - اکستنشن شانه



شکل ۱۱: زاویه روتیشن شانه



شکل ۱۲: زاویه فلکشن - اکستنشن آرنج

- [13] E. Olubayode, *Bayesian Analysis of Strike Likelihood in Baseball: Evaluating the Impact of Pitch Dynamics and Batter Characteristics*, Ph.D. dissertation, Graduate College, University of Oklahoma, 2025.
- [14] D. M. Scarborough, A. J. Bassett, L. W. Mayer, and E. M. Berkson, "Kinematic sequence patterns in the overhead baseball pitch," *Sports Biomechanics*, Vol. 19, No. 5, pp. 569–586, 2020, doi: [10.1080/14763141.2018.1495574](https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1495574).
- [15] D. M. Scarborough, N. K. Leonard, L. W. Mayer, L. S. Oh, and E. M. Berkson, "The association of baseball pitch delivery and kinematic sequence on stresses at the shoulder and elbow joints," *Journal of Sports Science & Medicine*, Vol. 20, No. 1, p. 94, 2021.
- [16] M. J. Solomito, E. J. Garibay, E. Golan, and C. W. Nissen, "Elbow flexion post ball release is associated with the elbow varus deceleration moments in baseball pitching," *Sports Biomechanics*, Vol. 20, No. 3, pp. 370–379, 2021, doi: [10.1080/14763141.2019.1605779](https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1605779).
- [17] B. C. Tham and D. B. Pham, "Modeling and second-order sliding mode control for a full three-dimensional rideable ballbot," *International Journal of Modelling and Simulation*, Vol. 45, No. 3, pp. 948–969, 2025.
- [18] T. Yamaguchi, S. Suzuki, S. Suzuki, T. Nishi, T. Fukuda, and D. Nasu, "Effect of finger–ball friction on upper limb movement during fastball pitching in baseball," *Scientific Reports*, Vol. 15, No. 1, p. 27759, 2025, doi: [10.1038/s41598-025-27759-0](https://doi.org/10.1038/s41598-025-27759-0).
- [19] H. Zhang, Q. Jiang, and A. Li, "The impact of resistance-based training programs on throwing performance and throwing-related injuries in baseball players: A systematic review," *Heliyon*, Vol. 9, No. 12, 2023, doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e22659](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22659).
- [6] R. F. Escamilla, G. S. Fleisig, D. Groeschner, and K. Akizuki, "Biomechanical comparisons among fastball, slider, curveball, and changeup pitch types and between balls and strikes in professional baseball pitchers," *The American Journal of Sports Medicine*, Vol. 45, No. 14, pp. 3358–3367, 2017, doi: [10.1177/0363546517730052](https://doi.org/10.1177/0363546517730052).
- [7] X. Fu, H. Ai, and L. Chen, "Repetitive learning sliding mode stabilization control for a flexible-base, flexible-link and flexible-joint space robot capturing a satellite," *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 17, p. 8077, 2021, doi: [10.3390/app11178077](https://doi.org/10.3390/app11178077).
- [8] T. J. Hamer, S. Chung, and A. B. Rosen, "Comparison of biomechanical factors before and after UCL surgery in baseball athletes: A systematic review with meta-analysis," *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, Vol. 9, No. 3, p. 2325967120988736, 2021, doi: [10.1177/2325967120988736](https://doi.org/10.1177/2325967120988736).
- [9] M. Harrell *et al.*, "Increased pitch-specific velocity, spin rate, and horizontal movement lead to increased odds of undergoing ulnar collateral ligament reconstruction in professional baseball pitchers using Baseball Savant data," *Arthroscopy*, 2025.
- [10] Y. Hashimoto, T. Nagami, S. Yoshitake, and H. Nakata, "The relationship between pitching parameters and release points of different pitch types in Major League Baseball players," *Frontiers in Sports and Active Living*, Vol. 5, p. 1113069, 2023, doi: [10.3389/fspor.2023.1113069](https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1113069).
- [11] J. Lan, R. J. Patton, and X. Zhu, "Fault-tolerant wind turbine pitch control using adaptive sliding mode estimation," *Renewable Energy*, Vol. 116, pp. 219–231, 2018, doi: [10.1016/j.renene.2017.09.063](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.063).
- [12] Z. Li, L. Wang, L. Wang, X. Liu, Z. Wang, and L. Liu, "A super-twisting sliding-mode control strategy for a heaving point absorber wave energy converter," *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 13, No. 7, p. 1214, 2025, doi: [10.3390/jmse13071214](https://doi.org/10.3390/jmse13071214).



Buckling and Post-Buckling Analysis of Composite Pipe Reinforced with Shape Memory Alloy under Internal Pressure

Alireza Pourmoayed^{*1} , Mohammadali Ranjbar² , Seyyed Morteza Seyednejad³

1. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Khatamul-Anbiya Air Defense University, Tehran, Iran

1. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Khatamul-Anbiya Air Defense University, Tehran, Iran

1. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

This study investigates the buckling and post-buckling behavior of composite pipes under internal pressure, with a focus on the effect of embedding NiTi wires with shape memory alloy (SMA) effect on improving mechanical capacity and controlling post-buckling. The pipes were made of carbon/epoxy composite (T300/5208) and fabricated using a filament winding process with a [-55/55] layup. Shape memory wires under 5% prestrain were embedded in multiple layers to provide compressive force against residual tensile stresses caused by curing and to enhance the mechanical performance of the tubes. Three models were analyzed using Abaqus software: a pipe without SMA and internal pressure, a pressurized pipe without SMA, and a pressurized SMA-reinforced pipe. Buckling analysis using a linear perturbation solver and examining the first five buckling modes was performed; then, post-buckling analysis using a general nonlinear static solver and applying initial deflection according to mode I was performed. The results showed that the presence of the memory wire increased the critical buckling force by less than 1% and increased the internal pressure capacity of the pipes by 20%, without negatively changing the post-buckling behavior under internal pressure. These findings indicate that the use of shape memory alloys can be an effective and practical solution for improving the mechanical performance and increasing the pressure capacity of composite pipes, especially in industrial applications and advanced structures.

Keywords

Composite pipes
Buckling behavior
Post-buckling behavior
Shape memory alloy (SMA)
Internal pressure

Received: 01.09.2025

Revised: 16.10.2025

Accepted: 03.11.2025

*Corresponding Author

Alireza Pourmoayed

Email

A.Pourmoayed@khadu.ac.ir

1- Introduction

The increasing demand for carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) materials in aerospace, automotive, and oil and gas industries highlights the necessity of reliable and cost-effective design and simulation approaches. In the design of composite pressure vessels and pipes, achieving minimal thickness while maintaining maximum internal pressure capacity remains a key challenge, as weight reduction directly influences production, transportation, and installation efficiency.

Numerous analytical and numerical studies have investigated the buckling and post-buckling behavior of multilayer composite cylinders under complex loading conditions, including internal and external pressure, axial forces, and thermal effects. Previous research has shown that fiber orientation, laminate sequence, and manufacturing imperfections significantly affect buckling resistance and post-buckling stability. However, traditional composite structures often suffer from

How to Cite this Article:

[1] A. Pourmoayed, M. Ranjbar, and S. M. Seyednejad, "Buckling and post-buckling analysis of composite pipe reinforced with shape memory alloy under internal pressure," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 205–218, 2026.

[Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.544309.1165> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

residual tensile stresses generated during curing, which can compromise their load-bearing capacity.

Embedding pre-strained shape memory alloy (SMA) wires into composite laminates offers a promising method to actively counteract these residual stresses and improve mechanical performance. The present study numerically investigates the influence of NiTi SMA reinforcement on the buckling and post-buckling behavior of composite pipes under internal pressure using Abaqus finite element simulations. The results provide insight into the potential of SMA integration for enhancing structural stability and pressure-bearing capacity in advanced composite applications.

2- Modeling and Solution Method

In this section, the governing theory describing the mechanical behavior of composite pipes and shape memory alloys (SMAs) is first presented. Subsequently, the numerical modeling approach developed to analyze the behavior of SMA-reinforced composite pipes is described in detail.

2.1 Mechanical Properties of T300/5208

To analyze the mechanical response of thick-walled composite pipes under internal pressure, the analytical method proposed by Bohafas [1] was employed. In this approach, the radial and hoop stresses in each layer are determined by satisfying the interlaminar boundary conditions between adjacent layers. The mechanical properties of the T300/5208 carbon/epoxy composite used in the present study are summarized in Table 1.

Table 1: Mechanical Properties of T300/5208[1]

Elastic modulus (GPa)				Poisson's ratio			Strength (MPa)	
E1	E2	E3	G12	ν_{12}	ν_{13}	ν_{32}	Y	Y''
181	10.3	10.3	7.17	0.28	0.28	0.59	40	246

2.2 Behavior of Shape Memory Alloys

Shape memory alloys (SMAs), in addition to conventional mechanical and thermal properties such as Young's modulus, Poisson's ratio,

coefficient of thermal expansion, and specific heat capacity, exhibit unique characteristics associated with the martensite and austenite phases. The thermomechanical properties of NiTi are summarized in Table 2.

A finite element model of the composite pipes and shape memory alloy (SMA) wires was developed in Abaqus. The main steps are as follows:

Geometry and material definition: The pipes were created, and the T300/5208 properties were assigned according to Table 1. SMA wires were modeled using a user-defined UMAT subroutine [3], based on the NiTi properties listed in Table 2.

Table 2: Mechanical and thermomechanical properties of NiTiNOL [2]

Parameter	Denoted by	Magnitude
Elastic Stiffness of the martensite	E_m	19.14 GPa
Elastic Stiffness of the Austenite	E_A	37.43 GPa
Poisson's ratio (equal for both phases)	ν_f	0.33
Coefficient of thermal expansion for the martensite	C_m	$29 \text{ MPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
Coefficient of thermal expansion for the austenite	C_A	$21.74 \text{ MPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
Martensitic finish temperature	M_f	$18 \text{ } ^\circ\text{C}$
Martensitic start temperature	M_s	$33 \text{ } ^\circ\text{C}$
Austenitic start temperature	A_s	$45 \text{ } ^\circ\text{C}$
Austenitic finish temperature	A_f	$75 \text{ } ^\circ\text{C}$

SMA placement: The wires were embedded helically within the composite layers with a diameter of 60 mm and a pitch of 5 mm. A pre-strain of 5% was applied to the wires, and the components were assumed to be stress-free at the furnace temperature.

A linear perturbation solver was employed to perform the buckling analysis and determine the critical loads for the first five modes. Boundary

conditions were applied with one end fully fixed and the opposite end constrained only in the axial direction. Figure 1 illustrates the displacement contour perpendicular to the pipe axis under Mode I buckling. In this figure, the pressurized pipe, subjected to an initial imperfection based on the first buckling mode and axial loading, exhibits post-buckling behavior. The pipe under internal pressure was analyzed with simple support conditions (one end fully fixed, the other end free in the axial direction) while subjected to axial load.

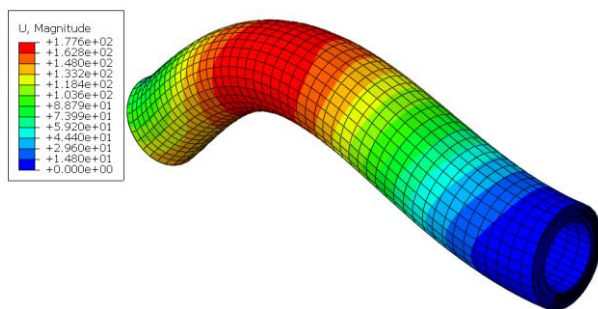


Figure 1: Displacement contour of the pressurized pipe under post-buckling conditions

The primary objective of the modeling was to investigate the effect of embedded shape memory alloy (SMA) wires and their pre-strain levels on the pressure capacity and reduction of twisting in composite pipes. Upon activation of the SMA wires after curing and cooling, the shape memory recovery force helps to alleviate residual stresses and improve the buckling behavior.

3- Results

To investigate the effect of the shape memory alloy (SMA) on the internal pressure capacity of the composite pipe, the wire winding diameter was considered as a variable in the first stage. Helical SMA wires were embedded within the composite layers with diameters of 55, 60, 65, and 70 mm.

Table 3: Critical buckling loads of the first five modes for the pipe without shape memory alloy and without internal pressure

Mode	Buckling Load (N)
1	3495408.75
2	3495408.75
3	8309028.75
4	8309028.75
5	12579625

Table 4: Critical buckling loads of the first five modes for the pipe without shape memory alloy under internal pressure

Mode	Buckling Load (N)
1	3412296.88
2	3412296.88
3	8233080
4	8233080
5	12510937.5

Table 5: Critical buckling loads of the first five modes for the SMA-reinforced pipe under internal pressure

Mode	Buckling Load (N)
1	3440851.25
2	3440851.25
3	8288913.13
4	8288913.13
5	12581587.5

The results of Table 3, corresponding to the baseline composite pipe without SMA and internal pressure, were used as a reference. Comparison with Table 4 shows that applying 10 MPa internal pressure slightly reduces the critical buckling loads for the first five modes. Table 5 presents the SMA-reinforced pipe with 70 mm winding diameter and 10 mm pitch under the same pressure, showing a minor increase in critical loads and improved buckling behavior. Post-buckling analysis of the three pipe configurations was conducted using initial imperfections from Mode I and a nonlinear static solver. Figure 2 illustrates that SMA wires reduce twisting, enhance post-buckling stability, and increase load-bearing capacity under internal pressure. These findings confirm that SMA reinforcement improves the mechanical performance of composite pipes without negatively affecting critical buckling loads. Future studies may explore axial SMA placement to further enhance axial buckling and post-buckling response.

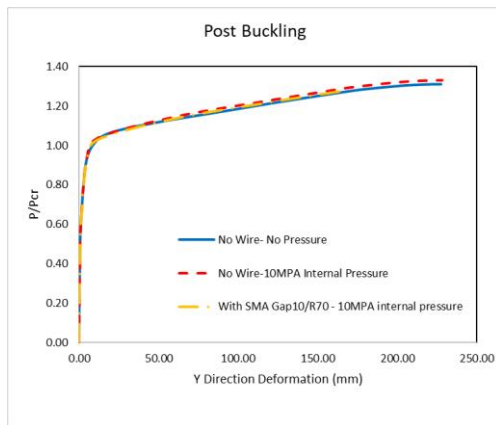


Figure 2: Comparison of post-buckling results for the three pipe specimens under FEM analysis

As observed in Figure 2, the presence of shape memory alloy (SMA) wires causes a minor change of less than 1% in post-buckling behavior, and the examined models behave nearly identically. Therefore, it can be concluded that SMA reinforcement successfully enhances the internal pressure capacity of the pipes without adversely affecting post-buckling performance. This demonstrates the practical and safe applicability of SMA wires for improving the mechanical performance of composite pipes under internal loading.

4- Conclusion

The influence of shape memory alloy (SMA) wires on carbon/epoxy composite pipes under internal pressure was investigated using a validated 3D finite element model. SMA wires, embedded as secondary reinforcement between layers, were studied with varying diameters and winding pitches. Results showed that SMA inclusion slightly increased the critical buckling load (<1%) and

improved post-buckling behavior. Post-buckling analysis with initial imperfections indicated no adverse effect on axial response. Comparison of pipes without SMA, with pressure, and SMA-reinforced under pressure revealed minor enhancements in buckling and post-buckling performance. Wire geometry directly influenced stability, with 70 mm diameter and 5 mm pitch yielding the highest improvement (~1%). The study demonstrates that SMA reinforcement can effectively enhance internal pressure capacity without negatively affecting structural stability, providing a reliable tool for the design and optimization of composite pressure vessels.

5- References

- [1] M. Bouhafs, Z. Sereir, and A. Chateaneuf, "Probabilistic analysis of the mechanical response of thick composite pipes under internal pressure," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 95, pp. 7–15, 2012, doi: [10.1016/j.ijpvp.2012.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.05.001).
- [2] H. Fathi, M. M. Shokrieh, and A. Saeedi, "A theoretical and experimental investigation on the stress distribution in the interface of pre-strained SMA wire/polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 175, p. 107100, 2019, doi: [10.1016/j.compositesb.2019.107100](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107100).
- [3] D. Lagoudas, Z. Bo, M. Qidwai, and P. Entchev, "SMA UM: User material subroutine for thermomechanical constitutive model of shape memory alloys," Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/239541732>.



تحلیل کمانش و پس کمانش لوله کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه دار تحت فشار داخلی

علیرضا پورموید^{۱*} ID، محمدعلی رنجبر^۲ ID، سیدمرتضی سیدنژاد^۳ ID

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران، ایران
۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

کلمات کلیدی

لوله های کامپوزیتی
رفتار کمانش
رفتار پس کمانش
آلیاژ حافظه دار
فشار داخلی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

*نویسنده مسئول

علیرضا پورموید

A.Pourmoayed@khadu.ac.ir

چکیده

این پژوهش به بررسی رفتار کمانش و پس کمانش لوله های کامپوزیتی تحت فشار داخلی، با تمرکز بر تأثیر حضور سیم های نایتینول با اثر حافظه شکلی در بهبود ظرفیت مکانیکی و کنترل پس کمانش می پردازد. لوله ها از جنس کامپوزیت کربن-اپوکسی T300/5208 ساخته شده و به روش الیاف پیچی با لایه چینی [۵۵/-۵۵] تولید شدند. سیم های حافظه دار تحت پیش کرنش ۵٪ در چند لایه جاسازی شدند تا نیروی فشاری در برابر تنش های پسماند کششی ناشی از یخت ایجاد کنند و عملکرد مکانیکی لوله ها را تقویت نمایند. سه نمونه شامل لوله بدون سیم حافظه دار و بدون فشار داخلی، لوله بدون سیم حافظه دار تحت فشار داخلی و لوله تقویت شده با سیم حافظه دار تحت فشار داخلی در نرم افزار آباکوس تحلیل شدند. تحلیل کمانش با استفاده از حل گر اغتشاش خطی، کمانش و بررسی پنج مود اول انجام شد؛ تحلیل پس کمانش با حل گر استاتیکی عمومی غیرخطی و اعمال انحراف اولیه مطابق مود I صورت گرفت. نتایج نشان داد که حضور سیم حافظه دار موجب افزایش کمتر از ۱٪ نیروی بحرانی کمانش و افزایش ۲۰٪ ظرفیت فشار داخلی لوله ها می شود، بدون آن که رفتار پس کمانش تحت فشار داخلی تغییر منفی پیدا کند. این یافته ها نشان می دهد که استفاده از آلیاژ حافظه دار می تواند یک راهکار مؤثر و عملی برای بهبود عملکرد مکانیکی و افزایش ظرفیت فشار لوله های کامپوزیتی، به ویژه در کاربردهای صنعتی و سازه های پیشرفته باشد.

۱- مقدمه

تحلیل رفتار کمانش و پس کمانش در مخازن جدار نازک و لوله های کامپوزیتی تحت بارگذاری های پیچیده، شامل فشار داخلی، فشار خارجی و بار محوری، همواره یکی از موضوعات کلیدی در طراحی سازه های مهندسی بوده است.

ژیا و همکاران [۴] یک مدل تحلیلی برای تعیین تنش ها و کرنش ها در لوله های چندلایه تحت فشار داخلی ارائه کردند که در آن، ناهمسانگردی هر لایه در نظر گرفته شده است. در ادامه، آن ها [۵] روشی تحلیلی برای ارزیابی تنش های حرارتی در لوله های ساندویچی خیم تحت ترکیب بارگذاری فشار داخلی و حرارتی- مکانیکی توسعه

افزایش روزافزون تقاضا برای پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن به عنوان مواد ساختاری در صنایع هوافضا، خودرو و نفت و گاز، نیاز به روش های طراحی و شبیه سازی معتبر، قابل اعتماد و اقتصادی را بیش از پیش برجسته کرده است. یکی از مهم ترین چالش ها در تولید لوله ها و مخازن کامپوزیتی، دستیابی به حداقل ضخامت همراه با حداکثر ظرفیت فشار داخلی است، زیرا کاهش وزن سازه نه تنها هزینه های حمل و نصب را کاهش می دهد، بلکه زمان و هزینه لازم برای تولید تجهیزات را نیز به طور قابل توجهی کاهش می دهد [۱-۳].

How to Cite this Article:

[1] A. Pourmoayed, M. Ranjbar, and S. M. Seyednejad, "Buckling and post-buckling analysis of composite pipe reinforced with shape memory alloy under internal pressure," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 205-218, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.544309.1165> (in Persian)



دادند. همچنین آن‌ها [۶] یک راه‌حل دقیق برای لوله‌های چندلایه‌ی کامپوزیتی آسیب‌دیده تحت خمش خالص ارائه کردند. رزنو^۱ [۷] با بهره‌گیری از نظریه‌ی استوانه‌های کامپوزیتی چندلایه، تنش‌ها و کرنش‌های لوله‌ها را در زوایای الیاف بین ۱۵ تا ۸۵ درجه پیش‌بینی کرده و نتایج را با آزمایش‌ها مقایسه نمود. در لایه‌های نازک چندلایه، زاویه‌ی پیچش ۵۵ درجه به‌عنوان نسبت بهینه‌ی تنش محیطی به محوری معرفی شد، اما در حالت فشار داخلی بدون بارگذاری محوری، زاویه‌ی بهینه باید در حدود ۷۵ درجه باشد. وایلد^۲ و ویکرز^۳ [۸] روشی تحلیلی مبتنی بر نظریه‌ی استوانه‌های چندلایه‌ی ارتوتروپ ارائه کردند و هر دو حالت تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای در استوانه‌های چندلایه را مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که زاویه‌ی بهینه‌ی الیاف نقش مهمی در طراحی پوسته‌های استوانه‌ای چندلایه ایفا می‌کند. بارهای ناشی از فشار داخلی، نیروی محوری، نیروی پیچشی، به‌علاوه تغییرات دما و رطوبت در طول لوله، به‌عنوان شرایط بارگذاری در نظر گرفته شده‌اند. کریکانوف^۴ [۹] یک روش نوین برای طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی چندلایه تحت قیود کرنش و استحکام پیشنهاد کرد. در این روش، تحلیل گرافیکی به‌منظور یافتن ضخامت بهینه‌ی لایه‌ها در راستای زاویه‌های مختلف الیاف مورد استفاده قرار گرفت. بلکات^۵ [۱۰]، در پژوهشی مروری، گنبدها و پوسته‌های استوانه‌ای فلزی و کامپوزیتی تحت فشار داخلی و خارجی را بررسی کرد. اثر پارامترهایی نظیر نقص‌های هندسی، ضخامت غیریکنواخت، حساسیت نسبت به ناهمگونی‌ها و شرایط مرزی، در کاهش مقاومت کمانشی این سازه‌ها برجسته گردید. همچنین پدیده‌هایی نظیر شکست ناگهانی^۶، کمانش پلاستیک و فشار شیک‌داون نیز در مخازن تحت فشار داخلی مورد توجه قرار گرفتند. همچنین وی [۱۰] با تمرکز بر استوانه‌های کامپوزیتی لایه‌ای تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی و استفاده از نرم‌افزار آباکوس، تحلیل‌های خطی و غیرخطی انجام داد و نتایج عددی را با داده‌های تجربی مقایسه کرد. اختلاف ۱۸ درصدی بین تحلیل عددی و آزمون تجربی، بر اهمیت اعتبارسنجی مدل‌های عددی تأکید داشت. هان و همکاران، نرم‌افزار ایکاسوین^۷ برای تحلیل رفتار شکست

تدریجی و پس‌کمانش در لوله‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار دادند. با استفاده از مدل باربرداری کامل پس از شکست و فرمول‌بندی لاگرانژی به‌روز شده، پیش‌بینی دقیقی از الگوهای کمانش حاصل شد. مقایسه با نتایج تجربی نشان داد که اختلاف موج‌های محیطی بین تحلیل و آزمون می‌تواند ناشی از ساده‌سازی در مدل‌سازی باشد. هور^۸ و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای تجربی با بررسی ۴۴ نمونه لوله کامپوزیتی ساخته‌شده از الیاف کربن^۹ و شیشه، رفتار کمانشی تحت فشار خارجی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شکست‌ها عمدتاً در نواحی تغییر ناگهانی لایه‌چینی ناشی از فرآیند ساخت رخ می‌دهد. همچنین، مشخص شد که روش‌های کلاسیک مانند فرمول فون‌مایسز در برخی موارد عملکرد بهتری از روش اجزای محدود در پیش‌بینی فشار کمانش دارند، به‌ویژه زمانی که خواص مواد بر پایه آزمایش تعیین شده باشند. کین^{۱۰} و همکاران [۱۴] روی رفتار پس‌کمانش لوله‌های نازک چندلایه کامپوزیتی در شرایط چرخان و جریان سیال بررسی کردند و با ارائه مدل تحلیلی- عددی، شکل و گسترش موج‌های پس‌کمانش را پیش‌بینی نمودند. این مطالعه نشان داد که شرایط کاربردی مانند دوران و انتقال سیال می‌تواند الگوی پس‌کمانش را تغییر داده و حساسیت به اغتشاشات را افزایش دهد. دینگ^{۱۱} و همکاران [۱۵] با انجام یک مطالعه مقایسه‌ای پارامتریک روی لوله‌های ترموپلاستیک تقویت‌شده با زوایای پیچش مختلف نشان دادند که زاویه پیچش بین ۵۰ تا ۷۰ درجه تأثیر قابل‌توجهی بر فشار اولین آسیب لایه‌ها و رفتار پس‌کمانش دارد. این نتایج با انتخاب چیدمان [۵۵- تا ۵۵+] در پژوهش حاضر هم‌راستا بوده و مبنای مناسبی برای طراحی لایه‌ها فراهم می‌کند. یلدرم^{۱۲} [۱۶] تحلیل تجربی و عددی پس‌کمانش لوله‌های کامپوزیتی شیشه/کربن را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که نقص‌های ساخت و تغییرات محلی در لایه‌چینی اساساً الگو و مکان شروع پس‌کمانش را کنترل می‌کنند. این یافته‌ها بر ضرورت اعتبارسنجی عددی با داده‌های تجربی تأکید می‌کند. لال^{۱۳} و مارکاد^{۱۴} [۱۷] اثر لایه‌های SMA^{۱۵} روی کمانش صفحات کامپوزیتی را بررسی کردند و نشان دادند که پیش‌کرنش و

⁹ CFRP

¹⁰ Y. Qin

¹¹ X. Ding

¹² Yildirim

¹³ A Lal

¹⁴ K Markad

¹⁵ Shape Memory Alloy (SMA)

¹ Rosenow

² Wild

³ Vickers

⁴ Krikanov

⁵ Blachut

⁶ snap-through

⁷ ACOSwin

⁸ Hur

نیروی فشاری در لایه‌ها و کاهش اثر تنش‌های باقیمانده ناشی از پخت، رویکردی نوین و عملی برای تقویت ظرفیت مکانیکی و کنترل رفتار پس کمانش محسوب می‌شود. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر حضور آلیاژ حافظه‌دار بر رفتار کمانش و پس کمانش لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار داخلی می‌پردازد و تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است تا اثرات حضور آلیاژ حافظه‌دار بر نیروی بحرانی کمانش، الگوهای پس کمانش و ظرفیت فشار داخلی به‌طور دقیق مشخص شود. این مطالعه می‌تواند راهنمایی علمی برای طراحی لوله‌های کامپوزیتی مقاوم و بهینه در کاربردهای صنعتی و سازه‌های پیشرفته ارائه دهد.

۲- مدل‌سازی و روش حل مسئله

در این بخش، ابتدا تئوری حاکم بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی و آلیاژهای حافظه‌دار ارائه شده و سپس روش مدل‌سازی عددی برای بررسی رفتار لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار شرح داده می‌شود.

۲-۱- خواص مکانیکی T300/5208

برای تحلیل پاسخ مکانیکی لوله‌های ضخیم کامپوزیتی تحت فشار داخلی، از روش تحلیلی ارائه شده توسط بوهافس^۸ [۲۳] استفاده شده است. در این روش، تنش‌های شعاعی و محیطی در هر لایه با رعایت شرایط مرزی بین لایه‌های مجاور تعیین می‌شوند. خواص مکانیکی لوله کربن/پوکسی T300/5208 در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خواص مکانیکی T300/5208 [23]

مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)				ضریب پواسون				استحکام (مگا پاسکال)	
E1	E2	E3	G12	ν_{12}	ν_{13}	ν_{32}	Y	Y ^{۵۵}	Y ^{۵۶}
۱۸۱	۱۰/۳	۱۰/۳	۷/۱۷	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۵۹	۴۰	۲۴۶	

۲-۲- رفتار آلیاژهای حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار علاوه بر خواص مکانیکی و حرارتی معمول شامل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، ضریب انبساط طولی و ظرفیت گرمایی، دارای خواص ویژه ناشی از فازهای مارتنزیت و آستنیت هستند. خواص مکانیکی/دمایی نایتینول در جدول ۲ ارائه شده است.

قرارگیری سیم/لایه‌های SMA نقش اساسی در افزایش بار بحرانی کمانش ایفا می‌کند. این نتایج مبنای منطقی برای اعمال SMA در لوله‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر است. زوو^۱ [۱۸] رفتار کمانشی استوانه‌های کامپوزیتی با الیاف مارپیچی را تحت فشار یکنواخت خارجی تحلیل نمود. وی با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی و عددی نشان داد که افزایش زاویه مارپیچ باعث توزیع مجدد تنش‌ها و تأخیر در آغاز کمانش می‌شود. نتایج این تحقیق مبنای مهمی برای طراحی بهینه لایه‌چینی در لوله‌های تحت فشار فراهم می‌کند. توماس^۲ [۱۹] و همکاران به بررسی نقش آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کامپوزیت‌های پیشرفته پرداختند و نشان دادند که افزودن سیم‌ها یا ذرات NiTi می‌تواند خاصیت خود ترمیمی و کنترل فعال تغییر شکل را به سازه اضافه کند. آن‌ها تأکید کردند که رفتار حرارتی و فازی SMA در تعامل با ماتریس پلیمری نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری مکانیکی و ظرفیت تحمل تنش دارد. روزیلو^۳ [۲۰] و همکاران تحلیل کمانش سازه‌های کامپوزیتی دیواره نازک با مقطع مستطیلی را تحت بار فشاری انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثرات ناهمسانگردی مواد و نسبت ابعادی بر مسیر کمانش و سختی پس کمانش بسیار قابل توجه است. یافته‌های این مطالعه در درک بهتر پایداری سازه‌های کامپوزیتی سبک‌وزن نقش دارد. اصغری^۴ [۲۱] و همکاران پاسخ‌های خمشی، ارتعاشی و کمانشی تیرهای ساندوچی را با در نظر گرفتن ذرات SMA و خواص وابسته به دما بررسی کردند. بر اساس نتایج عددی، حضور مواد حافظه‌دار شکلی منجر به افزایش قابل توجه سختی مؤثر و تأخیر در آغاز کمانش می‌گردد. این نتایج بر اهمیت استفاده از SMA در بهبود پایداری سازه‌های کامپوزیتی تأکید دارد. لی^۵ [۲۲] در یک مطالعه تجربی به تحلیل کمانش استوانه‌های کامپوزیتی پرداخت و نشان داد که تغییر شکل تحت بار محوری می‌تواند به سه مرحله تقسیم شود: فشردگی یکنواخت، شکل‌گیری مود کمانش اولیه و سپس کمانش کامل. نتایج این تحقیق بر اهمیت مرحله واسط (مود شکل‌گیری) در پیش‌بینی دقیق بار بحرانی و مسیر تغییر شکل تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که تأثیر پارامترهایی مانند ضخامت دیواره، هندسه اولیه و توزیع لایه‌ها در هر مرحله متفاوت است.

با توجه به چالش‌های ذکر شده، استفاده از سیم‌های حافظه‌دار^۶ با اثر حافظه‌شکلی^۷ در لوله‌های کامپوزیتی به‌عنوان روشی برای اعمال

^۵ Li

^۶ NiTiInol

^۷ Shape Memory Effect

^۸ Bouhafs

^۱ Zuo

^۲ Thomas

^۳ Rozylo

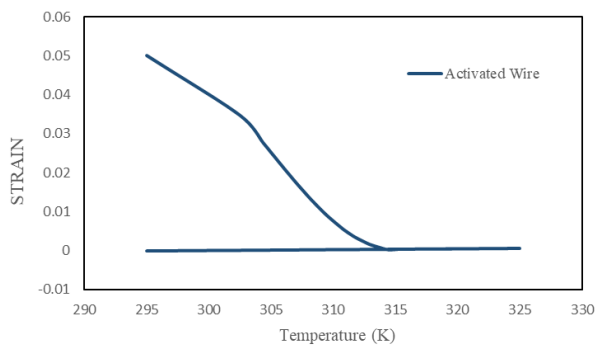
^۴ Asgari

جدول ۲: خواص مکانیکی نایتینول [۲۴]

مقدار	علامت اختصاری	مؤلفه
۱۹/۱۴ GPa	E_m	مدول الاستیسیته مارتنزیت
۳۷/۴۳ GPa	E_A	مدول الاستیسیته آستنیت
۰/۳۳	ν_f	ضریب پواسون (مشترک برای هر دو فاز)
$29 \text{ MPa } ^\circ\text{C}^{-1}$	C_m	ضریب انبساط حرارتی مارتنزیت
$21 \text{ MPa } ^\circ\text{C}^{-1}/74$	C_A	ضریب انبساط حرارتی آستنیت
18°C	M_f	دمای پایان مارتنزیت
33°C	M_s	دمای شروع مارتنزیت
45°C	A_s	دمای شروع آستنیت
75°C	A_f	دمای پایان آستنیت

$$\sigma_{rec} = \frac{Y(\xi)S_{res}}{2} \left\{ 1 - \cos \left[a_A(T - A_s) - \frac{a_A}{C_A} \sigma_{rec} \right] \right\} \quad (2)$$

که در آن $Y(\xi)$ مدول الاستیسیته سیم، S_{res} پیش کرنش اعمال شده، C_A شیب دیاگرام فازی تنش-دمای شروع آستنیت، T دمای اعمال شده، A_s دمای شروع آستنیتی شدن و A_f دمای پایان آستنیتی شدن می باشد. شکل ۲ رفتار آلیاژ حافظه دار دارای پیش کرنش، در اثر افزایش دما جهت فعال سازی آن را نشان می دهد. قطعه با افزایش دما، پیش کرنش را بازیافته و به کرنش صفر برخواهد گشت و با کاهش دما، به علت یک جهته بودن آلیاژ حافظه دار، کرنش صفر باقی خواهد ماند.



شکل ۲: رفتار سیم حافظه دار با پیش کنش ۵٪ در اثر تغییرات دما

۲-۳- مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس

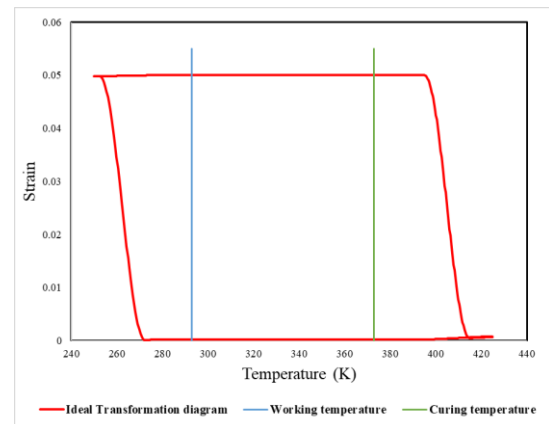
مدل المان محدود لوله های کامپوزیتی و سیم های حافظه دار در نرم افزار آباکوس توسعه داده شد. مراحل اصلی شامل موارد زیر است: تعریف هندسه و مواد: لوله ها ایجاد شده و خواص T300/5208 مطابق جدول ۱ اختصاص داده شد. سیم های حافظه دار با استفاده از سابروتین یومت [۲۷] و بر اساس خواص نایتینول مطابق جدول ۲ مدل سازی شدند.

قرارگیری سیم ها: سیم ها به صورت مارپیچ با قطر ۶۰ میلی متر و فاصله ۵ میلی متر در لایه های کامپوزیتی تعبیه شدند (شکل ۳). پیش کرنش ۵٪ به سیم ها اعمال گردید و قطعات در دمای کوره در شرایط بدون تنش در نظر گرفته شدند.

مراحل تحلیل: تحلیل به سه مرحله تقسیم شد:

- مرحله ۱: سرد شدن پس از پخت لایه های کامپوزیتی
- مرحله ۲: افزایش دما و فعال سازی سیم های حافظه دار
- مرحله ۳: اعمال فشار داخلی (۱۰ و ۱۵ مگا پاسکال)

خاصیت مورد توجه در این پژوهش، اثر حافظه شکلی است. شکل ۱ نشان گر رفتار ایده آل تغییر فرم یک آلیاژ حافظه دار دو جهته است.



شکل ۱: رفتار آلیاژ حافظه دار دو جهته در اثر تغییرات دما

در این پژوهش سیم های حافظه دار با المان های یک بعدی^۱ و قطر ۰/۴ میلی متر مدل سازی شده و خواص مکانیکی و حرارتی آن ها از پژوهش های پیشین [۲۴] استخراج شده است. در فاز مارتنزیت، سیم در دمای محیط تحت بار خارجی تغییر شکل می دهد و با افزایش دما تا رسیدن به فاز آستنیت، به شکل اولیه خود بازمی گردد. این خاصیت برای اعمال نیروی فشاری در جهت کاهش واپیچش چندلایه ها استفاده شده است. روابط میان تنش، کرنش و کسر مارتنزیتی ξ توسط معادله (۱) ارائه شده است [۲۵]:

$$T_1 - T_1^0 = Y_1(S_1 - S_1^0) + \Omega(\xi - \xi^0) \quad (1)$$

نیروی بازگشت^۲ سیم های دارای پیش کرنش نیز با رابطه (۲)

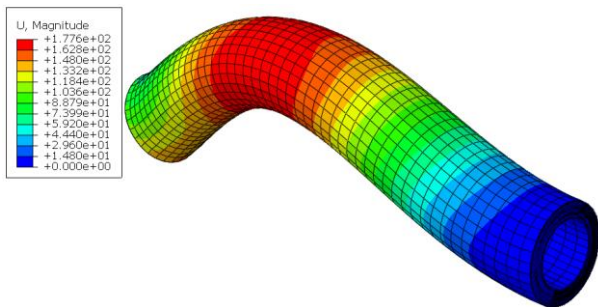
تعیین می شود [۲۶]:

³ U-Mat

Wire
² Recovery Force

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد اختلاف نسبی دو حالت ۳۰۰,۰۰۰ و ۴۵۰,۰۰۰ کمتر از ۱/۵٪ بوده و مدت‌زمان تحلیل نیز از افزایش چشم‌گیر سه برابری را نشان می‌دهد؛ لذا از تعداد مش ۳۰۰,۰۰۰ به بالا، نتایج دارای همگرایی مناسب هستند.

حل‌گر اختلال خطی^۲، کمانش^۳، برای تحلیل کمانش و تعیین نیروی بحرانی پنج مود اول به کار گرفته شد. شرایط مرزی به‌صورت یکسر گیردار و انتهای دیگر با آزادی جابجایی فقط در راستای محوری در نظر گرفته شد. شکل ۵ کانتور جابجایی در راستای عمود بر محور لوله را تحت کمانش مود I نمایش می‌دهد. در این شکل، لوله تحت‌فشار، تحت یک عیب اولیه بر اساس دیتای کمانش مود اول و تحت بارمحوری، دچار پس‌کمانش شده است. لوله تحت‌فشار در شرایط تکیه‌گاهی ساده (یکسر کاملاً محدود و گیردار، یکسر فقط در راستای محوری آزاد) تحت بارمحوری قرار گرفته است.



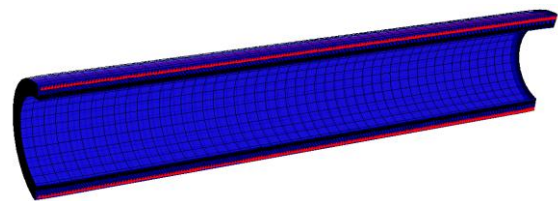
شکل ۵: کانتور جابجایی لوله تحت‌فشار در شرایط پس‌کمانش

هدف اصلی مدل‌سازی، بررسی تأثیر حضور سیم‌های حافظه‌دار و میزان پیش‌کرنش آن‌ها بر ظرفیت فشار و کاهش واپیچش لوله‌های کامپوزیتی است. با فعال‌سازی سیم‌ها پس از پخت و سرد شدن قطعات، نیروی بازگشت ناشی از حافظه‌شکلی به کاهش تنش‌های پسماند و بهبود رفتار کمانش کمک می‌کند.

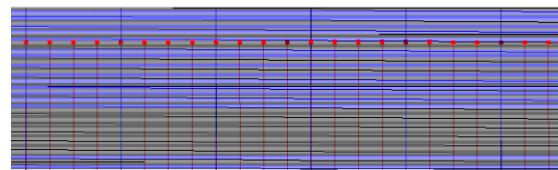
۲-۴- صحت‌سنجی

برای ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل المان محدود ارائه‌شده، صحت‌سنجی آن بر اساس نتایج تحلیلی ارائه‌شده در مقاله بوهافس [۲۳] و همچنین خاصیت حافظه‌شکلی آلیاژهای حافظه‌دار انجام شد. در این راستا، نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی لوله‌های کامپوزیتی با و بدون سیم‌های SMA با نتایج تحلیلی بوهافس مقایسه گردید. نمودارهای حاصل از این مقایسه در شکل ۶ ارائه‌شده‌اند.

مش‌بندی: از المان‌های C3D8R برای لایه‌های کامپوزیتی و المان‌های Beam برای سیم‌ها استفاده شد.



(الف)



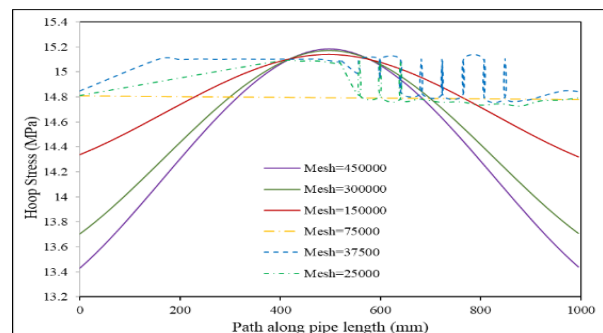
(ب)

شکل ۳: (الف) نمای ایزومتریک لوله تحت‌فشار مدل‌سازی شده و چیدمان آلیاژ حافظه‌دار در پوسته. (ب) برشی در راستای طول لوله، گام سیم‌پیچ (نقاط قرمز رنگ) در این حالت ۵ میلی‌متر است

تحلیل کمانش و پس‌کمانش: برای بررسی اثر حضور سیم‌های حافظه‌دار، سه نوع نمونه مورد آزمون قرار گرفت:

- ۱- لوله بدون آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار داخلی
- ۲- لوله بدون آلیاژ حافظه‌دار و تحت‌فشار داخلی
- ۳- لوله تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار تحت‌فشار داخلی

برای تحلیل تأثیر تعداد المان‌ها بر نتایج و تضمین همگرایی، نمونه بدون سیم تحت‌فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. مدل‌های متعددی با تعداد مش‌های متفاوت از ۲۵,۰۰۰ تا ۴۵۰,۰۰۰ در نظر گرفته شد. در هر مدل، تنش محیطی^۱ در راستای طول لوله محاسبه شد و نتایج در شکل ۴ ارائه گردید.



شکل ۴: نمودار تنش محیطی در راستای طول لوله در سطح داخلی آن بر اساس تعداد مش

³ Linear Perturbation, Buckle

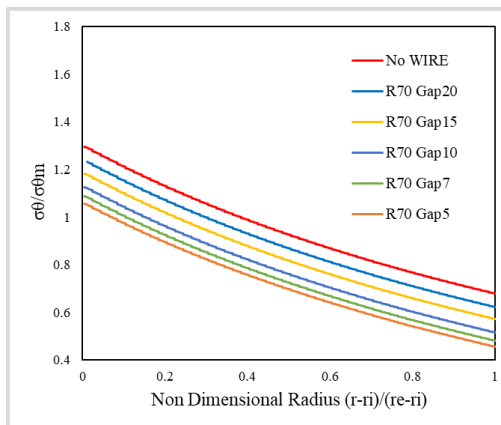
¹ Hoop Stress

² Linear Perturbation

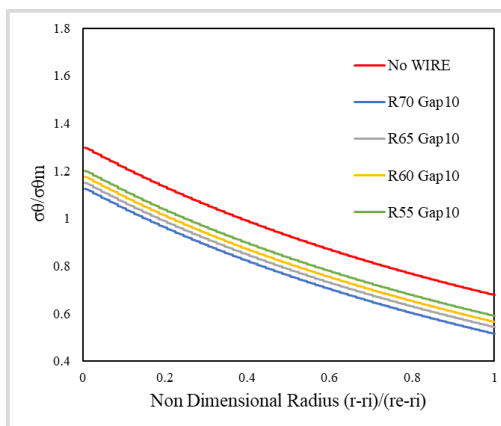
می‌تواند برای تحلیل‌های بعدی شامل بررسی اثر پیش‌گرنش سیم‌ها، تحلیل کمانش و پس‌کمانش و ارزیابی ظرفیت فشار داخلی لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی تأثیر آلیاژ حافظه‌دار بر ظرفیت فشار لوله کامپوزیتی در مرحله اول، قطر سیم-پیچ به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد. سیم-پیچ در قطرهای مختلف ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ میلی‌متر در میان چندلایه تعبیه شد. نتایج تأثیر آن بر تنش محیطی در شکل ۷ ارائه شده است.



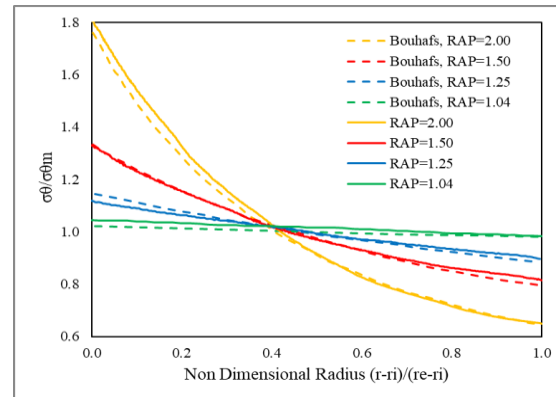
(الف)



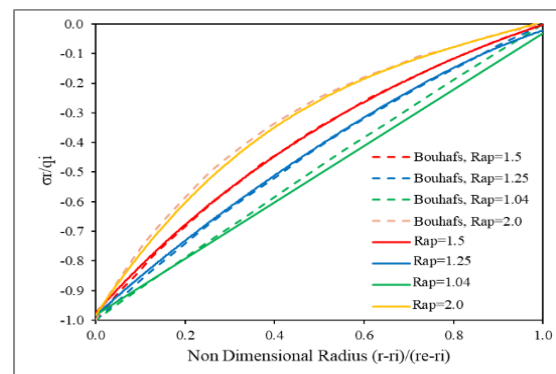
(ب)

شکل ۷: (الف) تأثیر گام سیم‌پیچ آلیاژ حافظه‌دار بر تنش محیطی Hoop Stress بی‌بعد شده. (ب) تأثیر قطر سیم‌پیچ آلیاژ حافظه‌دار بر تنش محیطی Hoop Stress بی‌بعد شده

شکل ۷ نشان می‌دهد که حضور آلیاژ حافظه‌دار به‌صورت یک سیم‌پیچ در یک لوله کامپوزیتی چه تأثیری خواهد داشت. شکل ۷ (الف)، تأثیر گام سیم‌پیچ بر تنش محیطی را نشان می‌دهد. با کاهش گام سیم‌پیچ از ۲۰ میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر و نزدیک شدن سیم‌ها به



(الف)



(ب)

شکل ۶: (الف) مقایسه میزان تنش‌های محیطی در مدل حاضر و پژوهش بوهافس [۲۳] (ب) مقایسه میزان تنش‌های شعاعی در مدل حاضر و پژوهش بوهافس [۲۳]

در نمودارهای ادامه پژوهش، Rap نسبت شعاع خارجی به شعاع داخلی، R(70) شعاع سیم‌پیچ که از ۵۵ تا ۷۰ میلی‌متر متغیر خواهد بود و Gap(5) گام سیم‌پیچ بوده و از ۵ تا ۲۰ میلی‌متر متغیر خواهد بود. همچنین σ_θ تنش محیطی، σ_z تنش محوری، σ_r تنش شعاعی، q_i فشار داخلی، $\frac{r-ri}{re-ri}$ نیز پارامتر بی‌بعد شده از شعاع می‌باشد. تمامی تنش‌ها، به‌صورت نقطه‌ای^۱ روی یک مسیر از سطح داخلی لوله تا سطح بیرون آن با پارامتر بی‌بعد ۰ تا ۱ نمایش داده شده است. همچنین $\sigma_\theta m = \frac{q_i r_i}{r_e - r_i}$ است.

بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که انحراف نمودار خروجی مدل انجام‌شده نسبت به نمودار ارائه‌شده توسط بوهافس، به‌صورت نقطه‌به‌نقطه در تمام حالات کمتر از ۵٪ بوده است. این مقدار خطا بیانگر صحت بالای مدل المان محدود و هم‌خوانی بسیار خوب بین نتایج مدل حاضر و نتایج بوهافس [۲۳] بوده و صحت و دقت مدل المان محدود توسعه‌یافته را تأیید می‌کند؛ بنابراین، مدل ارائه‌شده

¹ Unique Nodal

تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار و تحت‌فشار داخلی، به ترتیب در جدول ۳، جدول ۴ و جدول ۵ ارائه می‌گردد.

جدول ۳: نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول نمونه بدون آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار داخلی

مود	نیروی بحرانی کمانش (نیوتن)
۱	۳۴۹۵۴۰۸/۷۵
۲	۳۴۹۵۴۰۸/۷۵
۳	۸۳۰۹۰۲۸/۷۵
۴	۸۳۰۹۰۲۸/۷۵
۵	۱۲۵۷۹۶۲۵

جدول ۴: نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول نمونه بدون آلیاژ حافظه‌دار و تحت‌فشار داخلی

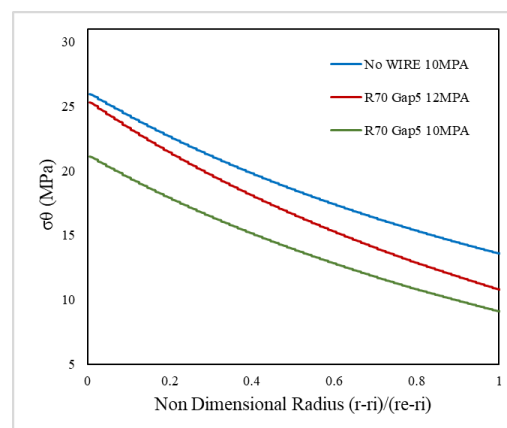
مود	نیروی بحرانی کمانش (نیوتن)
۱	۳۴۱۲۲۹۶/۸۸
۲	۳۴۱۲۲۹۶/۸۸
۳	۸۲۳۳۰۸۰
۴	۸۲۳۳۰۸۰
۵	۱۲۵۱۰۹۳۷/۵

جدول ۵: نیروی بحرانی کمانش پنج مود اول نمونه تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار و تحت‌فشار داخلی

مود	نیروی بحرانی کمانش (نیوتن)
۱	۳۴۴۰۸۵۱/۲۵
۲	۳۴۴۰۸۵۱/۲۵
۳	۸۲۸۸۹۱۳/۱۳
۴	۸۲۸۸۹۱۳/۱۳
۵	۱۲۵۸۱۵۸۷/۵

نتایج جدول ۳ مربوط به نمونه خام لوله کامپوزیتی بدون حضور آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار داخلی می‌باشد و به‌عنوان مرجع اولیه مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه آن با جدول ۴ نشان می‌دهد که اعمال فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال باعث افت اندک نیروهای بحرانی کمانش در پنج مود اول می‌شود. نتایج جدول ۵ مربوط به لوله کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار با آرایش قطر ۷۰ میلی‌متر و گام ۱۰ میلی‌متر و تحت‌فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که حضور آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش جزئی نیروهای بحرانی کمانش پنج مود اول شده و بهبود رفتار کمانش لوله تحت‌فشار داخلی را فراهم می‌آورد؛ بنابراین، استفاده از سیم‌های حافظه‌دار نه تنها ظرفیت فشار داخلی لوله را افزایش می‌دهد، بلکه تأثیر منفی بر

یکدیگر میزان تنش محیطی وارد بر بدنه کامپوزیتی لوله از ۵٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است. چراکه تعداد سیم‌ها بر واحد سطح بیشتر بوده و نیروی بازایی بیشتری به پوسته وارد می‌شود. شکل ۷ (ب)، تأثیر قطر سیم‌پیچ بر میزان تنش محیطی را نشان می‌دهد. با افزایش قطر سیم‌پیچ از ۵۵ میلی‌متر تا ۷۰ میلی‌متر، تنش محیطی از ۱۵٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است. چراکه طول محیط سیم استفاده‌شده بیشتر بوده و نیروی بازایی بیشتری به پوسته وارد می‌شود. برای بررسی مقدار افزایش ظرفیت فشار، مدل لوله کامپوزیت تقویت‌شده با سیم حافظه‌دار، با فشار 12MPa ایجاد شد. نتایج در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۸: تنش محیطی وارد بر سه نمونه لوله کامپوزیتی

در شکل ۸، سه نمونه ۱- آبی: بدون سیم با فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال، ۲- سبز: نمونه با سیم‌پیچ و فشار داخلی ۱۰ مگا پاسکال و ۳- قرمز: نمونه با سیم‌پیچ و فشار داخلی ۱۲ مگا پاسکال، مورد بررسی قرار گرفتند. سیم‌پیچ در دو نمونه ۲ و ۳ با شعاع ۷۰ و گام ۵ میلی‌متر دفن شده است. آنچه مشاهده می‌شود، حضور آلیاژ حافظه‌دار در چندلایه، میزان تنش محیطی را به کمک نیروی بازایی ناشی از فعال‌سازی، کاهش داده و در شرایط فشار داخلی یکسان، میزان تنش‌های محیطی وارد بر پوسته، کاهش می‌یابد. با افزایش فشار داخلی لوله به میزان ۲۰٪ مشاهده می‌شود که نمودار مربوط به فشار ۱۲ مگا پاسکال با سیم حافظه‌دار، هنوز زیر نمودار نمونه ۱۰ مگا پاسکال بدون سیم حافظه‌دار است. لذا این مفهوم نشان می‌دهد که میزان ظرفیت فشار ۲۰٪ افزایش یافته است. این افزایش ظرفیت فشار در حضور آلیاژهای حافظه‌دار بر روی رفتار کمانش و پس‌کمانش نیز تأثیرگذار خواهد بود. نیروی بحرانی نمونه‌های ۱- بدون آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار داخلی، ۲- بدون آلیاژ حافظه‌دار و تحت‌فشار داخلی، ۳-

نتیجه گرفت که استفاده از سیم‌های حافظه‌دار برای افزایش ظرفیت فشار داخلی لوله‌ها موفقیت‌آمیز است و علاوه بر افزایش ظرفیت فشار، تأثیر منفی بر رفتار پس‌کمانش لوله تحت فشار اعمال نمی‌کند. این امر نشان‌دهنده قابلیت استفاده عملی و ایمن آلیاژ حافظه‌دار برای بهبود عملکرد مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری داخلی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی تحت فشار داخلی بررسی شد. مدل اجزای محدود سه‌بعدی توسعه یافت و صحت آن با نتایج تحلیلی بوهافس تأیید شد. سیم‌های حافظه‌دار به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی ثانویه میان لایه‌های کامپوزیتی تعبیه شدند و پارامترهایی مانند قطر سیم و گام سیم‌پیچ مورد مطالعه قرار گرفتند.

نتایج نشان دادند که:

- حضور سیم‌های حافظه‌دار موجب افزایش جزئی کمتر از ۱٪ نیروهای بحرانی کمانش و بهبود جزئی رفتار پس‌کمانش لوله تحت فشار داخلی شد.
- تحلیل پس‌کمانش لوله تقویت‌شده با سیم‌پیچ محیطی با وارد کردن انحراف اولیه مود اول نشان داد که سیم‌های حافظه‌دار تأثیر منفی روی رفتار پس‌کمانش محوری ایجاد نمی‌کند.
- مقایسه سه نمونه:

۱- لوله بدون آلیاژ حافظه‌دار و بدون فشار

۲- لوله بدون آلیاژ حافظه‌دار تحت فشار

۳- لوله تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار تحت فشار نشان داد که حضور آلیاژ حافظه‌دار، رفتار کمانش و پس‌کمانش لوله را بهبود جزئی می‌بخشد.

- قطر و گام سیم‌ها تأثیر مستقیمی بر عملکرد کمانش داشت؛ سیم‌پیچ با قطر ۷۰ و با گام ۵ میلی‌متر، بیشترین بهبود را در پایداری پس‌کمانش ایجاد کردند. این بهبود در بیشترین حالت ۱٪ بود.

• نتایج نشان‌دهنده آن است که حضور آلیاژ حافظه‌دار به‌صورت سیم‌پیچ، می‌تواند جهت افزایش ظرفیت فشار داخلی لوله کامپوزیتی به کار گرفته شود و این موضوع بر سایر ویژگی‌های لوله شامل رفتار کمانش و پس‌کمانش، تأثیر منفی نخواهد داشت.

مدل ارائه‌شده قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار کمانش و پس‌کمانش لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار را دارد و می‌تواند

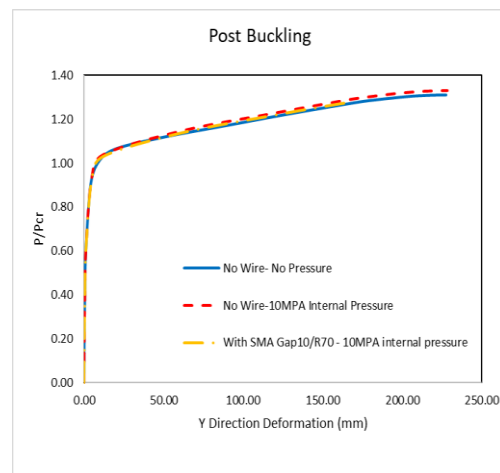
نیروهای بحرانی کمانش ندارد. به‌عنوان پژوهش‌های آتی، می‌توان، حضور آلیاژهای حافظه‌دار به‌صورت محوری (نه به شکل سیم‌پیچ) را مورد بررسی قرار داد. این نوع چیدمان می‌تواند تأثیر بیشتری بر رفتار کمانش و پس‌کمانش محوری داشته باشد.

در ادامه، رفتار پس‌کمانش لوله تحت فشار داخلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا اثر آلیاژ حافظه‌دار بر کاهش واپیچش و بهبود عملکرد پس‌کمانش تحلیل شود.

برای بررسی رفتار پس‌کمانش لوله‌های کامپوزیتی، همان سه نمونه‌ای که در تحلیل کمانش مورد مطالعه قرار گرفتند، مورد تحلیل قرار گرفتند. در این مرحله، از خروجی مدل کمانش، استفاده‌شده و انحراف اولیه^۱ لازم برای مود I پس‌کمانش به مدل وارد گردید تا رفتار واقعی‌تر ساختار شبیه‌سازی شود.

سپس با استفاده از حل‌گر استاتیک غیرخطی^۲ تحلیل پس‌کمانش انجام شد. نتایج حاصل از پس‌کمانش برای هر سه نمونه در شکل ۹ ارائه شده است و رفتار لوله‌ها تحت بارگذاری بیش از نیروی بحرانی کمانش و اثر حضور آلیاژ حافظه‌دار بر کاهش واپیچش و بهبود پایداری لوله نشان داده شده است.

این تحلیل امکان بررسی اثر سیم‌های حافظه‌دار بر کاهش واپیچش پس‌کمانش و افزایش ظرفیت باربری لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار داخلی را فراهم می‌آورد.



شکل ۹: مقایسه نتایج پس‌کمانش سه نمونه تحت تحلیل FEM

مطابق آنچه در شکل ۹ مشاهده می‌شود: حضور آلیاژ حافظه‌دار تغییر جزئی کمتر از ۱٪ در رفتار پس‌کمانش ایجاد کرده است و مدل‌های مورد بررسی تقریباً مشابه عمل می‌کنند؛ بنابراین، می‌توان

² Non-Linear General Static

¹ Imperfection

[5] M. Xia, K. Kemmochi, and H. Takayanagi, "Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading," *Composite Structures*, Vol. 51, No. 3, pp. 273–283, 2001, doi: [10.1016/S0263-8223\(00\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00137-9).

[6] M. Xia, H. Takayanagi, and K. Kemmochi, "Bending behavior of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipes," *Composite Structures*, Vol. 56, No. 2, pp. 201–210, 2002, doi: [10.1016/S0263-8223\(01\)00181-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00181-7).

[7] M. W. K. Rosenow, "Wind angle effects in glass fibre-reinforced polyester filament wound pipes," *Composites*, Vol. 15, No. 2, pp. 144–152, 1984, doi: [10.1016/0010-4361\(84\)90727-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(84)90727-4).

[8] P. M. Wild and G. W. Vickers, "Analysis of filament-wound cylindrical shells under combined centrifugal, pressure and axial loading," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, No. 1, pp. 47–55, 1997, doi: [10.1016/S1359-835X\(96\)00093-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00093-0).

[9] A. A. Krikanov, "Composite pressure vessels with higher stiffness," *Composite Structures*, Vol. 48, No. 1–3, pp. 119–127, 2000, doi: [10.1016/S0263-8223\(99\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00083-5).

[10] J. Blachut, "Pressure vessel components: Some recent developments in strength and buckling," *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 1, No. 4, pp. 415–421, 1998, doi: [10.1002/pse.2260010410](https://doi.org/10.1002/pse.2260010410).

[11] J. Błachut, "Experimental perspective on the buckling of pressure vessel components," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 66, No. 1, p. 010803, 2014, doi: [10.1115/1.4026067](https://doi.org/10.1115/1.4026067).

[12] J. Y. Han, H. Y. Jung, J. R. Cho, J. H. Choi, and W. B. Bae, "Buckling analysis and test of composite shells under hydrostatic pressure," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1–3, pp. 742–745, 2008, doi: [10.1016/j.jmatprotec.2007.11.228](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.228).

[13] S. H. Hur, H. J. Son, J. H. Kweon, and J. H. Choi, "Postbuckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure," *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1–3, pp. 114–124, 2008, doi: [10.1016/j.compstruct.2008.03.028](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.028).

به‌عنوان ابزاری معتبر برای طراحی و بهینه‌سازی مخازن تحت فشار کامپوزیتی استفاده شود.

۴-۱- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
مدول الاستیسیته	$Y(\xi)$
کرنش	S
پیش کرنش اعمال شده	S_{res}
شیب دیاگرام فازی	C_A
دمای اعمال شده	T
دمای شروع آستنیتی شدن	A_s
دمای پایان آستنیتی شدن	A_f
علائم یونانی	
کسر مارتنزیتی	ξ
تنش بازگشت (نیروی برگشت آلیاژ حافظه‌دار)	σ_{rec}
ضریب تأثیر داخلی کسر مارتنزیتی	Ω
ضریب تأثیر دما روی بازگردانی تنش SMA	a_A
زیرنویس	
ابتدایی	res
شروع	s
پایان	f
درجه	o

۵- منابع

- [1] E. Kappel, D. Stefaniak, T. Sprowitz, and C. Hühne, "A semi-analytical simulation strategy and its application to warpage of autoclave-processed CFRP parts," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 12, pp. 1985–1994, 2011, doi: [10.1016/j.compositesa.2011.09.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.09.001).
- [2] S. C. Tseng and T. A. Osswald, "Prediction of shrinkage and warpage of fiber reinforced thermoset composite parts," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 13, No. 8, pp. 698–721, 1994, doi: [10.1177/073168449401300803](https://doi.org/10.1177/073168449401300803).
- [3] S. R. White and J. B. Berman, "Thermomechanical response of SMA composite beams with embedded nitinol wires in an epoxy matrix," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 9, No. 5, pp. 391–400, 1998, doi: [10.1177/1045389X9800900507](https://doi.org/10.1177/1045389X9800900507).
- [4] M. Xia, H. Takayanagi, and K. Kemmochi, "Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure," *Composite Structures*, Vol. 53, No. 4, pp. 483–491, 2001, doi: [10.1016/S0263-8223\(01\)00061-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00061-7).

sandwich beam composed of five layers considering honeycomb core and CNTRC with SMA particles and temperature-dependent material properties using SSDT,” *Mechanics of Advanced Composite Structures*, Vol. 12, No. 1, pp. 153–168, 2025, doi: [10.22075/mac.2024.33537.1622](https://doi.org/10.22075/mac.2024.33537.1622).

[22] Z. Li, X. Zhang, K. Shen, J. Liu, J. Zhang, and G. Pan, “Experimental study on the buckling of composite cylinders with reinforced circular hole under hydrostatic pressure,” *Defence Technology*, Vol. 44, pp. 231–247, 2025, doi: [10.1016/j.dt.2024.10.002](https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.10.002).

[23] M. Bouhafs, Z. Sereir, and A. Chateaneuf, “Probabilistic analysis of the mechanical response of thick composite pipes under internal pressure,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 95, pp. 7–15, 2012, doi: [10.1016/j.ijpvp.2012.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.05.001).

[24] H. Fathi, M. M. Shokrieh, and A. Saeedi, “A theoretical and experimental investigation on the stress distribution in the interface of pre-strained SMA wire/polymer composites,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 175, p. 107100, 2019, doi: [10.1016/j.compositesb.2019.107100](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107100).

[25] M. Abouhamzeh, J. Sinke, K. M. B. Jansen, and R. Benedictus, “Closed form expression for residual stresses and warpage during cure of composite laminates,” *Composite Structures*, Vol. 133, pp. 902–910, 2015, doi: [10.1016/j.compstruct.2015.07.098](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.098).

[26] C. Liang and C. A. Rogers, “One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302, 1997, doi: [10.1177/1045389X9700800402](https://doi.org/10.1177/1045389X9700800402).

[27] D. Lagoudas, Z. Bo, M. Qidwai, and P. Entchev, “SMA UM: User material subroutine for thermomechanical constitutive model of shape memory alloys,” Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/239541732>

[14] Y. Qin, H. Lv, X. Zhang, and X. Li, “Post-buckling behaviors of a spinning composite thin-walled pipe conveying fluid considering thermal effects,” *Ocean Engineering*, Vol. 330, p. 121279, 2025, doi: [10.1016/j.oceaneng.2025.121279](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121279).

[15] X. D. Ding, S. Q. Wang, W. C. Liu, and X. H. Ye, “A comparative study on the post-buckling behavior of reinforced thermoplastic pipes under external pressure considering progressive failure,” *China Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 2, pp. 233–246, 2024, doi: [10.1007/s13344-024-0020-3](https://doi.org/10.1007/s13344-024-0020-3).

[16] H. Yıldırım, “The post-buckling analysis of cylindrical polymer fiber-reinforced composite tubes subjected to axial loading fabricated by filament winding technology,” *Polymer Composites*, Vol. 45, No. 14, pp. 13434–13450, 2024, doi: [10.1002/pc.28960](https://doi.org/10.1002/pc.28960).

[17] A. Lal and K. Markad, “Static buckling analysis of shape memory alloy reinforced composite laminated plate,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 814, No. 1, p. 012009, 2020, doi: [10.1088/1757-899X/814/1/012009](https://doi.org/10.1088/1757-899X/814/1/012009).

[18] X. Zuo, J. Zhang, W. Tang, M. Zhan, and Y. Li, “Buckling of helically wound composite cylinders under uniform external pressure,” *Ships and Offshore Structures*, Vol. 19, No. 3, pp. 348–365, 2024, doi: [10.1080/17445302.2023.2169065](https://doi.org/10.1080/17445302.2023.2169065).

[19] K. K. Thomas, N. M. Hassan, Z. Bahroun, and M. Awad, “Exploring the role of shape memory alloys in advanced composite sandwich panels and laminates,” *Composites Part C: Open Access*, p. 100557, 2025, doi: [10.1016/j.jcomc.2025.100557](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100557).

[20] P. Rozylo, M. Rogala, and J. Pasnik, “Buckling analysis of thin-walled composite structures with rectangular cross-sections under compressive load,” *Materials*, Vol. 16, No. 21, p. 6835, 2023, doi: [10.3390/ma16216835](https://doi.org/10.3390/ma16216835).

[21] M. Asgari, M. Mohammadimehr, M. Arabzadeh-Ziari, and E. Arabzadeh-Ziari, “Static bending, vibration, and buckling responses of a



Modeling and Estimation of Spectral Stretching in Aluminum Beam Frequency Response Function Signals Using Experimental Modal Analysis and Adaptive Signal Processing

Mohammad Khakbaz^{*1} , Alireza Ebrahimi Hesari² , Amin Darani Goldarreh³ ,
Mehrddad Karimi¹

1. PhD student in Aerospace Engineering, Faculty of Graduate Studies, Shahid Sattari Aeronautical University of Sciences and Technology, Tehran, Iran
2. PhD student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
3. MSc student in Aerospace Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

The high sensitivity of spectral strain estimation has made it a powerful tool for early detection of failures and dynamic nonlinear instabilities. In this study, first, the modal analysis of a free-free aluminum beam was addressed in the form of three experimental, analytical, and numerical approaches. In the modal section, the dynamic responses of the beam were recorded at six points with a calibrated hammer impact test. The experimental results were combined with signal analysis and advanced algorithms to obtain modal parameters, including natural frequencies, modal vectors, and frequency responses, with an accuracy of more than 90% compared to the analytical and numerical results. Numerical modeling in Abaqus showed that the results at frequencies of 80 to 1800 Hz corresponded with acceptable accuracy and were able to simulate the vibration behavior of the system with low error. In the second section, the analysis of dynamic signs and spectral strain of the frequency response function signal was performed using wavelet transform and short-time Fourier transform methods. The results of this analysis showed that at a frequency of 255 Hz, there is a significant dynamic anomaly in mode 2 with a high quality factor (more than 25) and a strain in the range of 4.5 to 6.5, indicating the possibility of cracks, loosening, or stiffness changes in the structure. This anomaly is stable over time and is associated with mode interaction and nonlinear phenomena.

Keywords

Modal analysis
Aluminum beam
Spectral Kurtosis
Frequency response function
Dynamic anomaly

Received: 20.07.2025

Revised: 08.11.2025

Accepted: 15.11.2025

*Corresponding Author

Mohammad Khakbaz

Email

Mohammadkhakbaz.eng@gmail.com

1- Introduction

Structural damage detection is one of the most important fields for investigating many multidisciplinary fields for structural safety. Cracks in beams lead to a decrease in stiffness, frequency, and a change in damping. The location and depth of the crack can be identified through changes in

dynamic characteristics [1, 2]. Since natural frequencies have a theoretical relationship with the location and size of the crack, it can be concluded that changes in the first two natural frequencies provide sufficient data to identify the type and depth of the crack [3]. The use of aluminum sections due

How to Cite this Article:

[1] M. Khakbaz, A. Ebrahimi Hesari, A. Darani Goldarreh, and M. Karimi, "Modeling and estimation of spectral stretching in aluminum beam frequency response function signals using experimental modal analysis and adaptive signal processing," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 219–240, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535696.1151> (in Persian)



to their high tensile strength, corrosion resistance, and high fracture toughness can have a significant impact on preventing crack growth in various structures [4]. In numerical methods, Monte Carlo simulation is a method based on the statistical description of the system response under random inputs that provides insights into the behavior of the system under various uncertainties in the simulation output [5]. For large-scale engineering structures, small-scale modal analysis cannot be used, so parameter estimation methods based on acceleration and displacement should be used. Spectral Kurtosis, as an effective signal processing method, is applied to analyze the vibration and anomaly of the system by first decomposing it into the time-frequency domain, after which the stretching values are determined for each frequency band. The concept of spectral stretching analysis was first developed by Dwyer, a tool capable of identifying non-Gaussian features in different frequency bands using the fourth-order moment of the real part of the short-time Fourier transform (short-time Fourier transform). Dwyer only investigated the application of spectral stretching to stationary processes, while he did not consider the non-stationary vibration signals typical of rotating machines' effect on employee creativity, with its moderating role of creative efficiency. To examine this hypothesis, the structural equations modelling with the partial least squares method and SPSS and Smart PLS software have been used. This research also examines sub-hypotheses [6]. The main distinguishing point of this research is the simultaneous application of the short-time Fourier transform and the wavelet transform in the spectral elongation method for the analysis of random signals, while previous studies mainly used a single method for deterministic signals. This combined approach has a unique ability to identify nonlinear behaviors, low-amplitude frequency oscillations, and local instabilities of the structure that cannot be detected by traditional methods.

2- Research Methods

In this study, the modal analysis laboratory setup consists of an aluminum beam with free-end

boundary conditions, which is suspended horizontally by thin wires from six strategic points. This suspension allows the beam to be in a near-free condition without any physical restraints, and its natural vibrations are measured with minimal disturbance. A PCB 0803 impact hammer with a medium-tip head is used to excite the structure, which is equipped with a piezoelectric sensor to simultaneously measure the applied force. Impacts are applied to the aluminum beam at six marked points to allow the identification of all vibration modes in the desired frequency range. To measure the response, a PCB 352C22 single-axis accelerometer with a sensitivity of 10 mV is installed at the center of the bottom surface of the beam. A PCB 378B02 precision polarized microphone is also placed at a certain distance from the beam to record the acoustic response of the structure. The signals received from the sensors are amplified by a PCB 480E09 signal amplifier and then transmitted to a four-channel data acquisition system, model NI 9234, with a sampling accuracy of 24 bits and a sampling frequency of 25.6 kHz. The collected data are processed in the STAR modal analysis software environment, so that frequency response functions (FRF) are calculated using fast Fourier transform, and modal parameters, including natural frequencies, damping ratios, and modal shapes, are extracted using modal identification algorithms such as POLY MAX. To increase accuracy, each experiment is repeated three times with different numbers of nodes, and the average of the results is closest to the numerical and analytical solution results. In signal processing, to reduce spectral leakage, a Henning window is applied to the force signal and an exponential window is applied to the response signal. This laboratory setup allows for accurate identification of the dynamic properties of the beam with minimal error, which can be used to validate finite element models and predict the behavior of similar structures.

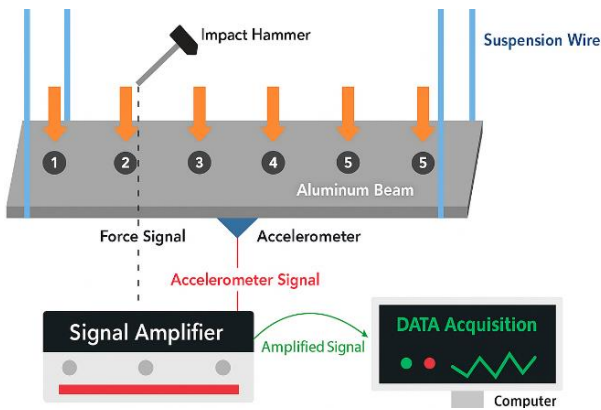


Figure 1: Graphical schematic of a free-free beam under impact excitation

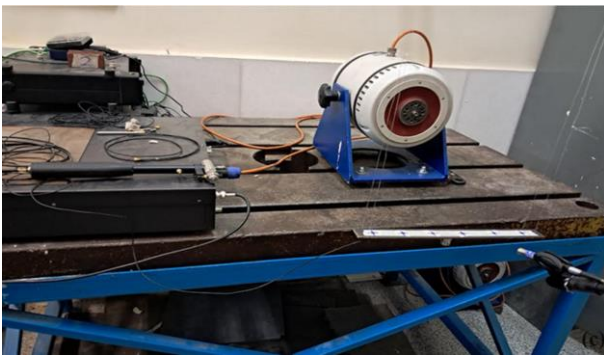


Figure 2: Experimental setup of a free-free beam under impact excitation

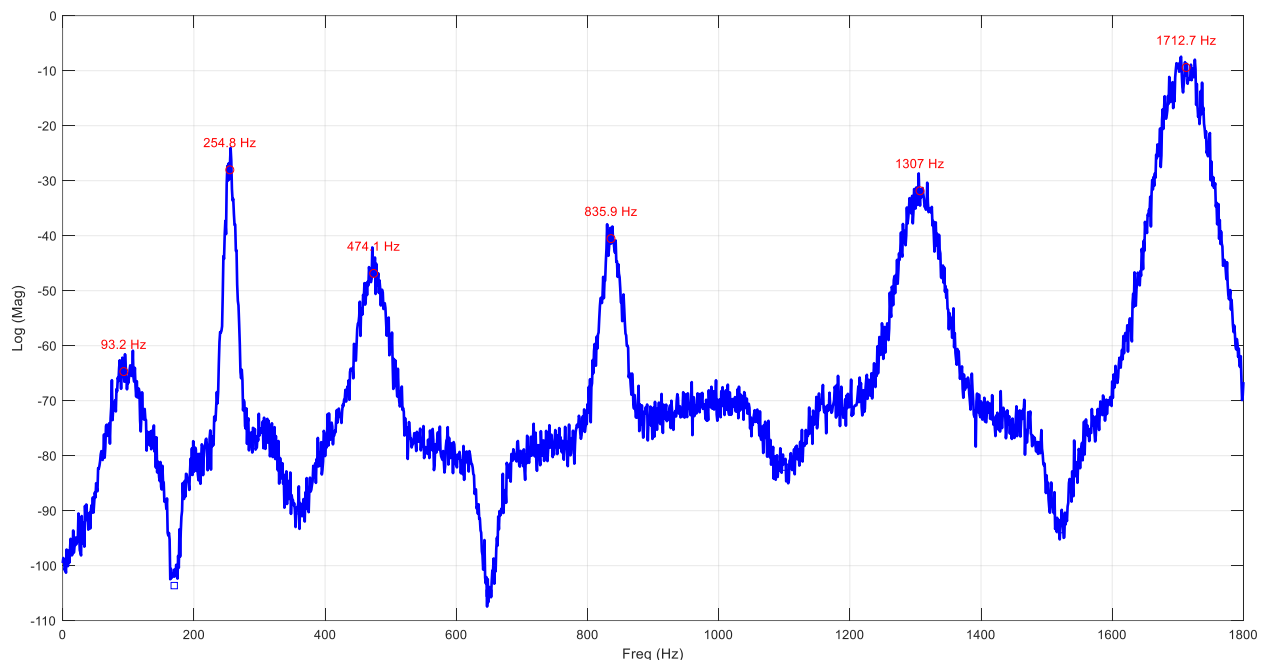


Figure 3: Frequency response function diagram of the system under excitation in Star software

The results of the fast Kurtogram show that the system has six distinct resonant modes at approximately 93, 255, 474, 836, 1307, and 1713

3- Results

The data collected from the experimental test can be run as a file in the Star signal analysis software, and After analyzing the resonances across the frequency range, the results of the frequency response function analysis show that the system under study has six dominant resonance modes at frequencies of 93.2, 254.8, 474.1, 835.9, 1307, and 1712.7 Hz, which form a complex pattern of dynamic behavior. A detailed examination of the frequency distribution of these modes indicates the existence of a multi-stage dynamic structure in which the spacing between successive modes does not follow a regular pattern, but rather indicates the effect of various physical parameters such as mass, stiffness, and damping in different regions of the system. Figure 3 shows the frequency response function diagram of the excited beam.

Hz. Examination of the spectral Kurtosis distribution at different bandwidth levels indicates the presence of significant anomalies in the second

mode (255 Hz), which, with a stretch value of 7.5, shows the highest sensitivity to possible defects. Due to its high quality factor ($Q=25$) and limited bandwidth, this mode is capable of detecting small changes in the dynamic response of the system. Comparing the Kurtogram pattern at different levels shows that the 1307 and 1713 Hz modes, with Kurtosis values of 6.0 and 7.2, respectively, have a higher bandwidth and moderate sensitivity to defects. The first mode (93 Hz), with an elongation of 4.8 and a relatively wide bandwidth, shows the least sensitivity for detecting anomalies. The energy distribution in the Kurtogram indicates that possible defects in the system are more detectable in the higher frequency range and with a narrower bandwidth. The results of this analysis demonstrate the importance of continuous monitoring of the 255 Hz mode as a key indicator for early detection of failure in the vibration system under study.

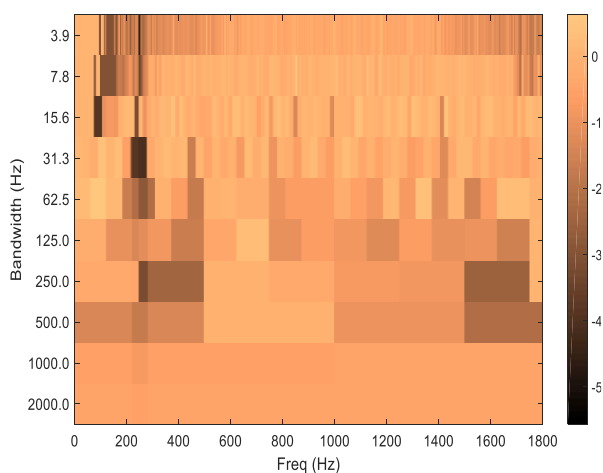


Figure 4: Kurtogram resulting from the system's frequency response function

4- Conclusion

The spectral elongation study of the free-free beam frequency response function has been carried out using two different methods, each of which provides a different view of the dynamic behavior of the system. In this study, the natural frequency and mode shapes of the shock-excited system were first obtained using three analytical, numerical, and experimental methods. The frequency results show that the natural frequencies of the system in all three cases have been recorded as acceptable values in the

range between 0 and 1800 Hz with an error rate of less than 10%. Comparing the results obtained from the spectral Kurtosis analysis with the two wavelet transform and short-time Fourier transform methods for the signal resulting from the system frequency response function shows that the wavelet method provides a larger and smoother picture of the system behavior and identifies the main peaks related to the lower modes well, while the short-time Fourier transform method shows more details of the frequency oscillations and is also able to identify sub-resonances and harmonics. The sharpness of the signal in the second mode (approximately 255 Hz) indicates that this mode is more susceptible to dynamic instability and system anomalies than the other modes. The overall distribution of the recorded strain values of the system has an almost normal shape with a mean of about 3, which is consistent with the statistical properties of Gaussian signals. The engineering applications of these studies are of great importance in modal identification, structural health monitoring, damage and crack detection, and investigation of the nonlinear behavior of dynamic systems. High strain values at certain frequencies can indicate high energy concentration or nonlinear behavior, which is very important in the design of vibration control systems.

5- References

- [1] A. M. Fadlalla, "Modal analysis of beams using finite element methods," *Journal of Civil and Construction Engineering Research*, Vol. 1, No. 1, 2024, doi: [10.1007/s40567-024-00119-9](https://doi.org/10.1007/s40567-024-00119-9).
- [2] M. Avcar, "Free vibration analysis of beams considering different geometric characteristics and boundary conditions," *International Journal of Mechanical Applications*, Vol. 4, No. 3, pp. 94–100, 2014, doi: [10.5923/j.mechanics.20140403.03](https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20140403.03).
- [3] D. H. Nguyen, L. V. Ho, T. Bui-Tien, G. De Roeck, and M. A. Wahab, "Damage evaluation of free-free beam based on vibration testing," *Applied Mechanics*, Vol. 1, No. 2, pp. 142–152, 2020, doi: [10.3390/applmech1020010](https://doi.org/10.3390/applmech1020010).

-
- [1] M. A.-B. Abdo and M. Hori, "A numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shapes," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 251, No. 2, pp. 227–239, 2002, doi: [10.1006/jsvi.2001.3989](https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3989).
- [2] F. Sayyad, B. Kumar, and S. Khan, "Approximate analytical method for damage detection in free–free beam by measurement of axial vibrations," *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 22, No. 1, pp. 133–142, 2012, doi: [10.1177/1056789512440897](https://doi.org/10.1177/1056789512440897).
- [3] H. Dai, Z. Zheng, and H. Ma, "An explicit method for simulating non-Gaussian and non-stationary stochastic processes by Karhunen–Loève and polynomial chaos expansion," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 115, pp. 1–13, 2019, doi: [10.1016/j.ymssp.2018.05.026](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.026).
- [4] S. Tavares, "Aircraft structural design and life-cycle assessment through digital twins," *Designs*, Vol. 8, No. 2, p. 29, 2024, doi: [10.3390/designs8020029](https://doi.org/10.3390/designs8020029).
- [5] J. Li, X. Zhu, S. S. Law, and B. Samali, "Indirect bridge modal parameters identification with one stationary and one moving sensor using stochastic subspace identification," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 446, pp. 1–21, 2019, doi: [10.1016/j.jsv.2019.01.024](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.01.024).
- [6] B. Eftekharijad, M. R. Carrasco, B. Charnley, and D. Mba, "The application of spectral kurtosis on acoustic emission and vibrations from a defective bearing," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, No. 1, pp. 266–284, 2011, doi: [10.1016/j.ymssp.2010.06.010](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.06.010).



مدل سازی و تخمین کشیدگی طیفی در سیگنال های تابع پاسخ فرکانسی تیر آلومینیومی با بهره گیری از آنالیز مودال تجربی و پردازش سیگنال تطبیقی

محمد خاکباز^{۱*}، علیرضا ابراهیمی حساری^۲، امین دارانی گلدره^۳، مهرداد کریمی^۱

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی هوافضا، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

آنالیز مودال

تیر آلومینیومی

کشیدگی طیفی

تابع پاسخ فرکانسی

ناهنجاری دینامیکی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴

*نویسنده مسئول

محمد خاکباز

ایمیل

Mohammadkhakbaz.eng@gmail.com

حساسیت بالای تخمین کشیدگی طیفی، آن را به ابزار قدرتمندی برای تشخیص زود هنگام خرابی ها و ناپایداری های غیرخطی دینامیکی تبدیل کرده است. در این مطالعه، ابتدا به آنالیز مودال یک تیر آلومینیومی آزاد-آزاد در قالب سه رویکرد آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی پرداخته شد. در بخش مودالی، پاسخ های دینامیکی تیر در شش نقطه با آزمایش ضربه چکش کالیبره شده ثبت شد. نتایج آزمایشگاهی با تحلیل سیگنال و بهره گیری از الگوریتم های پیشرفته، پارامترهای مودال شامل فرکانس های طبیعی، بردارهای مودال و پاسخ های فرکانسی با دقت بالای بیش از ۹۰٪ در مقایسه با نتایج تحلیلی و عددی کنار هم قرار گرفتند. مدل سازی عددی در آباکوس نشان داد که نتایج در فرکانس های ۸۰ تا ۱۸۰۰ هرتز با دقت قابل قبولی مطابقت دارد و توانسته است رفتار ارتعاشی سیستم را با خطای کم، شبیه سازی کند. در بخش دوم، تحلیل نشانه های دینامیکی و کشیدگی طیفی سیگنال تابع پاسخ فرکانسی، با روش های تبدیل موجک و تبدیل فوریه زمان-کوتاه انجام شد. نتایج این تحلیل نشان داد که در فرکانس ۲۵۵ هرتز، ناهنجاری دینامیکی قابل توجهی در مود ۲ با کیفیت فاکتور بالا (بیش از ۲۵) و کشیدگی در محدوده ۴/۵ تا ۶/۵ که نشان دهنده احتمال وجود ترک، شل شدگی یا تغییرات سختی در سازه است وجود دارد. این ناهنجاری در طول زمان پایداری داشته و با برهم کنش مودها و پدیده های غیرخطی همراه است.

۱- مقدمه

آسیب، ویژگی های مودال مانند فرکانس های طبیعی، شکل مودها و نسبت های میرایی را تغییر می دهد. فرکانس طبیعی یکی از پرکاربردترین شاخص های آسیب است [۳]. از آنجا که اطلاعات جامع در مورد وجود ترک ها و آسیب های کوچک بعید است که تنها از طریق پاسخ ارتعاشی آزمایشی شناسایی شوند، در نتیجه تنها بسنده کردن به داده های شکل حالت ارتعاش به تنهایی برای شناسایی ترک کافی نیست. داده های شکل مودها که حاوی اطلاعاتی در مورد اثرات ترک موجود در ساختار تیر است، از طریق آزمایش مودال تجربی به دست

بیش از یک قرن است که محققان از تیرها به عنوان عناصر اصلی سازه های برای بررسی آسیب ناشی از بارگذاری های دینامیکی و استاتیکی استفاده می کنند [۱ و ۲]. تیر دوسر آزاد به علت عدم وجود قید می تواند آزادانه ارتعاش کند. از آنجا که تیر دوسر آزاد دارای شش فرکانس صلب می باشد، در آزمایش تجربی می توان با تغییر در نحوه بستن طناب های آویز، میزان سفتی یا فنریت سیستم را کم و زیاد کرد. آنالیز مودال، روشی مبتنی بر تشخیص آسیب های دینامیکی سازه ای است. آسیب را می توان با واکنش های ارتعاشی یک سازه تشخیص داد.

How to Cite this Article:

[1] M. Khakbaz, A. Ebrahimi Hesari, A. Darani Goldarreh, and M. Karimi, "Modeling and estimation of spectral stretching in aluminum beam frequency response function signals using experimental modal analysis and adaptive signal processing," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 219-240, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535696.1151> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

می‌آید. پس داده‌های شکل مودهای بازسازی‌شده با روش اسپلاین^۱ درون‌یابی می‌شوند تا وجود موقعیت ترک را با وضوح بهتری به تصویر بکشند [۴]. یکی از تفاوت‌های غالب بین یک تیر آزاد و یک تیر گیردار این است که نوسانات آزاد یک تیر آزاد شامل حرکات بدنه صلب و ارتعاشات الاستیک است، درحالی‌که نوسانات یک تیر گیردار فقط از ارتعاشات الاستیک تشکیل شده است [۵]. کیانو و همکاران ارتعاشات آزاد یک تیر پلکانی با تکیه‌گاه‌های الاستیک چرخشی-انتقالی را بر اساس حل تحلیلی ماتریس انتقال^۲ بررسی کردند و این تحلیل، تحولی شگرف در زمینه بررسی ارتعاشات آزاد عناصر سازه‌ای بر اساس حل تحلیلی می‌باشد [۶]. یک روش جدید برای تحلیل مودال عملیاتی، آزمایش ارتعاشی بر روی روتور هلیکوپتر با مقیاس کاهش‌یافته است. طی تحقیقاتی که انجام شده است، از روش انرژی کرنشی معین و معیار اطمینان مودال می‌توان شاخص‌های آسیب مبتنی بر بارگذاری دینامیکی یک روتور هلیکوپتر را در جهت استخراج ضریب حساسیت و پایش وضعیت سیستم تخمین زد [۷ و ۸]. محققانی که در حال حاضر در زمینه تشخیص ترک از طریق تحلیل مودال کار می‌کنند، یک تحلیل دینامیکی تجربی گسترده از تیرهای دوسر آزاد با هدف اعتبارسنجی تکنیک‌های نظری توسعه‌یافته برای پیش‌بینی مکان و عمق ترک‌ها در این مدل تیرها انجام داده‌اند [۹]. شناسایی آسیب‌های سازه‌ای یکی از مهم‌ترین زمینه‌ها برای بررسی بسیاری از زمینه‌های چندرشته‌ای برای امنیت سازه است. ترک در تیر منجر به کاهش سختی، فرکانس و تغییر در میرایی می‌شود. شناسایی محل ترک و عمق آن را می‌توان از طریق تغییرات در مشخصات دینامیکی اندازه‌گیری کرد [۱۰ و ۱۱]. از آنجا که فرکانس‌های طبیعی با محل ترک و اندازه ترک رابطه نظری دارند، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات در دو فرکانس طبیعی اول، داده‌های کافی را برای شناسایی نوع و عمق ترک فراهم می‌کند [۱۲]. استفاده از مقاطع آلومینیومی به علت استحکام کششی بالا، مقاومت در برابر خوردگی و چقرمگی شکست بالا می‌تواند تاثیر بسزایی در جلوگیری از رشد ترک در سازه‌های مختلف داشته باشد [۱۳]. در روش‌های عددی، شبیه‌سازی مونت کارلو روشی مبتنی بر توصیف آماری پاسخ سیستم تحت ورودی‌های تصادفی است که بینش‌هایی در رابطه با رفتار سیستم تحت عدم قطعیت‌های مختلف در خروجی شبیه‌سازی ارائه می‌کند [۱۴]. برای سازه‌های مهندسی با مقیاس بزرگ نمی‌توان از آنالیز مودال کوچک استفاده کرد،

پس باید از روش‌های تخمین پارامتری که مبتنی بر شتاب و جابجایی هستند استفاده کرد [۱۵]. در مقایسه با تحلیل مودال مبتنی بر شتاب که یک روش قدیمی است، جابجایی می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر شناسایی قابل اعتمادتر و قوی‌تر برای تحلیل مودال عملیاتی عمل کند. با این حال، برای سازه‌های فراساحلی که در محیط دریایی کار می‌کنند، یافتن یک نقطه مرجع ثابت برای اندازه‌گیری جابجایی‌های سازه دشوار است. علاوه بر این، هنگامی که جابجایی‌ها با یکپارچه‌سازی شتاب‌های اندازه‌گیری‌شده بازسازی می‌شوند، به دلیل سرعت و جابجایی اولیه نامعلوم و همچنین تأثیر نویز و اغتشاشات سیستم، رانش‌های غیرواقعی اتفاق می‌افتد. پس استراتژی شناسایی مؤلفه‌های جابجایی و تخریب سیستم در فرکانس‌های پایین‌تر معمول‌تر است [۱۶]. برای پایش وضعیت و سلامت ساختاری سازه‌هایی که تحت نیروهای آیرودینامیکی مرتعش می‌شوند، محاسبه نیروها در حوزه زمانی در امتداد پره‌ها و تخمین پاسخ سیستم با توجه به تحریکات تصادفی ضروری است. به همین منظور، استفاده از روش الگوریتم تجزیه دامنه فرکانس در جهت به‌دست آوردن پارامترهای مودالی و در نهایت تشخیص و مکان‌یابی آسیب‌های ناشی از تحریکات تصادفی بسیار حائز اهمیت است [۱۷]. رفتار دینامیکی سیستم‌های چند بدنه نقش بسزایی در طراحی سیستم‌های دینامیکی دارد. این سیستم‌ها از اجزای مختلفی از اتصالات منعطف و صلب ساخته شده‌اند. در این رابطه در سالیان اخیر تئوری‌های زیادی در جهت تحلیل سیستم‌های چند بدنه، بخصوص سیستم‌هایی که از تیرها و بدنه‌های صلب تشکیل شده‌اند، ارائه شده است. یک روش دقیق برای حل ارتعاشات آزاد سیستم‌های چند بدنه مانند تیرهای منعطف و اجسام صلب ارائه شده است. با استفاده از نظریه الگوریتم J0، ترکیب خواص تیرهای اوپلر برنولی و تیموشنکو و اجسام صلب به‌راحتی امکان‌پذیر بوده و نیازی به معکوس کردن ماتریس‌ها نیست. از طرفی این الگوریتم، مشکلات رایج در محاسبات عددی ویتریک-ویلیامز در تحلیل مودال را به‌صورت کامل حل کرده است [۱۸-۲۰]. مطالعه دایون و همکاران با پاسخ‌های ساختاری همراه با اجزای هارمونیک دامنه و فرکانس مدوله‌شده در یک محدوده کوتاه، ترکیبی رایج برای سیستم‌های مکانیکی با موتورها و سایر ماشین‌های دوار در حال کار، سروکار دارد. این اجزای هارمونیک داده‌های گمراه‌کننده‌ای را تولید می‌کنند که به اشتباه توسط روش‌های کلاسیک مورد استفاده در تحلیل مودال

² Transmission Matrix¹ Spline Method

استفاده می کردند. این رویکرد ترکیبی، توانایی منحصر به فردی در شناسایی رفتارهای غیرخطی، نوسانات فرکانسی کم دامنه و ناپایداری های محلی سازه ایجاد کرده که در روش های سنتی قابل تشخیص نیستند. انتخاب هوشمندانه شش نقطه آنالیز، تعادل بهینه ای بین دقت و کارایی محاسباتی برقرار می کند که در پژوهش های مشابه کمتر به آن توجه شده است.

در این مقاله ابتدا، مقدمه ای جامع بر کاربردهای آنالیز مودال و اهمیت کشیدگی طیفی سیگنال های حاصل از توابع پاسخ فرکانسی در پژوهش های مختلف ارائه شده است. سپس در بخش معادلات، روابط ریاضی حاکم بر تیر دوسر آزاد شامل فرکانس های طبیعی، شکل مودها و محاسبه کشیدگی طیفی به وسیله روش های موجک و تبدیل فوریه زمان کوتاه تشریح گردیده است. در ادامه، روند آزمایش تجربی با چیدمان دقیق دستگاه ها و انجام آزمایش ضربه مودال توسط چکش بر روی شش گره متوالی تیر توضیح داده شده است. به منظور صحت سنجی نتایج، شبیه سازی عددی در نرم افزار المان محدود آباکوس انجام و فرکانس های طبیعی و شکل مودهای به دست آمده با داده های تجربی مقایسه شده است. در بخش تحلیل کشیدگی طیفی، سیگنال های توابع پاسخ فرکانسی با کدنویسی در نرم افزار متلب پردازش و ضرایب موجک و تبدیل فوریه زمان کوتاه استخراج شده اند. در نهایت، نتایج حاصل از این تحلیل ها توانسته اند ناهنجاری ها و آسیب های موجود در گره های مورد بررسی را به طور دقیق شناسایی و مکان یابی کنند.

۲- معادلات و طرح مسئله

مسئله حول محور تیر آلومینیومی به طول ۵۴ سانتی متر عرض ۴/۵ سانتی متر و ضخامت ۵ میلی متر انجام می شود. شرایط مرزی تیر به صورت دو سر آزاد بوده و چگالی سطح معادل ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. برای یک مقطع مستطیلی، ممان اینرسی حول محور خنثی از معادله (۱) به دست می آید.

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (1)$$

که در معادله (۱)، b عرض تیر و h ضخامت تیر تعریف می شود. جرم تیر در واحد طول از معادله (۲) استخراج می شود که در آن ρ چگالی مقطع، m جرم تیر و A مساحت سطح مقطع تیر می باشد

$$m = \rho A \quad (2)$$

عملیاتی تفسیر شده اند. کار حاضر تلاش می کند تا ماکزیمم ها را در طیف های ناشی از اجزای هارمونیک و حالت های ساختاری متمایز کند. روش تشخیص پیشنهادی بر اساس کشیدگی طیفی بهینه سازی شده است و با سایر تعاریف کشیدگی طیفی که در ادبیات شرح داده شده است مقایسه شده است. پس از مطالعه پارامتری روش، یک مطالعه انتقادی بر روی شبیه سازی های عددی و سپس بر روی یک ساختار آزمایشی در حال عملیات به منظور ارزیابی عملکرد روش انجام می شود [۲۱]. کشیدگی طیفی به عنوان یک روش مؤثر پردازش سیگنال، برای تحلیل لرزش و ناهنجاری سیستم با تجزیه اولیه آن به دامنه زمان-فرکانس صورت می گیرد که پس از آن مقادیر کشیدگی برای هر باند فرکانسی تعیین می شود. مفهوم تحلیل کشیدگی طیفی برای اولین بار توسط دوائر توسعه یافت، ابزاری که قادر به شناسایی ویژگی های غیرگوسی در باندهای فرکانسی مختلف با استفاده از لحظه مرتبه چهارم قسمت واقعی تبدیل فوریه کوتاه مدت (تبدیل فوریه زمان-کوتاه) بود. دوائر تنها به بررسی کاربرد کشیدگی طیفی در فرآیندهای ثابت پرداخت، در حالی که سیگنال های لرزش غیرثابت معمول دستگاه های دوار را در نظر نگرفت [۲۲]. مطالعاتی که نیتا و همکاران انجام دادند، تخمین های تحلیلی برای امید ریاضی و واریانس تخمین زننده کشیدگی طیفی در حالات سیگنال های گذرای هم دوس و گوسین که با پس زمینه گوسین شبه ایستایی مخلوط شده اند، به دست آورده است. این تخمین ها برای ارزیابی عملی نسبت سیگنال به نویز و چرخه کاری نسبت به زمان ادغام ابزاری مناسب هستند. برای تأیید این تخمین های تحلیلی، از شبیه سازی های عددی استفاده شده و نشان داده شده است که این برآوردها تحت تأثیر عدم قطعیت های آماری قرار دارند که با انتخاب مناسب زمان ادغام می توانند از چند درصد تجاوز نکنند [۲۳]. در این پژوهش، رویکردی نوین برای تحلیل دینامیکی تیر دوسر آزاد آلومینیومی ارائه شده که در مقایسه با مطالعات پیشین، نوآوری های چشمگیری دارد. برخلاف پژوهش های متداول که عموماً به یک روش تحلیلی اکتفا می کنند، این مطالعه از تلفیق هوشمندانه با استفاده از رویکرد سه وجهی حل مسئله آزمایش چکش مودال شش نقطه ای، تحلیل تابع پاسخ فرکانسی در نرم افزار تحلیلگر STAR، صحت سنجی با الگوریتم سیرکل فیت متلب و حل عددی در نرم افزار آباکوس بهره می برد. نقطه تمایز اصلی این پژوهش، کاربرد هم زمان تبدیل فوریه زمان-کوتاه و تبدیل موجک در روش کشیدگی طیفی برای تحلیل سیگنال های اتفاقی است، در حالی که مطالعات قبلی عمدتاً از یک روش منفرد برای سیگنال های قطعی

$$H(x, x_0, \omega) = \sum \frac{(\varphi_n(x) \times \varphi_n(x_0))}{m \times (\omega_n^2 - \omega^2) + (j \times \zeta \times \omega_n^2)} \quad (11)$$

که در آن $H(x, x_0, \omega)$ تابع پاسخ فرکانسی سیستم، $\varphi_n(x, x_0)$ شکل مود ساختار در نقاط x و x_0 ، ω_n^2 فرکانس طبیعی سیستم، ω^2 فرکانس تحریک، ζ ضریب میرایی و m جرم تیر می‌باشد. یکی از روش‌های تحلیل مودالی روش circle fitting می‌باشد که در آن نمودار نایکویست تابع پاسخ فرکانسی در نزدیکی هر فرکانس طبیعی به صورت یک دایره تقریب زده می‌شود که معادله کلی آن به صورت عبارت (۱۲) آورده شده است.

$$= R^2 (\operatorname{Re}(\alpha\omega) - a)^2 + (\operatorname{Im}(\alpha\omega) - b)^2 \quad (12)$$

جایی که (a, b) مرکز دایره و R شعاع دایره می‌باشد. به صورت کلی پاسخ تیر به تحریک چکش در حوزه فرکانس به صورت عبارت (۱۳) بیان می‌شود که در آن $H(x, x_0, \omega)$ تابع پاسخ فرکانسی سیستم و $F\omega$ تبدیل فوریه نیروی تحریک می‌باشد.

$$w(x, \omega) = H(x, x_0, \omega) \times F\omega \quad (13)$$

معادله (۱۴) تابع وزنی، برای گره‌های مختلف تحریک چکش را نشان می‌دهد.

$$g(x, t) = \left(\frac{1}{m}\right) \times \sum \varphi_n(x) \times \sin(\omega_n t) \quad (14)$$

برای مقایسه شکل مودهای تجربی و عددی از معادله MAC که به شرح عبارت (۱۵) است استفاده می‌شود [۷].

$$MAC(\varphi_i, \varphi_j) = \frac{(\varphi_i^T \times \varphi_j)^2}{(\varphi_i^T \times \varphi_i) \times (\varphi_j^T \times \varphi_j)} \quad (15)$$

شکل ۱، طرح نمادین گرافیکی از طرح مسئله برای انجام آزمایش آنالیز مودال تیر آلومینیومی را نشان می‌دهد. جایی که تیر تحت شرایط مرزی دوسر آزاد و تحت تحریک ضربه پالس چکش در ۶ گره بر روی تیر تحریک شده و سیگنال ناشی از تحریک توسط ساختار ثبت می‌شود.

برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی تیر از معادله (۳)، استفاده می‌شود که در آن EI سفتی خمشی تیر، m جرم تیر، L طول تیر، β_n ضریب مقادیر ویژه تیر می‌باشد که برای تیرهایی با شرایط مرزی مختلف مقادیر متفاوتی می‌باشد [۱].

$$f_n = \frac{\beta_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{ML^4}} \quad (3)$$

معادله دیفرانسیل (۴) مقادیر ویژه β_n را با توجه به بسط مثلثاتی تعریف می‌کند که از روش عددی نیوتون رافسون به دست آمده است [۲].

$$\cosh(\beta_n) - \cos\beta_n \quad (4)$$

معادله شکل مودها برای یک تیر دوسر آزاد به صورت معادله (۵) می‌باشد که در آن $\varphi_n(x)$ شکل مود n ام سیستم در نقطه x ، β_n مقادیر ویژه معادله مشخصه برای شماره شکل مود، L طول تیر و σ_n ضریب ثابت شکل مود است [۲].

$$\sigma_n \varphi_n(x) = \cosh \frac{\beta_n x}{L} - \cos \frac{\beta_n x}{L} - \left(\sinh \frac{\beta_n x}{L} - \sin \frac{\beta_n x}{L} \right) \quad (5)$$

ضریب ثابت σ_n طبق معادله (۶) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_n = \frac{\cosh(\beta_n) - \cos\beta_n}{\cosh(\beta_n) - \cos\beta_n} \quad (6)$$

از آنجا که شرایط مرزی تیر به صورت دوسر آزاد است، گشتاور و نیروی برشی در دوسر تیر معادل صفر می‌باشد که شرایط مرزی تیر طبق معادلات (۷-۱۰) به دست می‌آید [۲].

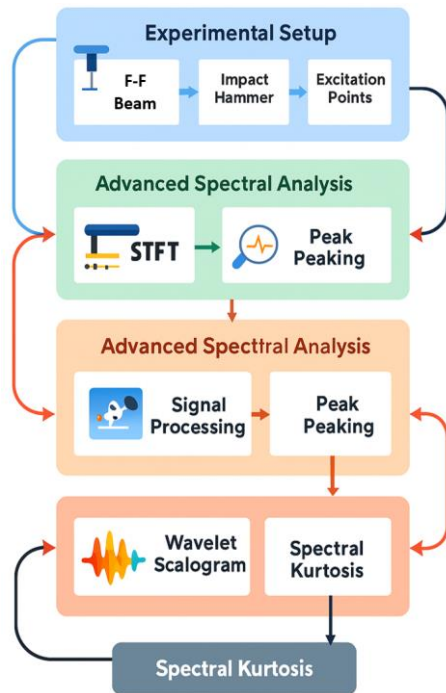
$$-EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(0) = 0 \quad (7)$$

$$EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}(0) = 0 \quad (8)$$

$$-EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(L) = 0 \quad (9)$$

$$EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}(L) = 0 \quad (10)$$

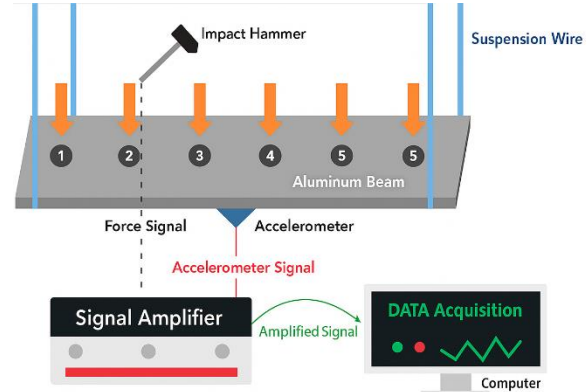
در حالت تحریک چکش، پاسخ دینامیکی تیر در نقطه x به صورت معادله (۱۱)، به تحریک اعمال شده در نقطه x_0 است [۲].



شکل ۲: نمودار فرایند روش پژوهش، از طراحی چیدمان تا تحلیل سیگنال خروجی

۳- آزمایش تجربی

در این پژوهش، چیدمان آزمایشگاهی تحلیل مودال شامل یک تیر آلومینیومی با شرایط مرزی دو سر آزاد بوده که به صورت افقی توسط سیم‌های نازک از شش نقطه استراتژیک معلق شده است. این نحوه آویز باعث می‌شود تیر بدون هیچ گونه اتصال فیزیکی محدودکننده، در شرایط نزدیک به آزاد قرار گیرد و ارتعاشات طبیعی آن با حداقل اختلال اندازه‌گیری شود. برای تحریک سازه، از یک چکش ضربه مدل PCB 0803 با سر نوک متوسط استفاده شده که مجهز به یک حسگر پیزوالکتریک برای اندازه‌گیری هم‌زمان نیروی اعمالی است. ضربات در شش نقطه علامت‌گذاری شده روی تیر آلومینیومی اعمال می‌شود تا امکان شناسایی تمامی مدهای ارتعاشی در محدوده فرکانسی موردنظر فراهم گردد. برای اندازه‌گیری پاسخ، یک شتاب‌سنج تک‌محوره مدل PCB 352C22 با حساسیت ۱۰ میلی‌ولت در مرکز سطح زیرین تیر نصب شده است. همچنین یک میکروفون دقیق پلاریزه شده مدل PCB 378B02 برای ثبت پاسخ صوتی سازه در فاصله مشخص از تیر قرار گرفته است. سیگنال‌های دریافتی از حسگرها توسط یک تقویت‌کننده سیگنال مدل PCB 480E09 تقویت شده و سپس به سیستم جمع‌آوری داده چهار کاناله مدل NI 9234 با دقت نمونه‌برداری ۲۴ بیت و فرکانس نمونه‌برداری ۲۵/۶ کیلوهرتز منتقل می‌شوند. داده‌های جمع‌آوری شده در محیط نرم‌افزار تحلیل مودال



شکل ۱: طرح نمادین گرافیکی از طرح مسئله تیر، تحت اثر تحریک هیجانی

برای کشیدگی طیفی گشتاورهای طیفی به صورت معادله (۱۶) می‌باشد. جایی که $S_4(f)$ گشتاور مرتبه چهارم و $S_2(f)$ گشتاور مرتبه دوم طیف در فرکانس f می‌باشد [۲۲].

$$SK(f) = \frac{S_4(f)}{S_2^2(f)} - 2 \quad (16)$$

این روش به ویژه برای سیگنال‌های غیرایستا مفید است چون می‌تواند تغییرات ناگهانی در طیف را آشکار کند. روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه برای محاسبه کشیدگی طیفی، سیگنال را به بخش‌های کوچک با استفاده از یک تابع پنجره تقسیم می‌کند. سپس برای هر بخش، تبدیل فوریه محاسبه می‌شود تا تغییرات فرکانسی در طول زمان آشکار شود. برای یک سیگنال $x(t)$ ، تبدیل فوریه زمان-کوتاه به صورت معادله (۱۷) تعریف می‌شود [۲۴].

$$STFT(\tau, f) = \int x(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (17)$$

که در آن $W(t)$ تابع پنجره است. به صورت کلی تبدیل موجک با استفاده از تابع W_ψ در معادله (۱۸) تعریف می‌شود که نشانگر تابع تبدیل پیوسته است [۲۴].

$$W_\psi(f, a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (18)$$

که در آن $\psi_x(t)$ تحلیل موجک سیگنال در $x(t)$ ، a مقیاس و b جابجایی است. به صورت کلی، تحلیل موجک می‌تواند به تحلیل هم‌زمان زمان و فرکانس پرداخته و به شناسایی ویژگی‌های پیچیده، نوسانات و ناهنجاری‌ها در سیگنال‌های غیرخطی و در نتیجه کاهش نویز کمک می‌کند. شکل ۲، روند نمای کلی تحلیل سیگنال تابع پاسخ فرکانسی ناشی از آزمایش آزمایشگاهی تا بررسی کشیدگی طیفی سیگنال به روش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

برای کاهش نشت طیفی، پنجره هنینگ به سیگنال نیرو و پنجره نمایی به سیگنال پاسخ اعمال شده است. این چیدمان آزمایشگاهی امکان شناسایی دقیق خواص دینامیکی تیر را با حداقل خطا فراهم می‌کند که می‌تواند برای اعتبارسنجی مدل‌های المان محدود و پیش‌بینی رفتار سازه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۳، چیدمان اصلی آزمایش تجربی به همراه تجهیزات را نشان می‌دهد.

STAR پردازش می‌شوند، به‌طوری‌که با استفاده از تبدیل فوریه سریع، توابع پاسخ فرکانسی (FRF) محاسبه شده و با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی مودال مانند POLY MAX پارامترهای مودال شامل فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل‌های مودال استخراج می‌گردند. برای افزایش دقت، هر آزمایش سه بار و با تعداد گره‌های متفاوت تکرار شده و میانگین نتایج مورد استفاده در نزدیک‌ترین حالت به نتایج حل عددی و تحلیلی قرار گرفته است. در پردازش سیگنال،



شکل ۳: (a) چیدمان آزمایش برای تیر دوسر آزاد، (b) تحریک تیر در شش گره متوالی، (c) اندازه‌گیری پاسخ با دستگاه تحلیل گرد شبکه

$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ تعریف گردید. هندسه تیر به‌صورت یک بخش سه‌بعدی (3D Part) در ماژول Part با استفاده از ابزار Extrude مدل‌سازی شد. برای مش‌بندی از المان‌های مکعبی خطی C3D8R با کنترل کیفیت aspect ratio کمتر از ۳ استفاده شد. تراکم مش در جهت طولی ۵۰ المان و در جهت‌های عرضی و ضخامت به ترتیب ۱۰ و ۵ المان تعیین شد که در مجموع ۲۵۰۰ المان با خطای همگرایی کمتر از ۰/۵٪ و تحلیل حساسیت ۵٪ در پارامترهای فیزیکی ساختار

۴- شبیه‌سازی و حل عددی

تحلیل فرکانس طبیعی تیر آلومینیومی دوسر آزاد در آباکوس از طریق روش اجزای محدود و حل مسئله مقادیر ویژه انجام می‌شود. مدل یک تیر آلومینیومی دو سر آزاد با ابعاد $(54 \times 4.5 \times 0.5)$ سانتی‌متر در محیط آباکوس CAE ایجاد شد. خصوصیات مادی آلومینیوم شامل مدول الاستیسیته $E=70 \text{ GPa}$ ، ضریب پواسون $\nu=0.33$ و چگالی

۶- نتایج و بحث (بخش اول: آنالیز مودال)

در این بخش نتایج حل تحلیلی، تجربی و عددی سیستم به صورت جداگانه به گونه ای بررسی شده است که نتایج آزمایش تجربی به صورت توابع پاسخ فرکانسی و شکل مودها در نرم افزار استار نمایش داده شده و در انتها صحت سنجی و مقایسه فرکانس ها و شکل مودهای ساختار تحریک شده در تمامی روش های حل، آورده شده است.

۶-۱- نتایج فرکانس طبیعی حاصل از حل تحلیلی

جدول ۱، نتایج حاصل از حل تحلیلی سیستم را با توجه به تعداد گره های مورد بررسی نشان می دهد. به صورت کلی با افزایش تعداد نقاط تحریک و β_n ، مقادیر فرکانس های طبیعی بیش تر می شود. از آن جا که در فرکانس های پایین تر حساسیت ارتعاشی سیستم بیشتر مورد توجه قرار می گیرد، کم ترین فرکانس سیستم در گره اول به میزان ۸۹/۹ هرتز و بالاترین فرکانس سیستم در گره ششم به مقدار قابل توجه ۱۶۷۷/۲ هرتز تغییر پیدا کرده است. علاوه بر حل تحلیلی به صورت دستی، حل تحلیلی به وسیله روش circle fitting در نرم افزار متلب انجام شد. شکل مودهای حاصله از حل تحلیلی نشان می دهد که با افزایش فرکانس طبیعی، نوسانات پیچیده تری با توجه به تحریک وارده بر سیستم مشاهده شده و به صورت سینوسی امتداد می یابد

جدول ۱: فرکانس های طبیعی در شش گره برای حل تحلیلی

فرکانس طبیعی (هرتز)	β_n	مود n ام
۸۹/۹	۴/۷۳	۱
۲۴۷/۶	۷/۸۵	۲
۴۸۵/۲	۱۱/۰۰	۳
۸۰۲/۶	۱۴/۱۴	۴
۱۲۰۰/۰	۱۷/۲۹	۵
۱۶۷۷/۲	۲۰/۴۲	۶

۶-۲- نتایج فرکانس طبیعی حاصل از Circle Fitting

از آن جا که روش Circle Fitting تجمع فرکانس های طبیعی را با توجه به بیش ترین مقدار $\frac{d\omega}{d\theta}$ نشان می دهد، از روش حداقل مربعات برای تعیین پارامترهای دایره استفاده شده است. نتایج حاصل از این روش داده های تصادفی فرکانس های طبیعی را بر روی یک دایره با نویز گوسی ۰/۱ تولید کرده، همچنین خطای RMS را به میزان ۰/۱۱۹۸۷ نشان می دهد. نکته قابل توجه این است که برای فرکانس دوم،

ایجاد نمود. در ماژول Step، یک مرحله تحلیل Frequency با استخراج ۱۲ فرکانس اول (۶ فرکانس صلب + ۶ فرکانس انعطافی) تعریف شد. پارامترهای حل گر شامل Lanczos eigensolver با تنظیم Normalize مود شکل ها روی Mass matrix انتخاب گردید.

۵- تخمین کشیدگی طیفی با روش تبدیل موجک و

تبدیل فوریه زمان- کوتاه

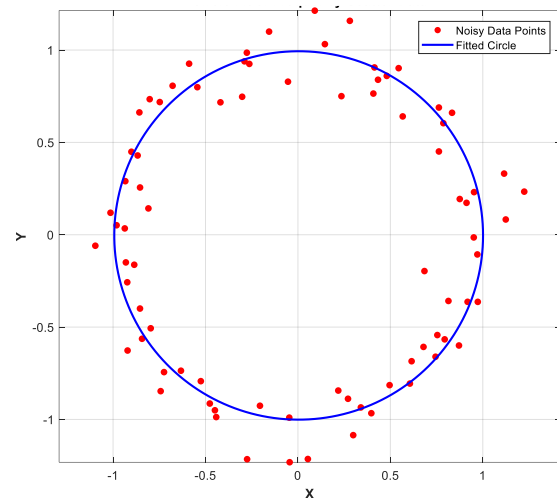
پس از استخراج فرکانس های طبیعی یک تیر آلومینیومی دو سر آزاد تحت تحریک ضربه ای چکش، برای تخمین کشیدگی طیفی تابع پاسخ فرکانسی به دست آمده از آزمایش تجربی، از ترکیب روش تبدیل موجک و تبدیل فوریه زمان کوتاه، در محیط نرم افزار متلب استفاده شد. سیگنال پاسخ فرکانسی با فرکانس نمونه برداری $fs=4000$ Hz و مدت زمان مشخص ثبت گردید. الگوریتم Fast Kurtogram با استفاده از تجزیه چندمقیاسه موجک در سطوح مختلف (nlevel) پیاده سازی شد که هر سطح دارای پهنای باند $bw=fs/2^{(level+1)}$ است. برای هر باند فرکانسی فیلتر $butter(6,[f_low,f_high]/(fs/2),'bandpass')$ طراحی و سیگنال فیلتر شده $x_filtered=filter(b,a,x)$ محاسبه گردید. پوش سیگنال از طریق تبدیل هیلبرت $x_envelope=abs(hilbert(x_filtered))$ استخراج و سپس به پنجره هایی با طول $window_size=round(fs/20)$ تقسیم شد. کشیدگی محلی برای هر پنجره با فرمول $kurt=(mean(((segment-\mu)/\sigma)^4)-3)/(\mu/\sigma)$ محاسبه شده و ۹۰ امین صدک این مقادیر به عنوان شاخص کشیدگی هر باند انتخاب گردید. برای تقویت دقت تشخیص فرکانس های رزونانس، ضرایب تقویت متناسب با ارتفاع و پهنای پیک ها در نقاط مشخص طیف اعمال شد. نتایج حاصل از Fast Kurtogram نشان می دهد که حداکثر مقادیر کشیدگی در فرکانس های رزونانس اتفاق می افتد که با مقادیر تئوری فرکانس های طبیعی تیر دو سر آزاد $f_n=(\lambda n^2/2\pi)\sqrt{(EI/\rho AL^4)}$ مطابقت دارد. میانگین کشیدگی محاسبه شده برای کل طیف نشان دهنده حضور قوی رزونانس ها در سیگنال است. مقایسه نتایج با روش های کلاسیک FFT نشان می دهد که کشیدگی طیفی قابلیت بهتری در شناسایی مودهای ضعیف و تفکیک فرکانس های نزدیک دارد. این روش به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات ناگهانی در سیگنال، برای تشخیص آسیب های محلی و تحلیل رفتار دینامیکی سازه ها مناسب است و امکان استخراج دقیق فرکانس های طبیعی از سیگنال های آلوده به نویز را فراهم می کند.

سیستم‌اند، در حالی که مودهای پنجم و ششم در ۱۳۰۷ و ۱۷۱۲/۷ هرتز بیشترین نقش را در پاسخ سیستم دارند و مود ششم با دامنه بالا و پهنای باند وسیع، نشان‌دهنده یک ناحیه تشدید قوی در فرکانس‌های بالا است. آنتی‌رزونانس‌ها در فرکانس‌های ۱۷۰، ۳۶۰، ۶۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۵۲۰ هرتز ناشی از تداخل مودهای مختلف باعث کاهش بازتاب سیستم می‌شوند و عمق و پهنای آن‌ها اطلاعات مهمی درباره‌ی نحوه‌ی توزیع انرژی و قدرت کوپلینگ بین مودها ارائه می‌کند. دامنه‌ی این آنتی‌رزونانس‌ها با افزایش فرکانس کاهش‌یافته و نشان‌دهنده‌ی افت انرژی در مودهای بالاتر است که به دلیل اثرات میرایی سازه‌ای و اصطکاک داخلی رخ می‌دهد. همچنین، تغییرات فاز در این نواحی، رفتار غیرخطی و اندرکنش ضعیف بین مودهای مجاور را تأیید می‌کند. تحلیل baseline متغیر نیز نشان داد که رفتار کلی سیستم با فرکانس غیرخطی است که احتمالاً ناشی از میرایی فرکانسی، غیرخطی بودن مواد سازنده، اثرات دمایی و نویز محیطی است، هرچند مودهای اصلی همچنان قابل تشخیص‌اند. نسبت Q-factor برای مودهای مختلف متفاوت بوده و نشان‌دهنده‌ی خصوصیات میرایی سیستم است؛ مودهای با Q-factor بالا میرایی کم و پایداری بالا و مودهای با Q-factor پایین میرایی بیشتر و واکنش سریع‌تر به تغییرات ورودی را نشان می‌دهند، درحالی‌که سطح نویز موجود در حدود ۲۵ درصد، صحت نتایج مودال و قابلیت استخراج پارامترها با دقت مناسب را تأیید می‌کند.

جدول ۲: فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از روش تجربی در Star

مود n ام	میرایی (هرتز)	فرکانس طبیعی (هرتز)
۱	۱/۳۳	۹۳/۲
۲	۱/۱۴	۲۵۴/۸
۳	۱/۲۶	۴۷۴/۱
۴	۱/۱۱	۸۳۵/۹
۵	۱/۰۸	۱۳۰۷
۶	۱/۰۲	۱۷۱۲/۷

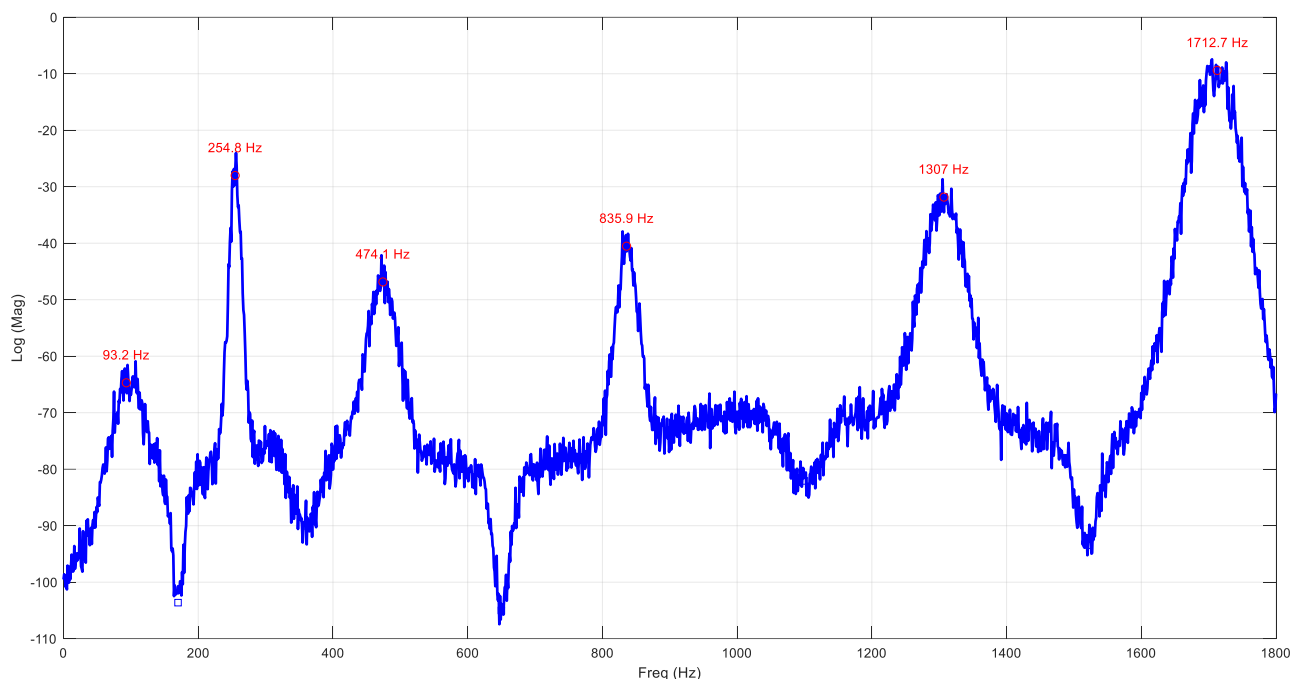
بیشترین رسپتانس با مقدار ۰/۸۶ به ثبت رسیده است. شکل ۴، نمودار پراکندگی تصادفی فرکانس‌های طبیعی را نشان می‌دهد که بیان می‌کند، دایره فیت شده با نقاط نویزی قرمز رنگ مطابقت دارد.



شکل ۴: پراکندگی داده‌های فرکانس طبیعی اطراف دایره

۳-۶- نتایج FRF حاصل از روش تجربی

داده‌های حاصل از آزمایش تجربی در نرم‌افزار STAR وارد و تحلیل شد و فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی سیستم مطابق جدول ۲ و شکل ۵ استخراج گردید. تحلیل تابع پاسخ فرکانسی نشان داد که سیستم دارای شش مود رزونانسی اصلی در فرکانس‌های ۹۳/۲، ۲۵۴/۸، ۴۷۴/۱، ۸۳۵/۹، ۱۳۰۷ و ۱۷۱۲/۷ هرتز است که الگوی پیچیده‌ای از رفتار دینامیکی را تشکیل می‌دهند و توزیع نامنظم مودها نشان‌دهنده تأثیر متغیرهایی چون جرم، سختی و میرایی در بخش‌های مختلف سیستم است. مود اول در ۹۳/۲ هرتز با پهنای باند وسیع و Q-factor پایین، بیانگر رفتار پایه‌ای سیستم و میرایی قابل توجه ناشی از تلفات ویسکوز یا اصطکاک داخلی است، در حالی که مود دوم در ۲۵۴/۸ هرتز با پهنای باند کمتر و دامنه بالاتر، رزونانسی تیز و با کیفیت بالا را نشان می‌دهد که معمولاً با مودهای خمشی یا پیچشی مرتبط است. مودهای میانی در ۴۷۴/۱ و ۸۳۵/۹ هرتز دارای پهنای باند و دامنه متعادل بوده و بیانگر تعادل انرژی ذخیره‌شده و تلف‌شده در



شکل ۵: نمودار تابع پاسخ فرکانسی سیستم تحت تحریک در نرم افزار استار

۴-۶- نتایج تحلیل تابع همبستگی

تابع همبستگی محاسبه شده نشان دهنده کیفیت ارتباط خطی بین سیگنال ورودی و خروجی سیستم در طیف فرکانسی مورد بررسی است. نتایج نشان می دهد که همبستگی در فرکانس های رزونانسی به طور قابل توجهی بالاتر از سایر نواحی است. بیشترین مقدار همبستگی در فرکانس ۱۷۱۲/۷ هرتز مشاهده می شود که با قوی ترین مود رزونانسی همخوانی دارد و این موضوع نشان دهنده غالب بودن این مود در پاسخ کلی سیستم است. همبستگی بالا در این فرکانس بیانگر پایداری و تکرارپذیری بالای اندازه گیری در این ناحیه است که برای تحلیل های دقیق مودال ضروری محسوب می شود. در نقاط آنتی رزونانس، همبستگی به طور محسوسی کاهش می یابد که بیانگر تضعیف رابطه خطی ورودی-خروجی در این نواحی است. این کاهش همبستگی می تواند ناشی از تأثیر نویز محیطی، عدم خطی های سیستم، یا تداخل مودهای نزدیک به هم باشد. در این نواحی، دقت تحلیل مودال کاهش می یابد و نیاز به روش های تحلیل پیشرفته تر برای استخراج پارامترهای مودال وجود دارد. مقدار متوسط همبستگی در حدود ۰/۷۵ قرار دارد که نشان دهنده کیفیت مناسب اندازه گیری است و در محدوده قابل قبول برای تحلیل های مهندسی قرار دارد. این مقدار نشان می دهد که عمده انرژی سیگنال خروجی از سیگنال ورودی ناشی می شود و تأثیر عوامل خارجی نظیر نویز محیطی، ارتعاشات نامطلوب، یا سایر منابع اختلال در حد قابل کنترل است. تحلیل آماری نشان

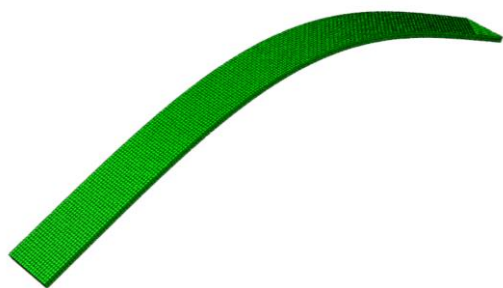
می دهد که حدود ۶۰-۷۰ درصد از طیف فرکانسی دارای همبستگی بالاتر از ۰/۸ است که برای تحلیل های مودال قابل قبول محسوب می شود. این درصد بالا نشان دهنده کیفیت مناسب تجهیزات اندازه گیری و شرایط آزمایش است. نواحی با همبستگی پایین تر معمولاً در فرکانس های آنتی رزونانس و یا در نواحی با سطح سیگنال پایین قرار دارند. کاهش همبستگی در فرکانس های بالا (بالای ۱۶۰۰ هرتز) ممکن است ناشی از تأثیر نویز و یا محدودیت های سیستم اندازه گیری باشد. این کاهش می تواند به دلیل کاهش نسبت سیگنال به نویز در فرکانس های بالا، محدودیت های پهنای باند تجهیزات، یا تأثیر مودهای فرکانس بالا که در مدل سازی در نظر گرفته نشده اند، باشد.

۵-۶- نتایج حل عددی المان محدود

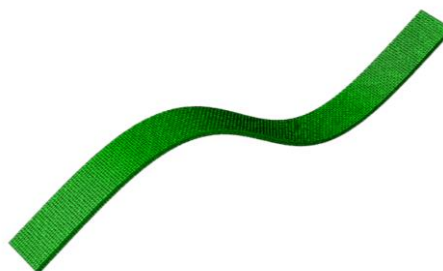
نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می دهد که فرکانس های طبیعی شش مود اول عبارتند از: ۸۹/۷، ۲۴۷/۵۱، ۴۸۵/۴۹، ۸۰۳/۰۳، ۱۲۰۰/۲ و ۱۶۷۶/۸ هرتز. این مقادیر با رفتار مشخصه تیرهای دو سر آزاد مطابقت دارد، جایی که دو مود اول معمولاً فرکانس های نسبتاً پایین تری نسبت به حالات مقید دارند. تحلیل نسبت های فرکانسی نشان می دهد که $f_4/f_1 = 8.95$ ، $f_3/f_1 = 5.41$ ، $f_2/f_1 = 2.76$ و $f_6/f_1 = 18.69$ و 13.38 است. این نسبت ها با نظریه کلاسیک تیر اوپلر-برنولی برای شرایط مرزی آزاد مطابقت دارد، جایی که فرکانس های مودال متناسب با مربع عدد موج (β_n^2) تغییر می کنند. افزایش غیرخطی فرکانس ها نشان دهنده تأثیر اینرسی چرخشی و

ارتعاشی به‌وضوح قابل تشخیص باشند. ضریب مشارکت مودی، برای مودهای فرد معمولاً بیشتر از مودهای زوج است که این امر ناشی از تقارن شکل مودها نسبت به مرکز تیر می‌باشد. بررسی توزیع تنش در طول تیر نشان می‌دهد که حداکثر تنش خمشی در مودهای اول و سوم در مرکز تیر رخ می‌دهد، در حالی که در مودهای دوم و چهارم، نقاط تنش ماکزیمم در فواصل مختلف از مرکز قرار دارند. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که تغییرات ۱٪ در مدول الاستیسیته باعث تغییر ۵/۰٪ در فرکانس‌های طبیعی می‌شود، در حالی که تغییرات چگالی تأثیر معکوس و متناسب با جذر آن دارد. مقایسه با معادلات تحلیلی نشان می‌دهد که نتایج عددی با انتظارات تئوری مطابقت دارد. برای تیر آلومینیومی با مدول الاستیسیته ۷۰ GPa، چگالی ۲۷۰۰ kg/m³ و با فرض ابعاد متعارف، فرکانس‌های به‌دست‌آمده منطقی به نظر می‌رسند. عدم وجود فرکانس‌های صفر یا منفی تأیید می‌کند که مدل به‌درستی تعریف شده است.

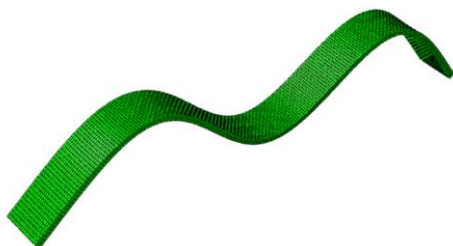
تنش‌های برشی در مودهای بالاتر است. بررسی شکل مودهای ارائه شده نشان می‌دهد که مود اول دارای یک نصف موج با حداکثر دامنه در مرکز تیر است. مود دوم نیز یک نصف موج اما در جهت عمود بر مود اول (پیچش یا خمش در صفحه دیگر) ظاهر می‌شود. مودهای سوم و چهارم شکل‌های پیچیده‌تری با نقاط گره بیشتر نشان می‌دهند. مودهای پنجم و ششم دارای تعداد بیشتری نقطه گره هستند که نشان‌دهنده افزایش پیچیدگی شکل موج در فرکانس‌های بالاتر است. مقایسه با معادلات تحلیلی نشان می‌دهد که نتایج عددی با انتظارات تئوری مطابقت دارد. برای تیر آلومینیومی با مدول الاستیسیته ۷۰ GPa، چگالی ۲۷۰۰ kg/m³ و با فرض ابعاد متعارف، فرکانس‌های به‌دست‌آمده منطقی به نظر می‌رسند. عدم وجود فرکانس‌های صفر یا منفی تأیید می‌کند که مدل به‌درستی تعریف شده است. رفتار دینامیکی مناسبی از خود نشان می‌دهد. ضریب میرایی نسبتاً کم این ماده باعث می‌شود که مودهای



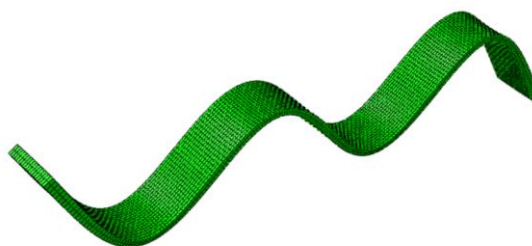
مود اول در فرکانس ۸۹/۷ هرتز



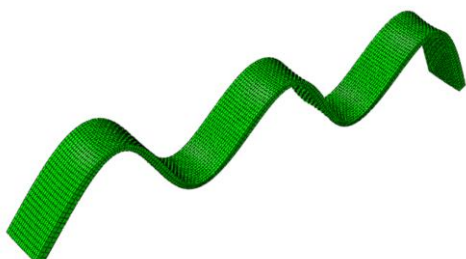
مود دوم در فرکانس ۲۴۷/۵ هرتز



مود سوم در فرکانس ۴۸۵/۴ هرتز



مود چهارم در فرکانس ۸۰۳ هرتز



مود پنجم در فرکانس ۱۲۰۰/۲ هرتز



مود ششم در فرکانس ۱۶۷۶/۸ هرتز

شکل ۶: نتایج عددی شکل مودهای خمشی تیر در شش فرکانس مختلف

۶-۶- صحت سنجی نتایج فرکانس طبیعی سیستم

در این مقاله سعی بر این شده تا پارامترهای دینامیکی نتایج آزمایش مودال یک تیر آلومینیومی تحریک شده با ضربه در شش گره مختلف، استخراج شده و نتایج حاصل از روش های حل متفاوت با یکدیگر مقایسه و صحت سنجی شود. نتایج بیانگر آن است که با افزایش شماره مود فرکانس های طبیعی سیستم افزایش یافته و شکل مودهای ارتعاشی حالت پیچیده تری را به خود می گیرند. در این بخش نتایج حاصل از حل عددی، تحلیلی و آزمایش تجربی به گونه ای بیان می شود که اعتبار سنجی فرکانس های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی بین روش های حل مذکور قابل بحث است. جدول ۳، صحت سنجی نتایج فرکانس طبیعی سیستم را با روش حل های مختلف به نمایش می گذارد. نتایج مقایسه فرکانس های طبیعی تیر دوسر آزاد از سه منظر مختلف، تطابق

جدول ۳: صحت سنجی فرکانس های طبیعی به دست آمده از سه روش تحلیلی- عددی- تجربی

مود	تحلیل (Hz)	عددی (Hz)	آزمایشگاهی (Hz)	خطای عددی - تحلیلی (%)	خطای تحلیلی - آزمایشگاهی (%)	خطای عددی - آزمایشگاهی (%)
۱	۸۹/۹	۸۹/۷	۹۳/۲	-۰/۲۲	۳/۶۷	-۳/۶۷
۲	۲۴۷/۶	۲۴۷/۵	۲۵۴/۸	-۰/۰۴	۲/۹۱	-۲/۸۶
۳	۴۸۵/۲	۴۸۵/۴	۴۷۴/۱	-۰/۰۴	-۲/۲۹	۲/۳۸
۴	۸۰۲/۶	۸۰۳/۰	۸۳۵/۹	۰/۰۵	۴/۱۵	۴/۰۹
۵	۱۲۰۰/۰	۱۲۰۰/۰	۱۳۰۷/۰	۰/۰۰	۸/۹۲	۸/۹۲
۶	۱۶۷۷/۲	۱۶۷۶/۸	۱۷۱۲/۷	-۰/۰۲	۲/۱۲	۲/۱۴

۶-۷- صحت سنجی نتایج با استفاده از معیار مودال اطمینان (MAC)

معیار اطمینان مودال (Modal Assurance Criterion) یکی از مهم ترین ابزارهای تطبیق مودال در تحلیل دینامیکی سازه ها است که همراه است، به طوری که مودهای اول و دوم انحراف مثبت (۳/۶۷٪ و ۲/۹۱٪) و مود سوم انحراف منفی (۲/۲۹٪) نشان می دهند.

این روند نشان دهنده اثرات سیستماتیک است که احتمالاً به دلیل اختلاف خصوصیات مواد واقعی با مقادیر فرضی (مدول یانگ، چگالی، ضریب پواسون) یا عدم تحقق کامل شرایط مرزی آزاد ایده آل در آزمایش تجربی است. مود چهارم و پنجم با خطاهای ۴/۱۵٪ و ۸/۹۲٪ نشان می دهند که در فرکانس های بالاتر اثرات میرایی و اسکوالاستیک، coupling با مودهای محلی و تأثیر شرایط محیطی (دما، رطوبت) بر خصوصیات مواد بیشتر می شود. افزایش خطا با فرکانس (به جز مود ششم) نشان دهنده محدودیت های مدل سازی کلاسیک تیر اولر-برنولی در پیش بینی رفتار دینامیکی فرکانس های بالا است که در آن اثرات

استثنایی بین روش های عددی و تحلیلی را نشان می دهد که خطای حداکثر ۰/۲۲٪ در مود اول دارند. این همگرایی تأیید می کند که مدل سازی عددی با دقت بالا انجام شده و mesh refinement و شرایط مرزی به درستی اعمال شده اند. الگوریتم حل عددی (احتمالاً روش اجزای محدود) با discretization مناسب موفق تقریب دقیق مشتقات مرتبه بالا در معادله تیر اولر-برنولی شده است.

انحراف نتایج آزمایشگاهی از مقادیر تئوری با الگوی مشخص همراه باشد. از نظر validation و verification، نتایج نشان می دهند که کد عددی به درستی اعتبار سنجی شده است (مطابقت با حل تحلیلی) اما validation آن با داده های تجربی نیاز به اعمال correction factors یا مدل سازی دقیق تر محیط آزمایشگاهی دارد.

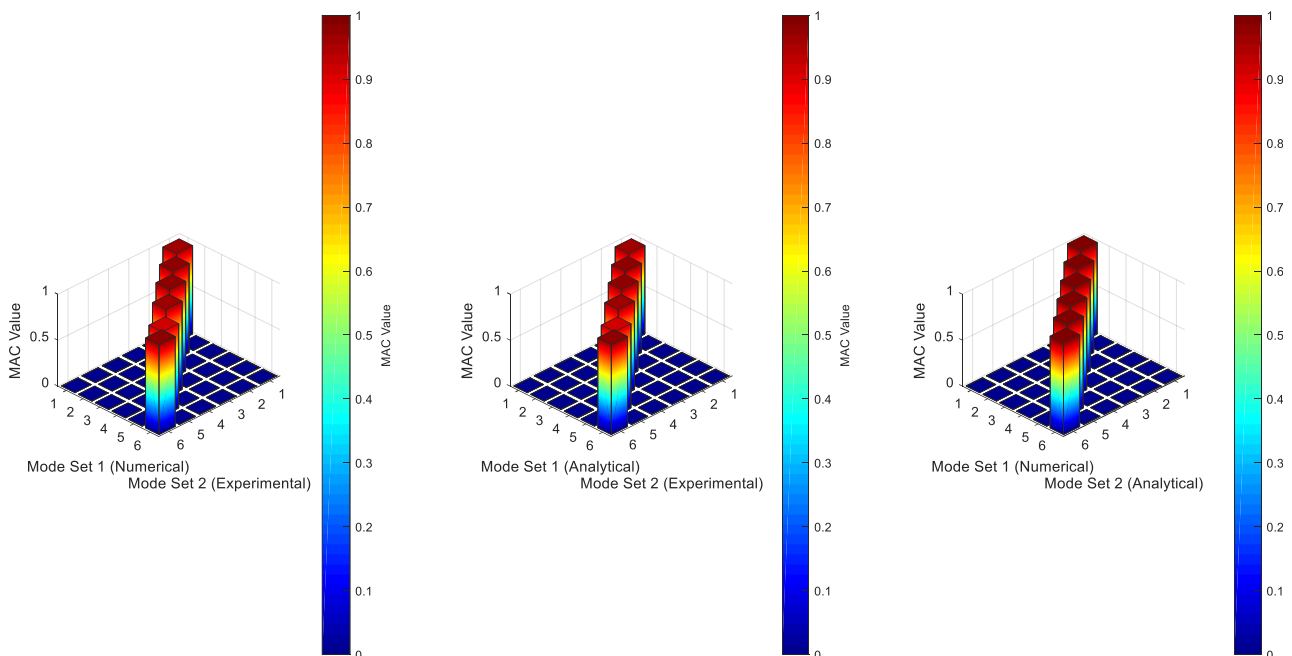
اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی قابل اهمیت می شوند. کاهش ناگهانی خطا در مود ششم (۲/۱۲٪) ممکن است به دلیل تغییر در مکانیزم تحریک یا تشدید در آزمایش و یا تأثیر مودهای غیرخطی باشد. از نظر validation و verification، نتایج نشان می دهند که کد عددی به درستی اعتبار سنجی شده است (مطابقت با حل تحلیلی) اما validation آن با داده های تجربی نیاز به اعمال correction factors یا مدل سازی دقیق تر محیط آزمایشگاهی دارد.

درجه همبستگی بین دو مجموعه شکل مود را کمی سازی می کند. مقادیر معیار مودال اطمینان بین ۰ تا ۱ تغییر می کنند که ۱ نشان دهنده تطابق کامل و ۰ نشان دهنده عدم همبستگی است. شکل ۷، نمودارهای مودال اطمینان را برای سه روش حل به صورت دو به دو نشان می دهد.

در مقایسه نتایج عددی و تجربی، MAC قطری نشان دهنده تطابق مودهای متناظر است. مقادیر MAC قطری برای شش مود اول به

رفتار سازه در فرکانس‌های بالا است. عناصر غیرقطری در این حالت نیز به‌طور متوسط کمتر از ۰/۱۲ هستند که نشان‌دهنده تمایز مناسب بین مودها است. تطابق بالای MAC در مودهای اول تا چهارم (بیشتر از ۰/۹۵) تأیید می‌کند که مدل تئوری به‌خوبی رفتار دینامیکی سازه را در این محدوده فرکانسی پیش‌بینی می‌کند. در حالت عددی-تحلیلی، این حالت بالاترین تطابق را نشان می‌دهد با MAC قطری ۰/۹۹۹۸، ۰/۹۹۹۹، ۰/۹۹۹۶، ۰/۹۹۹۵، ۱/۰۰۰ و ۰/۹۹۹۸. تطابق تقریباً کامل (۰/۹۹۹۹) نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی عددی نسبت به حل تحلیلی است. عناصر غیرقطری تقریباً صفر (کمتر از ۰/۰۰۲) هستند که نشان‌دهنده عدم وجود هرگونه تداخل عددی یا خطای محاسباتی است.

ترتیب ۰/۹۶۳، ۰/۹۷۱، ۰/۹۷۷، ۰/۹۶۱، ۰/۹۱۸ و ۰/۹۷۹ محاسبه شده است. مود پنجم با معیار مودال ۰/۹۱۸ کمترین تطابق را نشان می‌دهد که با خطای ۸/۹۲٪ فرکانسی همخوانی دارد. این کاهش تطابق به دلیل تأثیر میرایی سازه‌ای و اثرات غیرخطی در فرکانس‌های بالاتر است. عناصر غیرقطری نسبتاً پایین (کمتر از ۰/۱۵) بوده که نشان‌دهنده عدم وجود تداخل مودال یا coupling بین مودهای مختلف است. این امر تأیید می‌کند که شناسایی مودال به‌درستی انجام شده و هیچ‌گونه اشتباه در ترتیب مودها وجود ندارد. قطری برای مقایسه تحلیلی-تجربی مقادیر ۰/۹۶۶، ۰/۹۷۱، ۰/۹۷۷، ۰/۹۵۹، ۰/۸۹۲ و ۰/۹۷۹ را نشان می‌دهد. مجدداً مود پنجم با معیار مودال اطمینان ۰/۸۹۲ کمترین تطابق را دارد. این روند کاهش تطابق در مود پنجم نشان‌دهنده محدودیت‌های مدل‌سازی تئوری در پیش‌بینی دقیق



شکل ۷: نمودارهای معیار مودال اطمینان برای سه حالت (تحلیلی-عددی، تحلیلی-تجربی، تجربی-عددی)

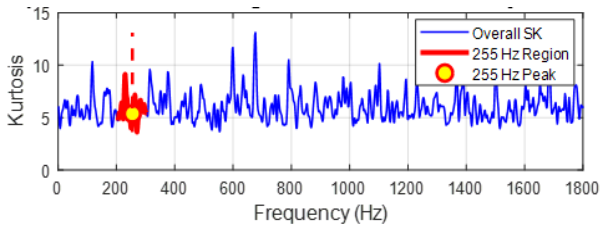
۱۳۰۷ و ۱۷۱۳ هرتز می‌باشد. بررسی توزیع کشیدگی طیفی در سطوح مختلف پهنای باند حاکی از وجود ناهنجاری‌های قابل توجه در مود دوم (۲۵۵ هرتز) است که با مقدار کشیدگی ۷/۵ بالاترین حساسیت را نسبت به عیوب احتمالی از خود نشان می‌دهد. این مود به دلیل داشتن ضریب کیفیت بالا ($Q=25$) و پهنای باند محدود، قابلیت تشخیص تغییرات کوچک در پاسخ دینامیکی سیستم را دارد. مقایسه الگوی کورتوگرام در سطوح مختلف نشان می‌دهد که مودهای ۱۳۰۷ و ۱۷۱۳ هرتز با مقادیر کشیدگی ۶/۰ و ۷/۲ به ترتیب، پهنای باند بیشتر و حساسیت متوسط به عیوب دارند. مود اول (۹۳ هرتز) با کشیدگی ۴/۸ و پهنای باند نسبتاً وسیع، کمترین حساسیت را برای تشخیص

۷- نتایج و بحث (بخش دوم: نتایج تحلیل کشیدگی طیفی برای سیگنال تابع پاسخ فرکانسی)

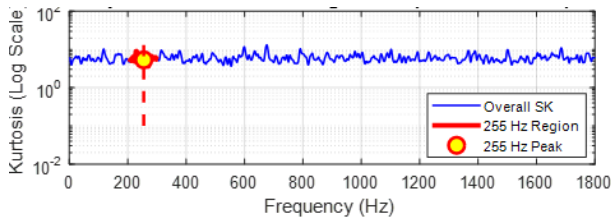
در این بخش نمودارهای استخراج شده از تحلیل کشیدگی طیفی به روش‌های تبدیل فوریه زمان و تبدیل موجک با دستورات کد متلب، برای تابع پاسخ فرکانسی ناشی از آزمایش تجربی در نرم‌افزار استار به‌صورت کامل بررسی می‌شود.

۷-۱- تحلیل نتایج کورتوگرام

نتایج حاصل از کورتوگرام سریع نشان می‌دهد که سیستم دارای شش مود رزونانس مشخص در فرکانس‌های حدودی ۹۳، ۲۵۵، ۴۷۴، ۸۳۶،



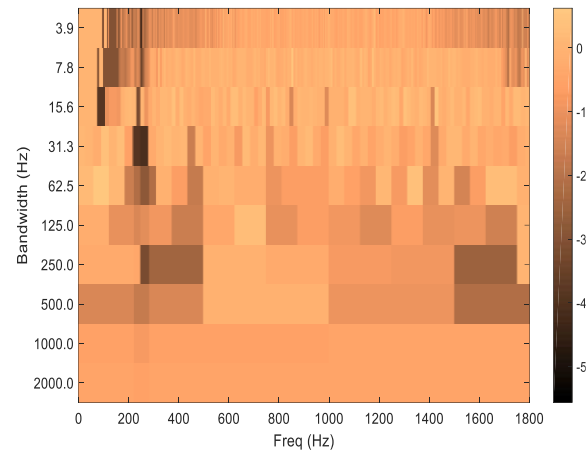
شکل ۹: نمودار کشیدگی طیفی با روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه در مقیاس خطی



شکل ۱۰: نمودار کشیدگی طیفی با روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه در مقیاس لگاریتمی

نمودار کشیدگی طیفی محاسبه شده با تبدیل موجک پیوسته با استفاده از موجک مورلت در شکل ۱۱ ارائه شده است. گراف آبی رنگ نشان دهنده توزیع کشیدگی در کل محدوده فرکانسی و منحنی قرمز ناحیه مود دوم (± 50 هرتز) را مشخص می کند. روش موجک رزولوشن فرکانسی متغیر با خصوصیات multi-resolution ارائه می دهد که برای تحلیل سیگنال های غیرایستا مناسب است. مقیاس های موجک از ۱ تا ۲۵۶ با گام ۲ انتخاب شده که طیف وسیعی از فرکانس ها را پوشش می دهد. مقادیر کشیدگی طیفی در روش موجک نسبت به تبدیل فوریه زمان-کوتاه تغییرات بیشتری نشان می دهد که ناشی از خصوصیات adaptive این روش است. پیک های کشیدگی طیفی در فرکانس های مختلف مشاهده می شود که با موقعیت مودهای تشدید همخوانی دارد. تبدیل scale-to-frequency برای تبدیل مقیاس های موجک به فرکانس قابل تفسیر استفاده شده است. این روش قابلیت تشخیص ناهنجاری های محلی را با دقت بالا و حساسیت مناسب ارائه می دهد. افزون بر این، ناحیه های با کشیدگی بالا در اطراف فرکانس های طبیعی تیر مشاهده می شوند که بیانگر تمرکز انرژی و رفتار غیرخطی موضعی در پاسخ سازه است. تحلیل جزئی تر این نواحی نشان می دهد که اثرات میرایی و ناهمگنی ماده در ضرایب کشیدگی موجک بازتاب یافته اند. در نهایت، این نتایج تأیید می کنند که استفاده از موجک مورلت ابزاری توانمند برای آشکارسازی رفتارهای گذرای دینامیکی و تفکیک دقیق مودهای نزدیک به هم است.

ناهنجاری ها نشان می دهد. توزیع انرژی در کورتوگرام بیانگر آن است که عیوب احتمالی در سیستم بیشتر در محدوده فرکانس های بالاتر و با پهنای باند محدودتر قابل تشخیص هستند. نتایج این تحلیل مبین اهمیت نظارت مستمر بر مود ۲۵۵ هرتز به عنوان شاخص کلیدی برای تشخیص زود هنگام خرابی در سیستم ارتعاشی مورد مطالعه می باشد.



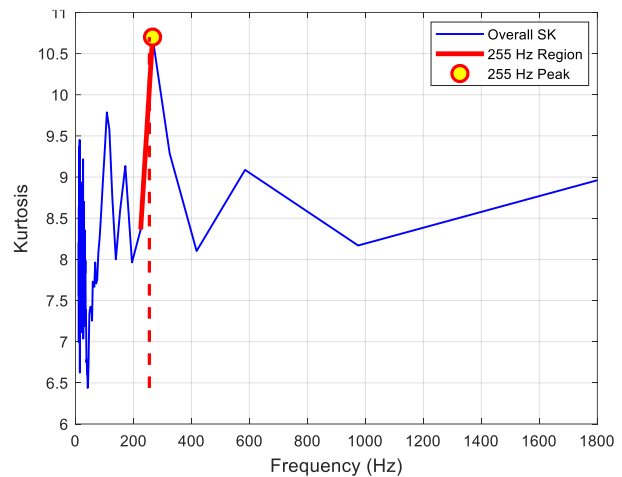
شکل ۸: نمودار کورتوگرام ناشی از تابع پاسخ فرکانسی سیستم

۲-۷- تخمین کشیدگی طیفی با روش تبدیل فوریه کوتاه-زمان

نمودار واقع در شکل ۹، نشان دهنده توزیع کشیدگی طیفی محاسبه شده با روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه در محدوده فرکانسی کامل می باشد. مقادیر کشیدگی در اکثر فرکانس ها بین ۱/۵ تا ۴ متغیر است که نشان دهنده توزیع تقریباً نرمال انرژی طیفی است. نواحی قرمز رنگ در اطراف فرکانس ۲۵۵ هرتز (± 50 هرتز) نشان دهنده افزایش محسوس تیزی سیگنال در محدوده مود دوم می باشد. این افزایش کشیدگی مؤید وجود رفتار غیرگوسی و ناپایداری دینامیکی در این فرکانس است. نمودار شکل ۱۰، در مقیاس لگاریتمی نمایش داده شده که تمایز بهتری بین نواحی مختلف ایجاد می کند. پیک های کشیدگی در سایر فرکانس ها نیز مشاهده می شود اما شدت کمتری نسبت به مود دوم دارند. پارامترهای تبدیل فوریه زمان-کوتاه شامل طول پنجره ۵۱۲، همپوشانی ۲۵۶ و $NFFT=1024$ انتخاب شده که رزولوشن فرکانسی مناسبی را تضمین می کند. این روش قابلیت تشخیص ناهنجاری های محلی در دامنه فرکانس را به خوبی نشان می دهد. مقایسه دو بخش نمودار اهمیت استفاده از مقیاس های مختلف را برای تفسیر صحیح داده ها تأکید می کند.

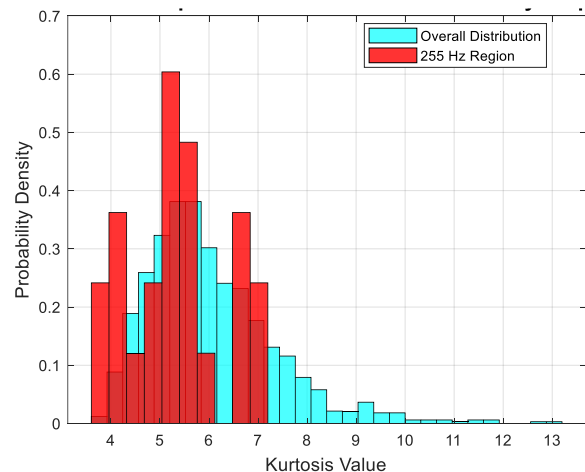
۸- نتیجه گیری

بررسی کشیدگی طیفی تابع پاسخ فرکانسی تیر آزاد-آزاد با استفاده از دو روش مختلف انجام شده است که هر کدام نگاه متفاوتی به رفتار دینامیکی سیستم ارائه می‌دهند. در این پژوهش ابتدا فرکانس طبیعی و شکل مدهای سیستم تحریک شده با ضربه به سه روش تحلیلی، عددی و تجربی به دست آمده است. نتایج فرکانس‌ها نشان می‌دهد که فرکانس‌های طبیعی سیستم در هر سه حالت با درصد خطای زیر ۱۰ درصد مقادیر قابل قبولی را در بازه بین ۰ تا ۱۸۰۰ هرتز ثبت کرده‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل کشیدگی طیفی با دو روش تبدیل موجک و تبدیل فوریه زمان-کوتاه برای سیگنال ناشی از تابع پاسخ فرکانسی سیستم نشان می‌دهد که روش موجک تصویر کلان‌تر و هموارتری از رفتار سیستم ارائه می‌دهد و قله‌های اصلی مربوط به مدهای پایین‌تر را به خوبی شناسایی می‌کند، در حالی که روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه جزئیات بیشتری از نوسانات فرکانسی نشان می‌دهد و قادر به شناسایی رزونانس‌های فرعی و هارمونیک‌ها نیز هست. تیزی سیگنال در مود دوم (تقریباً ۲۵۵ هرتز) نشان می‌دهد که این مود بیش‌تر از بقیه مدها مستعد ناپایداری دینامیکی و ناهنجاری سیستم است. توزیع کلی مقادیر کشیدگی ثبت شده سیستم دارای شکل تقریباً نرمال با میانگین حدود ۳ است که با خصوصیات آماری سیگنال‌های گاوسی مطابقت دارد. توزیع مود دوم انحراف محسوسی از توزیع کلی نشان می‌دهد و به سمت مقادیر بالاتر کشیدگی متمایل است. این انحراف نشان‌دهنده وجود رفتار غیرگاوسی و ناهنجاری دینامیکی در این فرکانس می‌باشد. دامنه تغییرات کشیدگی در مود دوم وسیع‌تر از توزیع کلی است که variability بیشتر این ناحیه را تأیید می‌کند. شفافیت ۰/۷ برای هیستوگرام قرمز امکان مقایسه بصری بهتر دو توزیع را فراهم می‌کند. 30 bin برای توزیع کلی و 10 bin برای مود دوم رزولوشن مناسبی را تضمین می‌کند. این بررسی آماری اهمیت مود دوم به عنوان ناحیه ناهنجاری را از نظر کمی تأیید می‌کند. مقایسه دو توزیع روشی قابل اعتماد برای تشخیص ناهنجاری‌های آماری محسوب می‌شود.



شکل ۱۱: نمودار کشیدگی طیفی سیگنال سیستم با استفاده از روش تبدیل موجک

هیستوگرام نرمال‌سازی شده در شکل ۱۲، نشان‌دهنده توزیع احتمالی مقادیر کشیدگی طیفی در کل محدوده فرکانسی (آبی فیروزه‌ای) و ناحیه مود دوم (قرمز) می‌باشد. توزیع کلی دارای شکل تقریباً نرمال با میانگین حدود ۳ است که با خصوصیات آماری سیگنال‌های گاوسی مطابقت دارد. توزیع مود دوم انحراف محسوسی از توزیع کلی نشان می‌دهد و به سمت مقادیر بالاتر کشیدگی متمایل است. این انحراف نشان‌دهنده وجود رفتار غیرگاوسی و ناهنجاری دینامیکی در این فرکانس می‌باشد. دامنه تغییرات کشیدگی در مود دوم وسیع‌تر از توزیع کلی است که variability بیشتر این ناحیه را تأیید می‌کند. شفافیت ۰/۷ برای هیستوگرام قرمز امکان مقایسه بصری بهتر دو توزیع را فراهم می‌کند. 30 bin برای توزیع کلی و 10 bin برای مود دوم رزولوشن مناسبی را تضمین می‌کند. این بررسی آماری اهمیت مود دوم به عنوان ناحیه ناهنجاری را از نظر کمی تأیید می‌کند. مقایسه دو توزیع روشی قابل اعتماد برای تشخیص ناهنجاری‌های آماری محسوب می‌شود.



شکل ۱۲: نمودار هیستوگرام مقادیر کشیدگی طیفی سیستم تحریک شده

[4] N. Fawazi, M. H. C. Man, and M. A. Amiruddin, "Damage detection in a free-free beam structure using reconstructed mode shape data: Experimental approach," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2798, No. 1, 2023, doi: [10.1063/5.0154234](https://doi.org/10.1063/5.0154234).

[5] C. C. Wu, "Study on rigid-body motions and elastic vibrations of a free-free double-tapered beam carrying any number of concentrated elements," *Journal of Vibration Engineering and Technology*, Vol. 10, pp. 541–558, 2022, doi: [10.1007/s42417-021-00391-x](https://doi.org/10.1007/s42417-021-00391-x).

[6] H. Qiao, Q. S. Li, and G. Q. Li, "Vibratory characteristics of flexural non-uniform Euler–Bernoulli beams carrying an arbitrary number of spring–mass systems," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, No. 4, pp. 725–743, 2002, doi: [10.1016/S0020-7403\(02\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(02)00007-3).

[7] S. Rizo-Patron and J. Sirohi, "Operational modal analysis of a helicopter rotor blade using digital image correlation," *Experimental Mechanics*, Vol. 56, No. 3, pp. 473–487, 2016, doi: [10.1007/s11340-016-0230-6](https://doi.org/10.1007/s11340-016-0230-6).

[8] F. L. M. dos Santos, B. Peeters, H. Van der Auweraer, L. C. S. Goes, and W. Desmet, "Vibration-based damage detection for a composite helicopter main rotor blade," *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, doi: [10.1016/j.csmssp.2016.01.001](https://doi.org/10.1016/j.csmssp.2016.01.001).

[9] J. M. Montalvão e Silva and A. J. M. Araújo Gomes, "Experimental dynamic analysis of cracked free-free beams," *Experimental Mechanics*, Vol. 30, pp. 20–25, 1990, doi: [10.1007/BF02322697](https://doi.org/10.1007/BF02322697).

[10] H. Cui, X. Xu, W. Peng, Z. Zhou, and M. Hong, "A damage detection method based on strain modes for structures under ambient excitation," *Measurement*, Vol. 125, pp. 438–446, 2018, doi: [10.1016/j.measurement.2018.05.004](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.004).

[11] M. A.-B. Abdo and M. Hori, "A numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shapes," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 251, No. 2, pp. 227–239, 2002, doi: [10.1006/jsvi.2001.3989](https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3989).

[12] F. Sayyad, B. Kumar, and S. Khan, "Approximate analytical method for damage detection in free-free beam by measurement of

جدول ۴: نتایج کلی به دست آمده از تحلیل کشیدگی طیفی سیگنال

توضیحات	واحد	مقدار	پارامتر/روش
محدوده آنالیز	هرتز	۰ - ۱۸۰۰	بازه فرکانسی
مود دوم	هرتز	۲۵۵	فرکانس ناهنجاری
کشیدگی کل طیف	-	۳/۰ - ۴/۵	Overall Spectral Kurtosis
کل طیف	-	۲/۸ - ۳/۲	میانگین کشیدگی کلی (تبدیل فوریه زمان-کوتاه)
حول ۲۰ الی ۲۵۵ هرتز	-	۴/۵ - ۶/۵	میانگین کشیدگی کلی (تبدیل فوریه زمان-کوتاه) در مود دوم
بیشترین پیک در ۲۵۵ هرتز	-	۷/۰ - ۹/۰	حداکثر کشیدگی (تبدیل فوریه زمان-کوتاه) در مود دوم
حول ۲۰ الی ۲۵۵ هرتز	-	۳/۸ - ۵/۵	میانگین کشیدگی کلی (موجک) در مود دوم
بیشترین پیک در ۲۵۵ هرتز	-	۶/۰ - ۸/۰	حداکثر کشیدگی (موجک) در مود دوم
Relative Anomaly	-	۰/۸ - ۱/۲	انحراف استاندارد کلی

۹- فهرست علائم

ω	فرکانس طبیعی
φ	شکل مود
ζ	ضریب میرایی
$H(\omega)$	تابع پاسخ فرکانسی
β_n	ضریب مقدار ویژه فرکانس
I	ممان اینرسی
ρ	چگالی
m	جرم
$F(\omega)$	تبدیل فوریه نیروی محرک
E	خواص مکانیکی
W_ψ	تابع تبدیل پیوسته
SK	کشیدگی طیفی

۱۰- منابع

- [1] A. M. Fadlalla, "Modal analysis of beams using finite element methods," *Journal of Civil and Construction Engineering Research*, Vol. 1, No. 1, 2024, doi: [10.1007/s40567-024-00119-9](https://doi.org/10.1007/s40567-024-00119-9).
- [2] M. Avcar, "Free vibration analysis of beams considering different geometric characteristics and boundary conditions," *International Journal of Mechanical Applications*, Vol. 4, No. 3, pp. 94–100, 2014, doi: [10.5923/j.mechanics.20140403.03](https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20140403.03).
- [3] D. H. Nguyen, L. V. Ho, T. Bui-Tien, G. De Roeck, and M. A. Wahab, "Damage evaluation of free-free beam based on vibration testing," *Applied Mechanics*, Vol. 1, No. 2, pp. 142–152, 2020, doi: [10.3390/applmech1020010](https://doi.org/10.3390/applmech1020010).

Processing, Vol. 150, p. 107264, 2021, doi: [10.1016/j.ymssp.2020.107264](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107264).

[19] H. Salarieh and M. Ghorashi, "Free vibration of Timoshenko beam with finite mass rigid tip load and flexural-torsional coupling," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, No. 7, pp. 763–779, 2006, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2006.01.008](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.01.008).

[20] S. Maiz, D. V. Bambill, C. A. Rossit, and P. A. A. Laura, "Transverse vibration of Bernoulli–Euler beams carrying point masses and considering rotatory inertia: Exact solution," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 303, nos. 3–5, pp. 895–908, 2007, doi: [10.1016/j.jsv.2006.12.028](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.12.028).

[21] J.-L. Dion, I. Tawfiq, and G. Chevallier, "Harmonic component detection: Optimized spectral kurtosis for operational modal analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, doi: [10.1016/j.ymssp.2011.07.009](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.07.009).

[22] B. Eftekharijad, M. R. Carrasco, B. Charnley, and D. Mba, "The application of spectral kurtosis on acoustic emission and vibrations from a defective bearing," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, No. 1, pp. 266–284, 2011, doi: [10.1016/j.ymssp.2010.06.010](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.06.010).

[23] G. M. Nita, "Spectral kurtosis statistics of transient signals," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 458, No. 3, pp. 2530–2540, 2016, doi: [10.1093/mnras/stw550](https://doi.org/10.1093/mnras/stw550).

[24] M. Kiymik, I. Guler, A. Dizibuyuk, and M. Akin, "Comparison of STFT and wavelet transform methods in determining epileptic seizure activity in EEG signals for real-time application," *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 35, pp. 603–616, 2005, doi: [10.1016/j.compbiomed.2004.05.001](https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2004.05.001).

axial vibrations," *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 22, No. 1, pp. 133–142, 2012, doi: [10.1177/1056789512440897](https://doi.org/10.1177/1056789512440897).

[13] H. Dai, Z. Zheng, and H. Ma, "An explicit method for simulating non-Gaussian and non-stationary stochastic processes by Karhunen–Loève and polynomial chaos expansion," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 115, pp. 1–13, 2019, doi: [10.1016/j.ymssp.2018.05.026](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.026).

[14] S. Tavares, "Aircraft structural design and life-cycle assessment through digital twins," *Designs*, Vol. 8, No. 2, p. 29, 2024, doi: [10.3390/designs8020029](https://doi.org/10.3390/designs8020029).

[15] J. Li, X. Zhu, S. S. Law, and B. Samali, "Indirect bridge modal parameters identification with one stationary and one moving sensor using stochastic subspace identification," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 446, pp. 1–21, 2019, doi: [10.1016/j.jsv.2019.01.024](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.01.024).

[16] S. Gao, F. Liu, and C. Jiang, "Improvement study of modal analysis for offshore structures based on reconstructed displacements," *Applied Ocean Research*, Vol. 110, p. 102596, 2021, doi: [10.1016/j.apor.2021.102596](https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102596).

[17] J. Pacheco-Chérrez and O. Probst, "Vibration-based damage detection in a wind turbine blade through operational modal analysis under wind excitation," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 56, No. 1, pp. 291–297, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2022.01.159](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.159).

[18] X. Liu, C. Sun, J. R. Banerjee, H. C. Dan, and L. Chang, "An exact dynamic stiffness method for multibody systems consisting of beams and rigid bodies," *Mechanical Systems and Signal*



Reinforcement Effect of Nanosilica on the Mechanical and Thermal Performance of Pine Wood Flour/Recycled Polypropylene Hybrid Composites

Jafar Ebrahimpour Kasmani^{*1} , Ahmad Samariha²

1. Associate professor, Department of Wood and Paper, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran

2. Assistant professor, Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Abstract

This study examines the influence of nanosilica incorporation on the mechanical and thermal performance of hybrid biocomposites composed of pine wood flour and recycled polypropylene. Composite formulations containing 50 wt% polypropylene, 50 wt% pine wood flour, nanosilica at four loadings (0, 3, 6, and 9 wt%), and 3 wt% maleic anhydride grafted polypropylene were compounded using a twin-screw extruder. Standardized test specimens were subsequently manufactured by injection molding. Mechanical properties—tensile and flexural strength and modulus, as well as notched Izod impact strength—alongside thermal behavior and flammability characteristics were evaluated. Increasing nanosilica content to 9 wt% resulted in reductions of 12.98% and 5.16% in tensile strength and tensile modulus, respectively. Flexural strength, flexural modulus, and notched impact strength also declined by 6.1%, 5.02%, and 10.92%, respectively. Conversely, the limiting oxygen index exhibited a 12.4% increase at the highest nanosilica loading, accompanied by higher residual char and improved thermal stability. Morphological analyses further showed fewer interfacial voids in specimens containing 3 wt% nanosilica, indicating superior fiber–matrix adhesion and reduced fiber pullout. Overall, nanosilica demonstrated a favorable contribution to the thermal performance of the composites, though excessive loading adversely affected mechanical properties due to nanoparticle agglomeration. The findings highlight the importance of optimizing nanosilica content to achieve a balanced enhancement of mechanical and thermal functionalities in bio-based polymer composites.

Keywords

Pine wood flour
recycled polypropylene
flexural strength
flexural modulus
nanosilica
residual char

Received: 30.08.2025

Revised: 02.11.2025

Accepted: 22.11.2025

*Corresponding Author

Jafar Ebrahimpour Kasmani

Email

kasmani@iau.ac.ir

1- Introduction

Polymer composites, comprising two or more distinct phases, have been widely adopted across numerous industrial sectors due to their superior mechanical and thermal performance compared with monolithic materials [1]. In recent years, the utilization of natural fibers and fillers—particularly wood flour—in polymer matrices has gained momentum owing to their cost-effectiveness, biodegradability, and renewability [2]. Although pine wood flour is commonly used in wood–plastic composites, its incorporation often leads to

diminished mechanical and thermal performance, thus necessitating the introduction of reinforcing additives such as nanomaterials [3].

Nanosilica, characterized by its high specific surface area, exceptional thermal stability, and strong potential for interfacial bonding, has been widely reported as an effective reinforcement agent in polymer-based composites [4]. Prior studies have demonstrated that nanosilica can enhance strength, toughness, crystallinity, and thermal resistance in wood–polymer composites [5], and its role as a

How to Cite this Article:

[1] J. E. Kasmani and A. Samariha, "Reinforcement Effect of Nanosilica on the Mechanical and Thermal Performance of Pine Wood Flour/Recycled Polypropylene Hybrid Composites," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 241–255, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.543980.1163> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

thermal enhancer contributes to elevated degradation temperatures and improved performance in industrial applications [6].

Despite these advantages, achieving uniform nanoparticle dispersion remains a major challenge, as agglomeration can diminish the reinforcing efficiency. Moreover, environmental considerations and processing costs associated with nanomaterials must be carefully evaluated.

The present study aims to systematically assess the effect of varying nanosilica concentrations on the mechanical and thermal properties of pine wood flour/recycled polypropylene composites.

2- Materials and Methods

2.1 Materials

Recycled polypropylene was prepared by reprocessing virgin polypropylene (density: 0.952 g/cm³) supplied by Arak Petrochemical Trading Company. The polymer was melt-compounded twice using a twin-screw extruder at 180 °C and 100 rpm to obtain uniform recycled PP granules. Pine wood flour, sourced from a furniture manufacturer, was sieved (passed through 60 mesh and retained on 70 mesh) and oven-dried at 100 °C for 24 h. Maleic anhydride grafted polypropylene (98% purity) served as a coupling agent. Nanosilica (Degussa, Germany) was employed as the nanofiller.

2.2 Methods

Formulations used in this study are shown in Table 1. All components were compounded in a counter-rotating twin-screw extruder at 160 °C and 70 rpm. The high mixing efficiency of this system ensured improved homogeneity and nanosilica dispersion, which is critical for tailoring composite performance.

Table 1: Percentage Composition of the Composite in Different Treatments

No	Nanosilica (phc)	Wood Flour (phc)	Polypropylene (phc)	Compatibilizer (phc)
1	0	50	50	3
2	3	50	50	3
3	6	50	50	3
4	9	50	50	3

2.2.1 Preparation of Standard Test Specimens

The compounded granules were shaped into standardized specimens using a semi-industrial injection molding machine. Injection parameters were optimized to ensure acceptable surface quality and consistent mechanical performance. Specimens were conditioned before testing.

2.2.2 Mechanical and Thermal Properties

Tensile and flexural properties were evaluated following ASTM D638 and ASTM D747, respectively, using an Instron 1186 machine. Notched Izod impact strength was measured in accordance with ASTM D256 using a Zwick impact tester. Thermogravimetric analysis (TGA) was conducted on 5–7 mg samples using a TGA Q50 analyzer following ASTM E1131. Limiting oxygen index (LOI) was measured per ASTM D2863. Morphological observations were conducted using a JEOL JXA-840 scanning electron microscope.

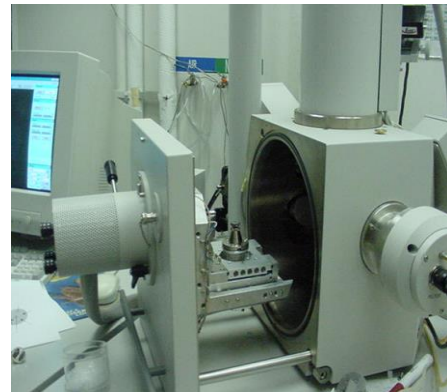


Figure 1: JXA-840 Scanning Electron Microscope (SEM)

2.3 Statistical Analysis

A one-way ANOVA (three replicates per treatment) was carried out using SPSS, followed by Duncan's multiple range test at a 95% confidence level.

3- Results and Discussion

The results indicated that nanosilica had a significant effect on tensile strength and the limiting oxygen index; however, it did not exert a statistically meaningful influence on tensile modulus, flexural strength, flexural modulus, or notched impact resistance. These findings suggest that while nanosilica effectively enhances certain key properties, it does not produce a substantial

improvement in other mechanical characteristics of the composite.

Table 2: Analysis of Variance (F-Value and Significance Level) of Processing Variables on Mechanical and Thermal Properties

Property / Variable	F-Value & Significance
Tensile Strength	6.791 *
Tensile Modulus	0.583 ns
Flexural Strength	2.526 ns
Flexural Modulus	1.604 ns
Notched Impact Strength	2.696 ns
Limiting Oxygen Index (LOI)	272.902 *

Notes: *Significant at $p < 0.05$; ns = not significant.

3.1 Tensile Properties

Nanosilica exhibited a significant effect on tensile strength but not on tensile modulus. At higher loadings, poor nanoparticle dispersion and agglomeration hindered interfacial adhesion, resulting in reduced tensile performance. Moderate nanosilica incorporation, however, contributed to enhanced interfacial stress transfer [7–10].

3.2 Flexural Properties

Nanosilica loading influenced flexural response in a similar manner. Optimal concentrations strengthened the composite structure, whereas excessive nanosilica disrupted fiber–matrix interactions and impaired flexural strength and stiffness [11, 12].

3.3 Impact Strength

Nanosilica decreased notched impact strength, attributed to increased brittleness, reduced polymer chain mobility, and the presence of nanoparticle clusters acting as crack initiators [13].

3.4 Thermal Stability and Flammability

Nanosilica increased residual char yield and delayed thermal degradation. LOI enhancement was attributed to the formation of silica-derived insulating layers, which impede heat transfer and restrict volatile release from the matrix [14]. These results confirm the beneficial role of nanosilica in improving fire resistance and thermal performance.

3.5 Morphological Analysis

SEM micrographs revealed poor interfacial bonding and noticeable voids in nanosilica-free composites. In contrast, nanosilica-containing samples exhibited improved interfacial adhesion, reduced porosity, and more coherent failure patterns, demonstrating effective stress transfer and superior morphological integrity [15].

4- Conclusion

This study demonstrated that nanosilica exerts a dual effect on wood flour/recycled polypropylene composites. While excessive nanosilica loadings negatively influenced tensile, flexural, and impact strengths due to nanoparticle agglomeration and decreased interfacial compatibility, nanosilica significantly enhanced thermal stability, residual char formation, and fire resistance.

SEM analyses confirmed improved interfacial adhesion in nanosilica-modified composites. These findings emphasize the importance of optimizing nanosilica dispersion and loading levels to obtain a desirable balance between mechanical and thermal performance, thereby advancing the development of durable and high-performance bio-based composites for industrial applications.

5- References

- [1] A. Babazadeh, M. Hadad, and M. Safarabadi, “Investigation of the effect of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on improving the mechanical properties of aluminum matrix nanocomposites,” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1197–1206, 2021 (in Persian).
- [2] A. Montazeri and M. Safarabadi, “A comparative study on adding chopped kenaf fibers to the core of glass/epoxy laminates under quasi-static indentation: Experimental and numerical approaches,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 56, No. 25, pp. 3821–3833, 2022, doi: [10.1177/00219983221112861](https://doi.org/10.1177/00219983221112861).
- [3] M. Farsi, “Effect of nano-SiO₂ and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood–plastic composites,” *Journal of Polymers*

and the Environment, Vol. 25, No. 2, pp. 308–314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0797-9](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0797-9).

[4] P. Jagadeesh, M. Puttegowda, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, “Influence of nanofillers on biodegradable composites: A comprehensive review,” *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 11, pp. 5691–5711, 2021, doi: [10.1002/pc.26235](https://doi.org/10.1002/pc.26235)

[5] M. Hadad, A. Babazadeh, and M. Safarabadi, “Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on improving mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109, No. 9, pp. 2535–2547, 2020, doi: [10.1007/s00170-020-05829-7](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05829-7).

[6] M. Ghorbani, P. Biparva, and S. Hosseinzadeh, “Effect of colloidal silica nanoparticles extracted from agricultural waste on physical, mechanical and antifungal properties of wood polymer composite,” *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 76, No. 2, pp. 749–757, 2018, doi: [10.1007/s00107-017-1254-6](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1254-6).

[7] S. Sheykhnazari, T. Tabarsa, A. Ashori, and A. Ghanbari, “Bacterial cellulose composites loaded with SiO₂ nanoparticles: Dynamic-mechanical and thermal properties,” *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 93, pp. 672–677, 2016, doi: [10.1016/j.ijbiomac.2016.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.012).

[8] S. R. Mousavi *et al.*, “Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: A review of recent case studies,” *Journal of Materials Science*, Vol. 57, No. 5, pp. 3143–3167, 2022, doi: [10.1007/s10853-021-06854-6](https://doi.org/10.1007/s10853-021-06854-6).

[9] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010,” *Progress in Polymer Science*, Vol. 37, No. 11, pp. 1552–1596, 2012, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003).

[10] B. K. Deka, M. Mandal, and T. K. Maji, “Plant fibre reinforced polymer blend/clay

[11] I. Alameri and M. Oltulu, “Mechanical properties of polymer composites reinforced by silica-based materials of various sizes,” *Applied Nanoscience*, Vol. 10, No. 11, pp. 4087–4102, 2020, doi: [10.1007/s13204-020-01530-8](https://doi.org/10.1007/s13204-020-01530-8).

[12] M. Farsi, “Effect of nano-SiO₂ and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood–plastic composites,” *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 25, No. 2, pp. 308–314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0797-9](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0797-9).

[13] R. Kumar, A. Ganguly, and R. Purohit, “Properties and applications of bamboo and bamboo fibre composites,” *Materials Today: Proceedings*, 2023, doi: [10.1016/j.matpr.2023.02.189](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.189).

[14] M. Kiaei, H. Amiri, A. Samariha, and N. Amani, “Effect of nanosilica on thermal, flammability, and morphological properties of WF/RPS-based nanocomposites,” *Cerne*, Vol. 24, No. 1, pp. 59–66, 2018, doi: [10.1590/01047760201824012502](https://doi.org/10.1590/01047760201824012502).

[15] S. S. Ray and M. Okamoto, “Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing,” *Progress in Polymer Science*, Vol. 28, No. 11, pp. 1539–1641, 2003, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002).



تأثیر تقویت‌کنندگی نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌های آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن بازیافتی

جعفر ابراهیم‌پور کاسمانی^۱، احمد ثمریها^۲

۱- دانشیار، گروه چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

۲- استادیار، گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه حاصل از آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن ضایعاتی انجام شد. برای این منظور، ترکیبی از پلی‌پروپیلن (در سطح ثابت ۵۰ درصد) و آرد چوب کاج (در سطح ثابت ۵۰ درصد) به همراه نانوسیلیس در چهار سطح (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد) و انیدرید مالئیک پیوند داده‌شده با پلی‌پروپیلن (در سطح ثابت ۳ درصد) به‌وسیله اکسترودر دو ماردونی مخلوط شدند. نمونه‌های آزمایشی استاندارد با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی تهیه گردید. خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی و مقاومت به ضربه فاق‌دار و همچنین خواص حرارتی و آتش‌گیری نمونه‌ها اندازه‌گیری و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که با افزایش نانوسیلیس تا سطح ۹ درصد، مقاومت و مدول کششی به ترتیب ۱۲/۹۸ و ۵/۱۶ درصد کاهش یافت. همچنین، مقاومت و مدول خمشی و مقاومت به ضربه فاق‌دار نیز به ترتیب ۶/۱، ۵/۰۲ و ۱۰/۹۲ درصد کاهش نشان دادند. علاوه بر این، با افزایش نانوسیلیس تا سطح ۹ درصد، شاخص اکسیژن محدود ۱۲/۴ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود مقاومت حرارتی است. همچنین، میزان خاکستر باقیمانده و ثبات حرارتی نیز با افزایش میزان نانوسیلیس افزایش یافت. این نتایج حاکی از تأثیر مثبت نانوسیلیس بر ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی چندسازه‌های ساخته‌شده از آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن ضایعاتی است و می‌تواند به بهبود عملکرد این مواد در کاربردهای مختلف کمک کند. در نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، فضاهای خالی کمتری مشاهده شد که نشان‌دهنده اتصال خوب الیاف با ماتریس و جلوگیری از جدایی آن‌ها در زمان شکست است.

کلمات کلیدی

آرد چوب کاج
پلی‌پروپیلن بازیافتی
مقاومت خمشی
مدول خمشی
نانوسیلیس
خاکستر باقیمانده

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

*نویسنده مسئول

جعفر ابراهیم‌پور کاسمانی

ایمیل

kasmani@iau.ac.ir

۱- مقدمه

چندسازه‌ها به‌عنوان مواد ترکیبی که از دو یا چند فاز مختلف تشکیل شده‌اند، به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به دلیل داشتن خواص مکانیکی و حرارتی برتر نسبت به مواد خالص، در دهه‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یکی از انواع متداول این چندسازه‌ها، از ترکیب آرد چوب و پلی‌پروپیلن ساخته‌شده است. این چندسازه‌ها به‌دلیل ویژگی‌های

زیست‌سازگاری و هزینه پایین، به‌ویژه در کاربردهای زیست‌محیطی، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱].

چندسازه‌ها، از جمله مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص مهمی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و دامنه گسترده تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی، موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۲].

How to Cite this Article:

[1] J. E. Kasmani and A. Samariha, "Reinforcement Effect of NaNosilica on the Mechanical and Thermal Performance of Pine Wood Flour/Recycled Polypropylene Hybrid Composites," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 241-255, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.543980.1163> (in Persian)



مؤثری بارهای اعمال شده را توزیع کرده و منجر به افزایش استحکام مکانیکی شوند.

ابراهیم پور کاسمانی و ثمریها (۲۰۲۵) به بررسی تأثیر سه بار باز یافت بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت حاصل از آرد چوب زبان گنجشک و پلی اتیلن بازیافتی جهت مصارف بسته بندی پرداختند. نتایج نشان داد افزایش تعداد دفعات باز یافت، تأثیر منفی بر استحکام کشش و ضریب الاستیک کشش و خمشی و مقاومت به ضربه داشت [۱۰].

الله^۵ (۲۰۲۰) به بررسی اثر مقادیر مختلف نانوسیلیس بر خواص مکانیکی پرداخته و تأکید کرده که نانوسیلیس می تواند به عنوان عامل تقویتی در پلیمرهای گرمانرم عمل کند [۱۱]. سایر محققین نیز به بهبود خواص حرارتی و مکانیکی با افزودن نانوسیلیس اشاره کرده اند. این نتایج نشان می دهد که نانوسیلیس می تواند به عنوان یک تقویت کننده مؤثر در چندسازه های آرد چوب و پلی پروپیلن عمل کند [۱۲ و ۱۳].

علاوه بر این، نانوسیلیس به عنوان یک عامل بهبود دهنده حرارتی، نقش مهمی در افزایش پایداری حرارتی چندسازه ها ایفا می کند. تحقیقات نشان داده اند که وجود نانوسیلیس می تواند دمای تخریب حرارتی چندسازه ها را افزایش دهد و از این طریق، پایداری حرارتی آن ها را بهبود بخشد [۱۴].

نانوسیلیس با ایجاد یک شبکه محکم در ماده زمینه پلیمری، می تواند انتقال حرارت را بهبود بخشد و از تجزیه زود هنگام مواد جلوگیری کند. این امر به خصوص در کاربردهای صنعتی که نیاز به دوام و پایداری حرارتی بالایی دارند، بسیار حیاتی است.

با وجود مزایای نانوسیلیس، چالش هایی نیز در استفاده از آن وجود دارد. یکی از چالش های اصلی، توزیع یکنواخت نانوسیلیس در ماده زمینه پلیمری است. تجمع نانو ذرات می تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی و حرارتی شود؛ بنابراین، انتخاب روش های مناسب برای ترکیب و پراکندگی نانوسیلیس در ماده زمینه پلیمری اهمیت دارد.

به علاوه، هزینه تولید نانوسیلیس و مسائل زیست محیطی مرتبط با تولید و استفاده از نانو مواد نیز باید در نظر گرفته شود. با این حال، با توجه به مزایای قابل توجه نانوسیلیس و پیشرفت های فناوری، می توان راهکارهایی را برای حل این چالش ها ارائه داد.

استفاده از الیاف طبیعی در مواد چندسازه، توجه قابل ملاحظه ای از سوی بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۳]. آرد چوب کاج به عنوان یک منبع طبیعی و تجدید پذیر، به سبب وزن کم و قابلیت جذب رطوبت، در تولید چندسازه های پلیمری استفاده می شود. با این حال، استفاده از آرد چوب به تنهایی می تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی و حرارتی این چندسازه ها شود. به همین دلیل، نانوسیلیس به عنوان یک ماده تقویت کننده می تواند به بهبود این خواص کمک کند [۴].

نانوسیلیس به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، خواص مکانیکی عالی و پایداری حرارتی مناسب، می تواند به طور مؤثری خواص چندسازه های پلیمری را بهبود بخشد. تحقیقات نشان داده اند که افزودن نانوسیلیس به ماده زمینه^۱ پلی پروپیلن می تواند منجر به افزایش استحکام کششی و مدول الاستیسیته این چندسازه ها شود [۵].

علاوه بر این، نانوسیلیس می تواند به عنوان یک عامل بهبود دهنده حرارتی عمل کند و دمای تخریب حرارتی چندسازه ها را افزایش دهد [۶]. این ویژگی ها باعث می شود که نانوسیلیس به گزینه ای جذاب برای تقویت چندسازه های پلیمری تبدیل شود، به ویژه در کاربردهایی که نیاز به خواص مکانیکی و حرارتی بالاتری دارند.

مطالعات مختلف نشان داده اند که افزودن نانوسیلیس به چندسازه های چوب و پلی پروپیلن منجر به افزایش استحکام و چقرمگی این مواد می شود. به عنوان مثال، خروسچل^۲ و همکاران (۲۰۱۵) به تأثیر مثبت نانوسیلیس بر پیوند الیاف و بهبود خواص حرارتی و مکانیکی اشاره کرده اند [۷].

نانو کامپوزیت ها به عنوان مواد مهندسی، به دلیل ویژگی های برجسته ای نظیر استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی، توجه قابل توجهی از سوی پژوهشگران را جلب کرده اند. بهینه سازی فرآیند توسعه و کاربرد دقیق نانو ذرات تقویت کننده، از جمله رویکردهای مؤثری هستند که جهت بهبود خواص مکانیکی این مواد به کار می روند [۸].

یزپورسکا^۳ و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش کردند که افزودن نانوسیلیس باعث بهبود اتصال بین پلی اتیلن سنگین و الیاف چوب می شود و بلورینگی^۴ و پایداری حرارتی را افزایش می دهد [۹]. یکی از ویژگی های کلیدی نانوسیلیس، توانایی آن در ایجاد پیوندهای قوی تر درون ماده زمینه پلیمری است. این پیوندهای قوی می توانند به طور

⁴ Crystallinity

⁵ Ullah

¹ Matrix

² Chruściel

³ Jeziorska

پودر نانوسیلیس^۳ تولیدشده توسط شرکت دگوسا^۴ کشور آلمان نیز در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات نانوسیلیس مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید

شاخص جریان مذاب (g/10min)	۷
چگالی (gr/cm ³)	۰/۹۶۵
مقدار انیدرید پیوند خورده (wt%)	۱٪

جدول ۲: مشخصات نانوسیلیس

Silicon Oxide Purity	SiO ₂ 99+%
APS	11-13nm
SSA	200 m ² /g
True density	2.4 g/cm ³
Bulk density	<0.10 g/cm ³
Color	White
Moisture	<2%
Weight Loss on Ignition	30%
According to Producer Information	

۲-۲- روش‌ها

درصد وزنی اجزای چندسازه‌های ساخته‌شده در جدول ۳ آورده شده است. اختلاط پلی‌پروپیلن ضایعاتی، آرد چوب، نانوسیلیس و سازگار کننده به‌صورت نسبت وزنی مشخص، توسط دستگاه اکسترودر دو ماردون^۵ (دو مارپیچه) با دمای ساخت ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ماردون ۷۰ دور در دقیقه که جهت حرکت ماردون‌های آن خلاف هم بود، در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد.

این فرآیند اختلاط به‌منظور دستیابی به توزیع یکنواخت اجزا و بهبود خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌ها طراحی شده است. استفاده از اکسترودر دو ماردون به‌دلیل توانایی بالا در همگن‌سازی و توزیع مواد در مقیاس نانو، به‌ویژه در ترکیبات پلیمری، به‌طور قابل‌توجهی بر کیفیت نهایی کامپوزیت تأثیر می‌گذارد.

هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر نانوسیلیس به‌عنوان تقویت‌کننده بر خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌های^۱ حاصل از آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن بازیافتی است. با توجه به افزایش نگرانی‌ها در مورد محیط زیست و نیاز به استفاده از مواد تجدیدپذیر، این تحقیق به‌دنبال ارائه راهکارهایی برای بهبود خواص این چندسازه‌ها با استفاده از نانوسیلیس است.

نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه مواد جدید با خواص بهینه کمک کرده و به نیازهای صنعتی پاسخ دهد. با توجه به اهمیت روزافزون استفاده از مواد سازگار با محیط زیست و بهبود عملکرد آن‌ها، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک قدم مؤثر در این راستا محسوب شود و به افزایش کاربردهای عملی این نوع چندسازه‌ها در صنایع مختلف کمک کند.

درنهایت، بررسی‌های آتی می‌تواند شامل ارزیابی دقیق‌تر اثرات نانوسیلیس بر سایر خواص فیزیکی و شیمیایی این چندسازه‌ها باشد تا به درک بهتری از رفتار آن‌ها در شرایط مختلف دست یابیم. این موضوع می‌تواند به توسعه راهکارهای نوآورانه برای بهبود عملکرد چندسازه‌ها و افزایش کارایی آن‌ها در کاربردهای مختلف منجر شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد

جهت انجام این تحقیق، پلی‌پروپیلن بازیافتی به‌طور آزمایشگاهی تهیه شد. پلی‌پروپیلن با دانسیته ۰/۹۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب از شرکت بازرگانی پتروشیمی اراک تأمین و با استفاده از یک اکسترودر دو مارپیچه، تحت دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه دو بار ذوب و گرانول شد.

آرد چوب کاج به‌عنوان تقویت‌کننده پودری در ماده زمینه پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. این آرد از یک شرکت تولیدکننده مبلمان تأمین و پس از طبقه‌بندی با دستگاه الک ارتعاشی، آرد عبور کرده از الک با مش ۶۰ و باقیمانده بر الک مش ۷۰ به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده گردید. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. همچنین، مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی‌پروپیلن^۲ به‌عنوان عامل سازگارکننده با خلوص ۹۸ درصد مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید در جدول ۱ خلاصه شده است.

³ Nanosilica (NanoSiO₂)

⁴ Degussa

⁶ Dr. Collien

¹ Composite

² Maleic Anhydride Grafted With Polypropylene (MAPP)

جدول ۳: درصد اجزای کامپوزیت در تیمارهای مختلف

ردیف	نانو سیلیس (phc)	آرد چوب (phc)	پلی پروپیلن (phc)	سازگارکننده (phc)
۱	۰	۵۰	۵۰	۳
۲	۳	۵۰	۵۰	۳
۳	۶	۵۰	۵۰	۳
۴	۹	۵۰	۵۰	۳

phc: per hundred compounds

۲-۲-۱ ساخت نمونه‌های آزمایشی استاندارد

به منظور ساخت نمونه‌های آزمایشی استاندارد، گرانول‌ها به دستگاه قالب‌گیر تزریقی^۱ تزریق می‌گردد. برای این کار از دستگاه تزریق نیمه‌صنعتی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران، موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد. دمای سیلندر تزریق در هر سه ناحیه به ترتیب ۱۶۰، ۱۵۵ و ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد، درحالی‌که دمای قالب ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. فشار تزریق ۸۰ مگا پاسکال و زمان دوره تزریق کمتر از ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

عملیات خنک‌کردن قالب با آب سرد انجام شد و نمونه‌ها جهت آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه پس از ۲ دقیقه از قالب بیرون آورده شدند (شکل ۱). این فرآیند به منظور دستیابی به نمونه‌هایی با خواص مکانیکی بهینه و کیفیت بالا طراحی شده است.



شکل ۱: نمونه‌های آزمونی ساخته شده

۲-۲-۲ اندازه‌گیری خواص مکانیکی و حرارتی

خواص مکانیکی شامل مقاومت خمشی، مدول خمشی، مقاومت به ضربه و مقاومت کششی و خواص آمیزه شامل آزمایش‌های گرماسنجی روبشی تفاضلی نانو چندسازه‌های تهیه‌شده، مورد بررسی قرار گرفتند. قبل از اینکه نمونه‌های استاندارد تهیه‌شده برای انجام آزمایش مکانیکی

استفاده شوند، به مدت دو روز در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۵۰ درصد قرار داده شدند تا با دمای محیط به تعادل برسند.

به منظور بررسی آزمایش خمش، نمونه‌ها از آیین‌نامه D-747 استاندارد ASTM^۲ و با سرعت بارگذاری ۲ mm/min از دستگاه اینسترون مدل ۱۱۸۶ استفاده شد (شکل ۲-الف).

برای بررسی استحکام کششی نمونه‌ها، از آیین‌نامه D-638-M-89 استاندارد ASTM بهره‌برداری شد. نمونه‌ها به صورت M-I و دمبلی تهیه گردیدند و سپس از دستگاه اینسترون مدل ۱۱۸۶ برای اعمال آزمایش کشش استفاده شد (شکل ۲-ب). جهت بررسی و آزمایش ضربه فاق‌دار آیزود روی نمونه‌ها از آیین‌نامه D-256 استاندارد ASTM بهره‌گیری شد. برای این منظور دستگاه آزمایشگر مقاومت به ضربه مدل Zwick انتخاب شد (شکل ۲-ج).

برای انجام گرماسنجی روبشی تفاضلی، نمونه‌هایی با وزن بین ۵ تا ۷ میلی‌گرم تهیه و در دستگاه TGA^۳ (مدل TGA Q50) ساخت شرکت TA ایالات متحده آمریکا قرار داده شدند. این آزمایش با استفاده از دستگاه موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران صورت گرفت و مطابق با استاندارد ASTM E1131 انجام شد (شکل ۲-د).

برای انجام آزمایش شاخص اکسیژن محدود^۴، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D2863، به ابعاد ۴mm × ۵mm × ۱۵mm میلی‌متر تهیه شدند.



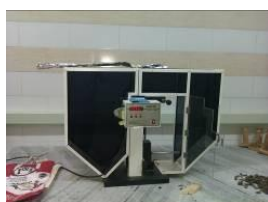
ب



الف



د



ج

شکل ۲: (الف) دستگاه Instron جهت آزمون خمش، (ب) دستگاه Instron جهت آزمون کشش، (ج) دستگاه آزمون ضربه Zwick، (د) دستگاه آنالیز حرارتی

³ Thermal gravimetric analysis⁴ Limited Oxygen Index (LOI)¹ Injection Molding² American Society for Testing and Materials

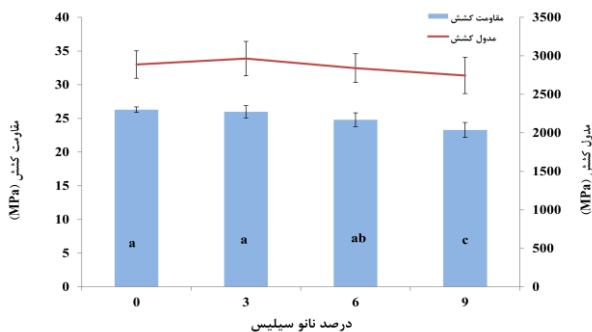
جدول ۴: تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر متغیرهای ساخت بر مقاومت‌ها

متغیرهای ساخت	مقدار F و سطح معنی‌داری
استحکام کششی	*۶/۷۹۱
ضریب الاستیک کشش	ns ۰/۵۸۳
مقاومت خمشی	ns ۲/۵۲۶
مدول خمشی	ns ۱/۶۰۴
مقاومت به ضربه فاق‌دار	ns ۲/۶۹۶
شاخص اکسیژن محدود	*۲۷۲/۹۰۲

۳-۱- تأثیر مقدار نانوسیلیس بر مقاومت و مدول کشش

تحلیل دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین مقدار نانوسیلیس را در دو گروه مختلف قرار داد، همان‌طوری‌که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مقاومت کششی مربوط به ترکیب (۰ درصد نانوسیلیس) برابر ۲۶/۲۹ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۹ درصد نانوسیلیس) برابر ۲۳/۲۷ مگاپاسکال می‌باشد شکل ۴.

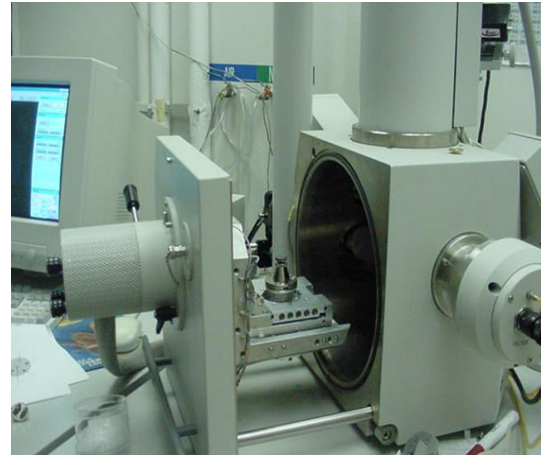
بیش‌ترین مدول کششی مربوط به ترکیب (۳ درصد نانوسیلیس) برابر ۲۹۶۳/۰۹ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۹ درصد نانوسیلیس) برابر ۲۷۴۴/۹۳ مگاپاسکال می‌باشد شکل ۴.



شکل ۴: تأثیر مستقل نانوسیلیس بر مقاومت کششی و مدول کششی

در این تحقیق، تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی نانوپندسازهای پلی‌پروپیلن ضایعاتی و آرد چوب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوسیلیس به چوب پلاستیک منجر به کاهش مقاومت کششی این ماده مرکب می‌شود. این پدیده ممکن است به دلیل توزیع نامناسب نانو در ماده زمینه چوب پلاستیک باشد. اگر نانو به‌طور یکنواخت پخش نشوند و تجمع پیدا کنند، نقاط

مورفولوژی چندسازه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل JXA-840، ساخت شرکت JEOL کشور ژاپن مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳).



شکل ۳: میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل JXA-۸۴۰

۳-۲- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بررسی، سطوح متفاوت نانوسیلیس در چهار سطح (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد) مورد مطالعه قرار گرفت. برای هر تیمار، تعداد تکرارها برابر با ۳ در نظر گرفته شد، برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمایش تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده شد. به‌منظور انجام تحلیل‌های آماری، از نرم‌افزار SPSS¹ بهره‌گیری گردید. معنی‌داری میانگین تیمارها نیز با استفاده از تحلیل چنددامنه‌ای دانکن و در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

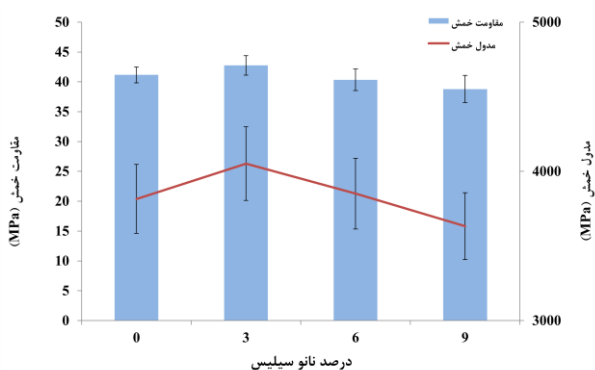
نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس بیانگر این است که تأثیر نانوسیلیس بر مدول کشش، مقاومت و مدول خمش و مقاومت به ضربه فاق‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نیست. تنها تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت کشش و شاخص اکسیژن محدود در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت نانوسیلیس در بهبود برخی از خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌ها است، اما در مورد سایر خواص، تأثیر آن به‌طور معناداری مشاهده نشد.

¹ Statistical Package for the Social Sciences

نانوذرات در ماتریس پلیمری و احتمال تجمع آن‌ها که منجر به ایجاد نقاط ضعف در ساختار می‌شود [۲۲].

علاوه بر این، بیش‌ترین مدول خمشی نیز در ترکیب حاوی ۳ درصد نانوسیلیس برابر با ۴۰۵۱/۱۵ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن در ترکیب حاوی ۹ درصد نانوسیلیس برابر با ۳۶۳۲/۴۴ مگاپاسکال مشاهده شده است (شکل ۵). این نتایج نشان می‌دهد که افزایش نانوسیلیس تا حد معین می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی کمک کند، اما پس از آن، اثرات منفی ناشی از تجمع نانوذرات و تداخل در پیوندهای بین الیاف چوب و ماتریس پلیمری ممکن است منجر به کاهش این خواص گردد [۲۳].

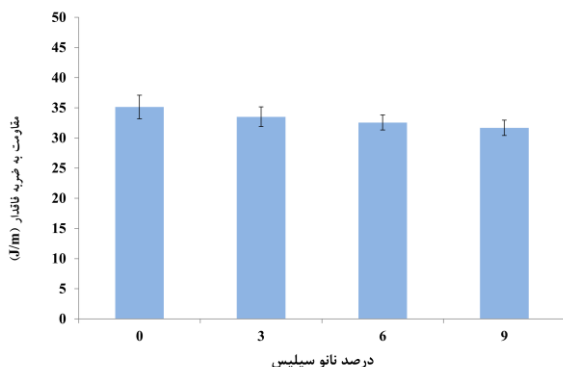
به‌طورکلی، این یافته‌ها به اهمیت کنترل دقیق مقدار و توزیع نانوسیلیس در ترکیبات کامپوزیتی اشاره دارند تا بتوان به تعادل بهینه‌ای در خواص مکانیکی دست یافت.



شکل ۵: تأثیر مستقل نانوسیلیس بر مقاومت خمشی و مدول خمشی

۳-۳- تأثیر مقدار نانوسیلیس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

بیش‌ترین مقاومت به ضربه فاق‌دار مربوط به ترکیب (۰ درصد نانوسیلیس) برابر ۳۵/۱۴ ژول بر متر و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۹ درصد نانوسیلیس) برابر ۳۱/۶۸ ژول بر متر می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۶: تأثیر مستقل نانوسیلیس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

تمرکز تنش ایجاد می‌شود و در نتیجه مقاومت کششی کاهش می‌یابد [۱۵].

همچنین، اگر سطح نانو با ماده زمینه چوب پلاستیک سازگاری نداشته باشد، چسبندگی بین آن‌ها کاهش یافته و این موضوع نیز بر مقاومت کششی تأثیر منفی خواهد داشت [۱۶]. افزودن مقادیر زیاد نانو می‌تواند به ناهمگنی و عدم یکپارچگی در ساختار منجر شود که بر خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد [۱۷].

درمجموع، برای حفظ خواص مکانیکی چوب پلاستیک هنگام افزودن نانوسیلیس، یافتن نسبت مناسب این نانو ضروری است و مطالعات بیشتری در این زمینه نیاز است.

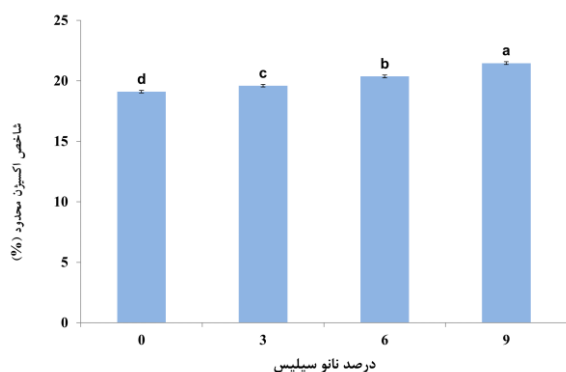
علاوه بر این، افزودن نانوسیلیس به مواد پلیمری می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی این مواد کمک کند. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش درصد نانوسیلیس تا ۳ درصد، مدول کششی و مقاومت کامپوزیت چوب-پلاستیک افزایش می‌یابد [۱۸]. این افزایش به بهبود پیوندهای بین فازی بین ماده زمینه پلیمری و الیاف چوب نسبت داده می‌شود [۱۹].

نانوسیلیس با ایجاد اتصالات قوی‌تر، امکان انتقال مؤثرتر تنش از ماده زمینه به فاز تقویت‌کننده را فراهم می‌کند، اما افزایش بیش از حد نانوسیلیس (بیش از ۳ درصد) می‌تواند منجر به کاهش مدول کششی شود. این کاهش به دلیل تجمع ذرات نانو و ایجاد نقاط تمرکز تنش در ساختار است [۱۹]. نانوسیلیس به علت انرژی سطحی بالا تمایل به تجمع دارند و این موضوع می‌تواند باعث ایجاد پراکنش نامناسب و کلوخه‌ای شدن در بستر چندسازه شود [۲۰].

همچنین، کاهش خاصیت تر کنندگی پلیمر در اثر استفاده از مقادیر بالای نانوسیلیس منجر به اتصال نامناسب الیاف لیگنوسولوزی و ماده زمینه می‌شود [۲۱]. این یافته‌ها اهمیت تنظیم نسبت نانوسیلیس در ترکیب‌های چوب-پلاستیک را برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی و عملکرد کلی این چندسازه‌ها مورد تأکید قرار می‌دهند.

۳-۲- تأثیر مقدار نانوسیلیس بر مقاومت و مدول خمشی

نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقاومت خمشی مربوط به ترکیب حاوی ۳ درصد نانوسیلیس است که برابر با ۴۲/۷۵ مگاپاسکال می‌باشد. در مقابل، کمترین مقدار مقاومت خمشی مربوط به ترکیب حاوی ۹ درصد نانوسیلیس است که برابر با ۳۸/۷۹ مگاپاسکال ثبت شده است (شکل ۵). این کاهش در مقاومت خمشی با افزایش درصد نانوسیلیس ممکن است به دلایل مختلفی نسبت داده شود، از جمله توزیع نامناسب



شکل ۷: تأثیر مستقل نانوسیلیس بر شاخص اکسیژن محدود

۳-۵- گرماسنجی وزنی

نتایج میزان خاکستر باقیمانده مربوط به آنالیز حرارتی در جدول ۳ مشاهده می‌شود. با افزایش میزان نانوسیلیس میزان خاکستر باقیمانده افزایش یافت. تأثیر درصد نانوسیلیس بر کاهش وزن چندسازه پلی‌پروپیلن ضایعاتی/آرد چوب در سطح ۵۰ درصد در طول زمان گرمادهی (از دمای ۲۵ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) در جدول ۳ نشان داده شده است. این جدول دمای تخریب در درصدهای مختلف کاهش وزن و وزن باقیمانده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برای نانو چندسازه چوب پلاستیک را نشان می‌دهد. افزودن نانوسیلیس نیز تخریب مرحله اول را سرعت می‌بخشد و زغال باقیمانده بیشتری تولید می‌کند. (جدول ۵).

جدول ۵: آنالیز گرمایی کامپوزیت چوب پلاستیک

درصد نانوسیلیس کاهش وزن	۵٪	۱۰٪	۲۰٪	۴۰٪	۶۰٪	۸۰٪	۹۰٪	وزن باقیمانده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد
۰	۲۷۴	۳۰۱	۳۸۴	۴۶۱	۴۷۳	۴۸۶	۴۹۸	۷/۶۰
۳	۲۷۳	۲۹۹	۳۷۴	۴۶۰	۴۷۳	۴۸۶	۵۵۸	۹/۶۹
۶	۲۷۲	۲۹۷	۳۶۲	۴۵۶	۴۷۰	۴۸۶	+۷۱۴	۱۲/۹۰
۹	۲۶۸	۲۹۳	۳۵۵	۴۵۳	۴۶۹	۴۸۶	+۷۱۴	۱۴/۳۴

کرده و مقاومت در برابر اشتعال و پخش حریق را افزایش می‌دهند [۲۵]. در مواجهه با حرارت، سیلیس تجزیه‌شده و لایه‌ای عایق از سیلیکات ایجاد می‌کند که مانع از رسیدن اکسیژن به سطح ماده می‌شود. همچنین، نانوسیلیس با بهبود پیوندهای بین ماده زمینه پلیمری و الیاف چوب، توزیع چوب در ماده زمینه پلیمری را بهبود می‌بخشد و این امر منجر به کاهش مسیرهای احتراق و افزایش مقاومت در برابر آتش‌سوزی می‌شود [۲۶].

در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۹ درصد وزنی، مقاومت به ضربه فاق‌دار چندسازه چوب پلاستیک کاهش می‌یابد. وجود پرکننده‌های سخت معمولاً باعث کاهش استحکام ضربه می‌شود. در پلیمرهای سخت و شکننده، ترک به راحتی رشد می‌کند و نانوذرات به عنوان نقاط شروع کننده ترک عمل می‌کنند. این کاهش مقاومت به ضربه قابل پیش‌بینی بود، زیرا حضور نانوسیلیس سبب تردتر شدن چندسازه‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت به ضربه می‌شود. وجود نانوذرات در ماده زمینه پلیمری قابلیت تحرک زنجیره‌ها را کاهش می‌دهد و نقاط پرتنش را ایجاد می‌کند که می‌تواند محل شکست و ترک باشد [۲۴].

۳-۴- تأثیر مقدار نانوسیلیس بر شاخص اکسیژن محدود

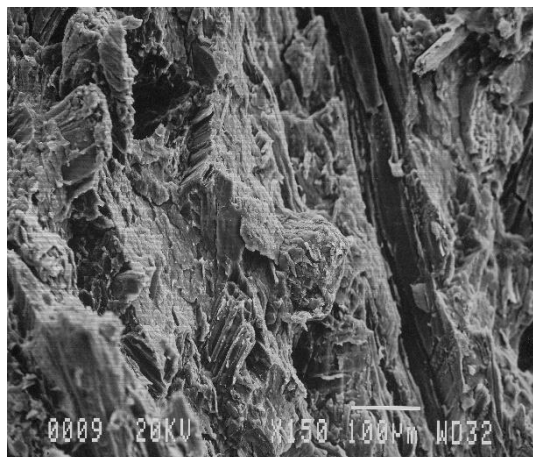
تحلیل دانکن، سطوح مختلف مقادیر نانوسیلیس را در چهار گروه مختلف قرار داد (شکل ۷). همان‌طوری که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۹ درصد وزنی، شاخص اکسیژن محدود افزایش معنی‌داری یافته است. بیش‌ترین شاخص اکسیژن محدود مربوط به استفاده از ۹ درصد وزنی نانوسیلیس برابر ۲۱/۴۷ درصد و کمترین مقدار آن مربوط به استفاده از ۰ درصد وزنی نانوسیلیس برابر ۱۹/۱ درصد می‌باشد.

میزان خاکستر باقیمانده در چهار نمونه کامپوزیت هنگام استفاده از ۰ تا ۹ درصد نانوسیلیس به ترتیب برابر است با ۷/۶۰، ۹/۶۹، ۱۲/۹۰ و ۱۴/۳۴ درصد.

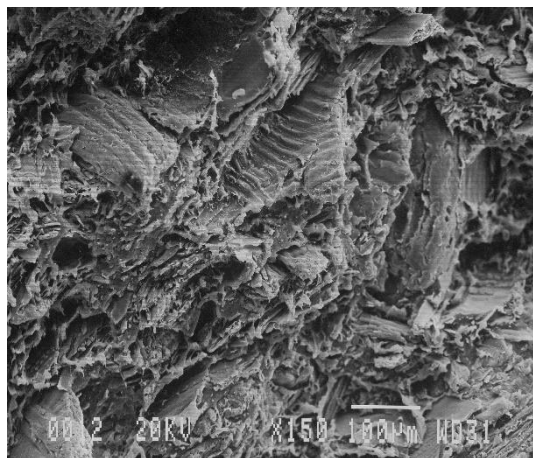
با افزودن نانوذرات سیلیس به چندسازه‌های چوب-پلاستیک، شاخص اکسیژن محدود افزایش می‌یابد. این افزایش به دلایل مختلفی نسبت داده می‌شود. نانوسیلیس به عنوان یک عامل آتش‌بندی عمل

درصد نانوسیلیس، پیوند بسیار خوبی بین ماتریس و الیاف مشاهده می‌شود.

افزایش نانوسیلیس تا ۳ درصد موجب بهبود چسبندگی بین پلیمر و آرد چوب می‌شود و شکست در ذرات آرد چوب هم‌زمان با شکست پلیمر رخ می‌دهد. همچنین، نانوسیلیس از خروج گازهای فرار و آتش‌زا از خلل و فرج جلوگیری کرده و شاخص اکسیژن را افزایش می‌دهد [۲۸].



الف



ب

شکل ۸: تصویر میکروسکوپ الکترونی حاوی ۵۰ درصد آرد چوب و الف (۰٪ نانوسیلیس) و ب (۳٪ نانوسیلیس)

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و حرارتی نانوپندسازه‌های حاصل از آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن ضایعاتی پرداخت. نتایج نشان داد که با افزایش نانوسیلیس تا سطح ۹ درصد، خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی، مدول کششی، مقاومت و مدول خمشی و همچنین مقاومت به ضربه فاق‌دار به ترتیب ۱۲/۹۸،

با افزایش درصد نانوسیلیس تا ۹ درصد، این نانوذرات به‌عنوان پرکننده‌های غیرقابل اشتعال عمل کرده و میزان مواد قابل احتراق در ساختار کامپوزیت را کاهش می‌دهند که در نتیجه شاخص اکسیژن محدود افزایش می‌یابد [۲۷]؛ بنابراین، افزودن نانوسیلیس می‌تواند به‌طور مؤثری مقاومت در برابر آتش‌سوزی و شاخص اکسیژن محدود این مواد را بهبود بخشد.

ثبات حرارتی چندسازه‌ها یکی از پارامترهای کلیدی برای فرایندها و کاربردهای این مواد است. تولید برخی از چندسازه‌ها نیازمند اختلاط الیاف و ماده زمینه در دماهای بالا می‌باشد. در این راستا، تخریب حرارتی مواد لیگنوسلولزی می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر خواص چندسازه‌ها بگذارد. برای بررسی پایداری حرارتی و روند تجزیه ناشی از حرارت، از تجزیه گرماسنجی وزنی به‌عنوان ابزاری مؤثر استفاده می‌شود.

علاوه بر این، در مطالعه‌ای دیگر که توسط هو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱ انجام شد، مشاهده شد که با افزودن ۳ درصد وزنی نانوسیلیس به کامپوزیت پلی‌پروپیلن/چوب، دمای شروع تجزیه از ۳۶۳ به ۳۷۷ درجه‌سانتی‌گراد افزایش یافت. این بهبود در پایداری حرارتی به‌دلیل توزیع مناسب نانوذرات در ماده زمینه پلیمری و تشکیل لایه محافظ سیلیکاتی بر روی سطح ذرات چوب گزارش شده است [۲۷].

به‌طور کلی، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیس به چندسازه‌های چوب-پلاستیک می‌تواند موجب بهبود قابل‌توجهی در پایداری حرارتی و به تأخیر انداختن تجزیه حرارتی این مواد شود.

۳-۶- میکروسکوپ الکترونی پویشی

با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی، توزیع و سازگاری آرد چوب و ماتریس در نمونه‌های نانوپندسازه حاوی ۵۰ درصد آرد چوب و ۰ و ۳ درصد نانوسیلیس بررسی شده است. شکل ۸ (الف و ب) سطوح شکست این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در نمونه با ۰ درصد نانوسیلیس، ذرات آرد چوب به‌طور سالم از پلیمر خارج می‌شوند و فواصل و شکاف‌هایی اطراف آن‌ها وجود دارد که نشان‌دهنده برهم‌کنش ضعیف بین آرد و پلیمر است. این فضاهای خالی دلالت بر اتصال ضعیف دارد.

با افزایش نانوسیلیس به ۳ درصد، سازگاری بهبودیافته و منافذ و فضاهای خالی کاهش می‌یابد. در این حالت، پیوند و چسبندگی بین الیاف و ماتریس بهتر و یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین، در سطح ۳

۵- منابع

- [1] D. J. Gardner, Y. Han, and L. Wang, "Wood-plastic composite technology," *Current Forestry Reports*, vol. 1, no. 3, pp. 139–150, 2015, doi: [10.1007/s40725-015-0016-6](https://doi.org/10.1007/s40725-015-0016-6).
- [2] A. Babazadeh, M. Hadad, and M. Safarabadi, "Investigation of the effect of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on improving the mechanical properties of aluminum matrix nanocomposites," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 7, no. 4, pp. 1197–1206, 2021 (in Persian).
- [3] A. Montazeri and M. Safarabadi, "A comparative study on adding chopped kenaf fibers to the core of glass/epoxy laminates under quasi-static indentation: Experimental and numerical approaches," *Journal of Composite Materials*, vol. 56, no. 25, pp. 3821–3833, 2022, doi: [10.1177/00219983221112861](https://doi.org/10.1177/00219983221112861).
- [4] M. Farsi, "Effect of nano-SiO₂ and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood-plastic composites," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 25, no. 2, pp. 308–314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0797-9](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0797-9).
- [5] P. Jagadeesh, M. Puttegowda, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, "Influence of nanofillers on biodegradable composites: A comprehensive review," *Polymer Composites*, vol. 42, no. 11, pp. 5691–5711, 2021, doi: [10.1002/pc.26235](https://doi.org/10.1002/pc.26235).
- [6] B. K. Deka, P. Baishya, and T. K. Maji, "Synergistic effect of SiO₂, ZnO and nanoclay on mechanical and thermal properties of wood polymer nanocomposite," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 27, no. 4, pp. 464–480, 2014, doi: [10.1177/0892705712444693](https://doi.org/10.1177/0892705712444693).
- [7] J. J. Chruściel and E. Leśniak, "Modification of epoxy resins with functional silanes, polysiloxanes, silsesquioxanes, silica and silicates," *Progress in Polymer Science*, vol. 41, pp. 67–121, 2015, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.10.001).
- [8] M. Hadad, A. Babazadeh, and M. Safarabadi, "Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on improving mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites," *The*
- ۵/۱۶، ۶/۱، ۵/۰۲ و ۱۰/۹۲ درصد کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله توزیع نامناسب نانوذرات در ماده زمینه و تجمع آن‌ها نسبت داده شود که منجر به ایجاد نقاط تمرکز تنش و ضعف در ساختار کامپوزیت می‌شود.
- از سوی دیگر، با افزایش نانوسیلیس تا سطح ۹ درصد، شاخص اکسیژن محدود به میزان ۱۲/۴ درصد افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر اشتعال و پخش حریق است. نانوسیلیس با ایجاد لایه‌های عایق و بهبود پیوندهای بین ماده زمینه پلیمری و الیاف چوب، مسیرهای احتراق را کاهش داده و به‌طور مؤثری خواص آتش‌سوزی کامپوزیت را بهبود می‌بخشد.
- علاوه بر این، نتایج نشان داد که با افزایش میزان نانوسیلیس، میزان خاکستر باقیمانده و ثبات حرارتی نیز افزایش یافته است. این بهبود در پایداری حرارتی به دلیل تشکیل لایه‌های سیلیکاتی محافظ بر روی سطح ذرات چوب و تأخیر در تجزیه پلیمر نسبت داده می‌شود. این ویژگی‌ها می‌توانند به افزایش عمر مفید و قابلیت استفاده از این نانوجنس‌سازها در کاربردهای صنعتی کمک کنند.
- در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درحالی‌که افزودن نانوسیلیس می‌تواند منجر به کاهش برخی خواص مکانیکی گردد، اما در عوض، بهبود در مقاومت در برابر آتش و افزایش ثبات حرارتی را به همراه دارد؛ بنابراین، برای دستیابی به تعادل بهینه بین خواص مکانیکی و حرارتی، نیاز به مدیریت دقیق مقدار نانوسیلیس و توزیع آن در ماده زمینه پلیمری وجود دارد.
- این یافته‌ها می‌تواند به توسعه مواد جدید با عملکرد بهینه و پایدار در صنایع مختلف کمک کند.
- ریزساختار چندسازه‌ها بر روی سطوح شکست با میکروسکوپ الکترونی بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که نانوسیلیس تأثیر مثبتی بر اتصال بین الیاف سلولزی و ماتریس پلیمری دارد. فضاهای خالی در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده اتصالات ضعیف بین این دو فاز است و با افزایش نانوسیلیس، این اتصالات بهبود یافته و یکنواخت‌تر می‌شوند. همچنین، افزایش شاخص اکسیژن محدود در نمونه‌ها حاکی از عملکرد نانوسیلیس به‌عنوان مانع در برابر نفوذ گازهاست. در نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، فضاهای خالی کمتری مشاهده شد که نشان‌دهنده اتصال خوب الیاف با ماتریس و جلوگیری از جدایی آن‌ها در زمان شکست است.

- [16] S. Kalia *et al.*, "Cellulose-based bio- and nanocomposites: A review," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2011, Art. no. 837875, 2011, doi: [10.1155/2011/837875](https://doi.org/10.1155/2011/837875).
- [17] Z. Liu *et al.*, "Modification of glass fiber surface and glass fiber reinforced polymer composites: Challenges and opportunities from an organic chemistry perspective," *Current Organic Chemistry*, vol. 19, no. 11, pp. 991–1010, 2015, doi: [10.2174/1385272819666150325231544](https://doi.org/10.2174/1385272819666150325231544).
- [18] B. K. Deka, M. Mandal, and T. K. Maji, "Effect of nanoparticles on flammability, UV resistance, biodegradability, and chemical resistance of wood polymer nanocomposite," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 37, pp. 11881–11891, 2012, doi: [10.1021/ie3003123](https://doi.org/10.1021/ie3003123).
- [19] S. R. Mousavi *et al.*, "Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: A review of recent case studies," *Journal of Materials Science*, vol. 57, no. 5, pp. 3143–3167, 2022, doi: [10.1007/s10853-021-06854-6](https://doi.org/10.1007/s10853-021-06854-6).
- [20] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003).
- [21] B. K. Deka, M. Mandal, and T. K. Maji, "Plant fibre reinforced polymer blend/clay nanocomposite," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 31, no. 10, pp. 657–669, 2012, doi: [10.1177/0731684412441835](https://doi.org/10.1177/0731684412441835).
- [22] I. Alameri and M. Oltulu, "Mechanical properties of polymer composites reinforced by silica-based materials of various sizes," *Applied Nanoscience*, vol. 10, no. 11, pp. 4087–4102, 2020, doi: [10.1007/s13204-020-01530-8](https://doi.org/10.1007/s13204-020-01530-8).
- [23] M. Farsi, "Effect of nano-SiO₂ and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood-plastic composites," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 25, no. 2, pp. 308–314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0797-9](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0797-9).
- [24] R. Kumar, A. Ganguly, and R. Purohit, "Properties and applications of bamboo and bamboo fibre composites," *Materials Today: International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, no. 9, pp. 2535–2547, 2020, doi: [10.1007/s00170-020-05829-7](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05829-7).
- [9] R. Jeziorska, M. Zielecka, A. Szadkowska, M. Wenda, and L. Tokarz, "Wood-filled high-density polyethylene composites with nanosilica containing immobilized nanosilver," *Polimery*, vol. 57, 2012.
- [10] J. Ebrahimpour-Kasmani and A. Samariha, "Studying the effect of three times recycling on the thermal and mechanical properties of composites made from ash wood flour and recycled polyethylene for packaging purposes," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 93–105, 2025 (in Persian), doi: [10.22034/stme.2025.513808.1113](https://doi.org/10.22034/stme.2025.513808.1113).
- [11] Z. Ullah, "A survey on hybrid, energy efficient and distributed (HEED) based energy efficient clustering protocols for wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 112, no. 4, pp. 2685–2713, 2020, doi: [10.1007/s11277-020-07147-4](https://doi.org/10.1007/s11277-020-07147-4).
- [12] A. Lashghari and E. Ganjavi, "Investigating the effect of pressing temperature on the thermal, mechanical, and morphological properties of nanocomposites made from recycled polyethylene, nanosilica, and wood flour," *BioResources*, vol. 16, no. 2, 2021.
- [13] B. Bazyar and A. Samariha, "Thermal, flammability, and morphological properties of nanocomposites from fir wood flour and polypropylene," *BioResources*, vol. 12, no. 3, 2017.
- [14] M. Ghorbani, P. Biparva, and S. Hosseinzadeh, "Effect of colloidal silica nanoparticles extracted from agricultural waste on physical, mechanical and antifungal properties of wood polymer composite," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 76, no. 2, pp. 749–757, 2018, doi: [10.1007/s00107-017-1254-6](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1254-6).
- [15] S. Sheykhnazari, T. Tabarsa, A. Ashori, and A. Ghanbari, "Bacterial cellulose composites loaded with SiO₂ nanoparticles: Dynamic-mechanical and thermal properties," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 93, pp. 672–677, 2016, doi: [10.1016/j.ijbiomac.2016.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.012).

[27] L. Liu *et al.*, “Fabrication of green lignin-based flame retardants for enhancing the thermal and fire retardancy properties of polypropylene/wood composites,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 2422–2431, 2016, doi: [10.1021/acssuschemeng.6b00112](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00112).

[28] S. S. Ray and M. Okamoto, “Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing,” *Progress in Polymer Science*, vol. 28, no. 11, pp. 1539–1641, 2003, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002).

Proceedings, 2023, doi: [10.1016/j.matpr.2023.02.189](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.189).

[25] M. Kiaei, H. Amiri, A. Samariha, and N. Amani, “Effect of nanosilica on thermal, flammability, and morphological properties of WF/RPS-based nanocomposites,” *Cerne*, vol. 24, no. 1, pp. 59–66, 2018, doi: [10.1590/01047760201824012502](https://doi.org/10.1590/01047760201824012502).

[26] S. M. Rangappa, J. Parameswaranpillai, M. H. Kumar, and S. Siengchin, *Wood Polymer Composites*. Singapore: Springer, 2021, doi: [10.1007/978-981-16-1606-8](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1606-8).



Numerical study of subsurface crack growth in the spalling phenomenon of a spur gear tooth

Hasan Heirani^{*1} , Khalil Farhangdoost²

1. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

Gears are components that transmit rotational motion by engaging the gear teeth. Since gears are used in the power transmission system, their failure will lead to the mechanism failure. So, predicting failure factors is important to ensure a proper design. Tooth surface failure includes cases such as wear, pitting and spalling. Considering that experimental studies of fatigue phenomena are time-consuming and expensive, it is necessary to improve numerical models and bring them as close as possible to real conditions. The aim of this research is to present a numerical model to predict the subsurface fatigue crack initiation and growth under cyclic contact loading. In this study, Abaqus software was used for 2D modeling of a pair of teeth in contact. The analysis was performed using standard finite element method with progressive crack growth. The crack growth angle was determined according to the improved Richard criterion. The results showed that the maximum ΔK_{II} position, with about 9% error, has the best agreement with the experimental spalling. So, the maximum ΔK_{II} position was proposed as a criterion for determining the subsurface crack initiation position. The stress intensity factor of initial subsurface crack left and right tips is the same, and so, both tips start to grow simultaneously. In this model, the improved Richard criterion was used to determine the crack growth angle, which leads to the prediction of a spalling with dimensions close to the experimental spalling. The predicted spalling length showed a difference of about 6% compared to the experimental spalling.

Keywords

Spalling
Gear
Contact fatigue
Subsurface crack
Crack initiation and growth

Received: 30.08.2025

Revised: 22.10.2025

Accepted: 22.11.2025

*Corresponding Author

Hasan Heirani

Email

heirani@buqaen.ac.ir

1- Introduction

Gears are machine elements that transmit rotational motion and power from one shaft to another through meshing of the tooth flanks. In modern industry, the designer requires mechanical elements, including gears, that can withstand high loads at high operating speeds while having minimum size and weight. In such applications, predicting the main causes of failure is crucial to ensure an appropriate design. The primary failure mechanisms of gears are divided into two categories: tooth bending failure and failures caused by contact stresses [1]. Bending failure occurs when the bending stress in the tooth exceeds its bending fatigue strength. Surface failure

occurs when the contact stresses at the tooth surface exceed the surface fatigue strength of the teeth.

Glodez et. al. [2] proposed a new model for evaluating the pitting resistance of gear tooth flanks. In this model, the short-crack theory was employed to numerically simulate the fatigue process leading to pitting. On the basis of the computational results, they were able to estimate the service life of gear tooth flanks in terms of the number of stress cycles required for a crack to grow from its initial length to a critical length. Ding and Rieger [3] conducted an experimental study on gear tooth spalling in AISI

How to Cite this Article:

[1] H. Heirani and K. Farhangdoost, "Numerical study of subsurface crack growth in the spalling phenomenon of a spur gear tooth," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 257–269, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.544154.1164> (in Persian)



4340 steel gears and demonstrated the spalling process arising from the growth of cracks near the contact surface. Their experimental results confirmed the spalling mechanism of collapse of the ligament region, that is, the region between the crack tip and the contact surface. Ding and Gear [4] proposed a model for predicting the spalling depth of gears. They developed the computational model using numerical data obtained from finite element analysis. The spalling depth caused by contact loads and various crack sizes obtained from this model was compared with experimental results under corresponding loading conditions, demonstrating the accuracy of the proposed model. Heirani and Farhangdoost [5] proposed a two-dimensional model for predicting the initiation location and growth path of subsurface cracks on spur gear teeth. They identified the position of maximum ΔK_{II} as the subsurface crack initiation location and employed the maximum tangential stress criterion to determine the crack growth path. The results of this model showed good agreement with experimental results. Batory et. al. [6] investigated the behavior of 3D-printed spur gears made from AISI 316L steel. The gears were tested under lubricated conditions and varying loadings to study the effect of torque on pitting resistance. The gears performed satisfactorily at torques below 60 N·m, whereas a torque of 135 N·m caused pitting on the teeth.

In previous studies on gear spalling formation, the equivalent two-cylinder contact model has been used. A limited number of studies have employed the involute tooth profile; however, instead of full contact between two teeth, a parabolic distribution of Hertzian contact pressure was shifted along the tooth surface. Given that the contact point between two teeth shifts during operation, the radius of curvature and load distribution vary, so modeling the contact between two teeth with an involute profile can bring the analysis closer to the physical reality of the problem.

2- Research Methods

In this section, the problem geometry is modeled as two real contacting gear teeth. To achieve this, the involute profile of the tooth must be modeled. An initial subsurface crack is considered in the model, and the initial crack is modeled at various depths. Contact loading is applied to the tooth, and the Mode I and Mode II stress intensity factors at the crack tips are extracted. The growth path of the subsurface crack under contact loading is determined using the modified Richard model according to Eq.1, which is based on experimental crack growth results under mixed-mode loading.

Loading is applied as torque on a gear. The crack propagates progressively, and the new crack geometry is modeled until the crack tip reaches the tooth surface, resulting in the formation of spalling on the gear tooth surface. Stress field analysis and determination of stress intensity factors are performed using the finite element software Abaqus.

Figure 1 shows a gear tooth with a module of 4.5 and 24 teeth, modeled in Abaqus software according to Reference [7]. Both gears are assumed to be made of steel (42CrMo4) with a Young's modulus of 206 GPa and a Poisson's ratio of 0.3. The coefficient of friction between the contact surfaces of two gear teeth was considered as 0.04, according to reference [7]. As shown in Figure 2, the element used for meshing is CPE4R. The mesh size in the crack tip region was set to 5 μm , and the number of elements in cracked tooth was 19,150. A torque of 31 N·m is applied to the tooth.

3- Results

3.1 Fatigue crack initiation

Subsequently, an initial subsurface crack of length 25 μm , according to reference [8], was positioned at various depths from the contact surface at the pitch circle location. Upon applying loading to the gear teeth, the stress intensity factor for the left and right crack tips was calculated. Figure 3 illustrates the depth of the experimental spalling bottom from reference [8] and the position of the maximum values of the three parameters ΔK_{II} , Von Mises

stress, and Tresca stress. According to this figure, the position of the maximum ΔK_{II} shows the best correlation with the experimental spalling depth. Therefore, for the subsurface crack growth phase, the initial crack will be placed at the depth corresponding to the maximum ΔK_{II} .

3.2 Fatigue crack growth

The initial crack is placed at the location of maximum ΔK_{II} , and stress intensity factors for both crack tips are calculated. By substituting these stress intensity factor values into the improved Richard relation, Eq. 1, presented by Heirani and Farhangdoost [5], the crack growth angle at this stage can be determined.

The crack is extended at the obtained angle with a longitudinal growth of 10 μm . This process continues until the crack tips reach the tooth surface, resulting in the formation of a complete spalling. Figure 4 shows the complete path of subsurface crack growth until it reaches the surface and results in spalling formation on the gear tooth.

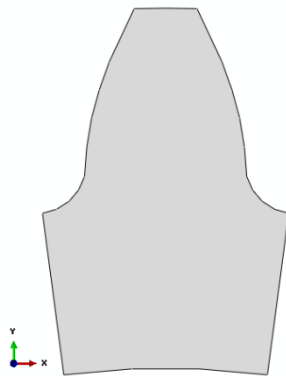


Figure 1: Tooth profile in Abaqus software

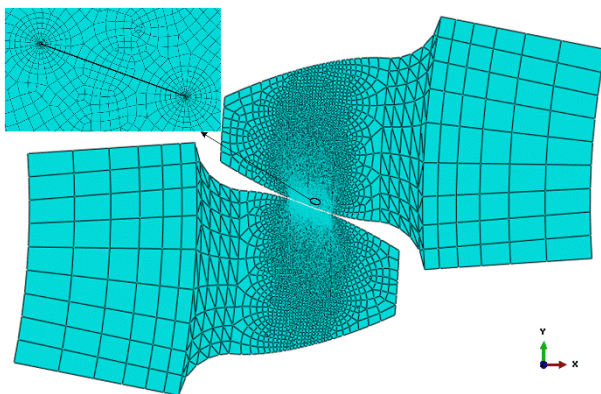


Figure 2: Tooth meshing and specialized mesh for the crack tip region

$$\theta = \beta \left[\frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right] + \gamma \left[\frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right]^2 \quad (1)$$

$$\beta = \begin{cases} 157.1, K_I > 0 \\ 125.3, K_I < 0 \end{cases}, \gamma = \begin{cases} -93.7, K_I > 0 \\ -62.5, K_I < 0 \end{cases}$$

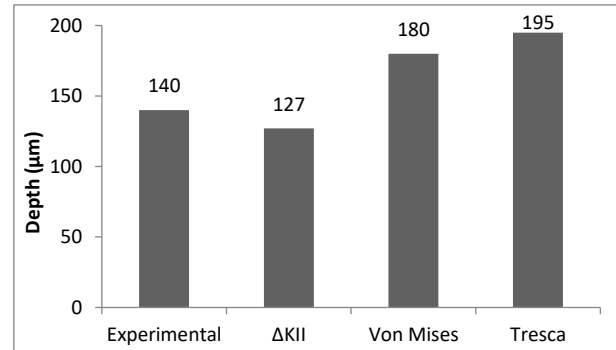


Figure 3: Experimental spalling depth and the positions of the maximum values of the ΔK_{II} , Von Mises, and Tresca stress [9]

The crack is extended at the obtained angle with a longitudinal growth of 10 μm . This process continues until the crack tips reach the tooth surface, resulting in the formation of a complete spalling. Figure 4 shows the complete path of subsurface crack growth until it reaches the surface and results in spalling formation on the gear tooth.

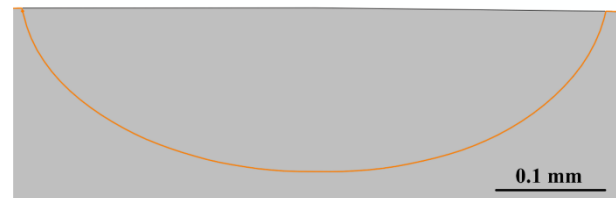


Figure 4: The subsurface crack growth path and spalling formation on the gear tooth

To verify the accuracy of the spalling shape predicted by the model presented in this dissertation, the model results are compared with the experimental spalling shape reported in [8]. Figure 5 shows the comparison between these two forms, which exhibit good dimensional agreement. The experimental spalling in this case has a depth of approximately 140 μm and a length of about 480 μm , while the simulated spalling has a depth of 127 μm and a length of approximately 450 μm . In contrast, the simulated spalling in [8], which used the maximum Von Mises stress criterion to determine the subsurface crack nucleation site and the virtual crack extension method for the crack growth phase, shows a depth of 192 μm and a length

of around 600 μm . The simulation by the model proposed in this dissertation provides a more accurate result compared to the simulation in [8].

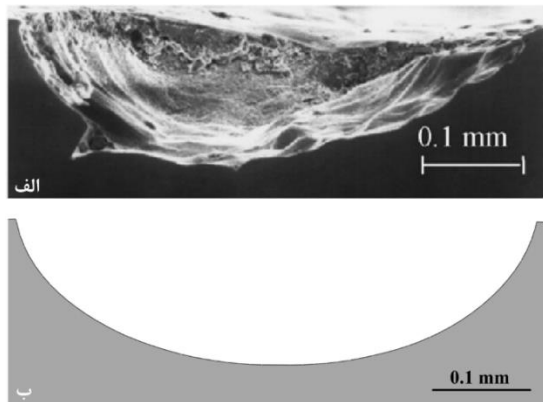


Figure 5: Spalling shape, (a) experimental [8], (b) simulation by the model presented in this research

4- Conclusion

Numerical analyses were conducted to determine the nucleation location of subsurface cracks in a simple gear tooth and to identify the growth path of the subsurface crack until it reached the tooth surface, causing complete spalling. The most important findings of these analyses are as follows:

- Among the three parameters ΔK_{II} , Von Mises stress, and Tresca stress, the location of maximum Von Mises stress has been the most commonly used indicator for the initial subsurface crack position. However, the results of this study indicated that the location of maximum ΔK_{II} has best corresponds with the bottom of the experimental spalling, with a deviation of approximately 9%. Therefore, the location of maximum ΔK_{II} is proposed as the criterion to determine the subsurface crack nucleation site.
- The stress intensity factor at the left and right tips of the initial subsurface crack is equal, resulting in simultaneous crack growth from both tips.
- The crack growth angle determined using the improved Richard criterion, as presented by Heirani and Farhangdoost, leads to the prediction of spalling dimensions closely matching the experimental spalling. The predicted spalling aperture length differs by

about 6% from the experimental spalling, whereas the reference model shows approximately 25% error.

Since the current model provides an accurate prediction of spalling dimensions on the gear tooth, it can aid in better understanding the subsequent effects such as meshing stiffness and gear vibration in the industry. Future research on the three-dimensional analysis of the spalling phenomenon could offer deeper insights into this issue.

5- References

- [1] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [2] S. Glodež, H. Winter, and H. P. Stüwe, "A fracture mechanics model for the wear of gear flanks by pitting," *Wear*, vol. 208, pp. 177–183, 1997.
- [3] Y. Ding and N. F. Rieger, "Spalling formation mechanism for gears," *Wear*, vol. 254, pp. 1307–1317, 2003.
- [4] Y. Ding and J. A. Gear, "Spalling depth prediction model," *Wear*, vol. 267, pp. 1181–1190, 2009.
- [5] K. Farhangdoost, H. Heirani, "Predicting depth and path of subsurface crack propagation at gear tooth flank under cyclic contact loading," *Journal of Solid Mechanics*, vol. 9, no. 3, pp. 587–598, 2017.
- [6] G. Batory *et al.*, "Failure analysis of 3D-printed FZG spur gears made of AISI 316L austenitic steel," *Wear*, vols. 580–581, Art. no. 206313, 2025. doi: [10.1016/j.wear.2025.206313](https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206313)
- [7] B. Zafosnik, S. Glodež, M. Ulbin, and J. Flašker, "A fracture mechanics model for the analysis of micropitting in lubricated rolling–sliding contacts," *International Journal of Fatigue*, vol. 29, pp. 1950–1958, 2007. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2006.12.015](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.12.015)
- [8] G. Fajdiga, S. Glodež, and J. Kramar, "Pitting formation due to surface- and subsurface-initiated fatigue crack growth in contacting mechanical elements," *Wear*, vol. 262, pp. 1217–1224, 2007.
- [9] K. Farhangdoost, H. Heirani, "Effect of friction coefficient and maximum contact pressure on the spalling depth of gear teeth flank," in *Fracture, Fatigue and Wear*, Belgium, 2018, pp. 63–68.



مطالعه عددی رشد ترک زیرسطحی در پدیده اسپالینگ دندان چرخ دنده ساده

حسن حیرانی^۱، خلیل فرهنگ دوست^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، بزرگمهر فائتات، قاین، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

اسپالینگ

چرخ دنده

خستگی تماسی

ترک زیرسطحی

پیدایش و رشد ترک

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

*نویسنده مسئول

حسن حیرانی

ایمیل

heirani@buqaen.ac.ir

چرخ دنده ها قطعات مکانیکی پرکاربردی هستند که حرکت دورانی را با درگیری پهلوی دندانها منتقل می کنند. از آنجایی که چرخ دنده ها در سیستم انتقال قدرت یک مجموعه به کار گرفته می شوند، خرابی آن ها منجر به از کار افتادن مجموعه خواهد گردید. پس پیش بینی عوامل خرابی برای اطمینان از یک طراحی مناسب، اهمیت می یابد. خرابی سطح دندان شامل مواردی از قبیل سایش، پیتینگ و اسپالینگ می باشد. با توجه به زمان بر و پرهزینه بودن مطالعات تجربی پدیده خستگی، باید به دنبال بهبود مدل های عددی بود و این مدل ها را به شرایط واقعی مسئله نزدیک کرد. هدف این پژوهش این است که یک مدل عددی برای پیش بینی پیدایش و رشد ترک خستگی زیرسطحی تحت بارگذاری تماسی چرخ های ارائه کند. در این مطالعه از نرم افزار آباکوس برای مدل سازی دوبعدی یک جفت دندان در تماس، استفاده شده است. تحلیل به روش اجزای محدود استاندارد با رشد نموی ترک انجام شد. زاویه رشد ترک طبق معیار بهبود یافته ریچارد تعیین گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که موقعیت AK_{II} بیشینه، با حدود ۹٪ اختلاف، بهترین تطابق را با کف اسپالینگ تجربی دارد. در نتیجه موقعیت AK_{II} بیشینه به عنوان معیار موقعیت جوانه زنی ترک زیرسطحی پیشنهاد گردید. ضریب شدت تنش برای نوک چپ و راست ترک اولیه زیرسطحی یکسان بوده و هر دو نوک به صورت همزمان شروع به رشد می کنند. در این مدل برای تعیین زاویه رشد ترک از معیار بهبود یافته ریچارد استفاده شد که منجر به پیش بینی اسپالینگ با ابعاد نزدیک به اسپالینگ تجربی می شود. طول دهانه اسپالینگ پیش بینی شده حدود ۶٪ اختلاف نسبت به اسپالینگ تجربی نشان داد.

۱- مقدمه

به دو دسته تقسیم می شوند، خرابی خمشی دندانها و خرابی های ناشی از تنش های تماسی [۱]. خرابی خمشی هنگامی رخ می دهد که تنش خمشی وارد به دندان از استحکام دوام خمشی بیشتر شود. خرابی سطحی زمانی بروز می کند که تنش های تماسی در سطح دندان از استحکام دوام سطح دندانها بیشتر شوند.

به طور کلی دو نوع خرابی خستگی سطحی به نام های پیتینگ و اسپالینگ وجود دارد. پیتینگ به صورت حفره های کم عمق (حدود 10 μm) ناشی از ترک سطحی است که بر روی سطح تماس ایجاد می شود. اسپالینگ به صورت حفره های عمیق تر (حدود 100-20 μm) ناشی از

چرخ دنده ها اجزائی از ماشین هستند که حرکت دورانی و توان را با درگیری پهلوی دندانها، از یک محور به محور دیگر منتقل می کنند. استفاده از چرخ دنده یکی از روش های انتقال حرکت دورانی است. چرخ دنده ها از گذشته مورد استفاده قرار گرفته اند و در حال حاضر نیز اجزای مهمی در بیشتر ماشین آلات هستند. در صنعت جدید، طراح به اجزای مکانیکی، از جمله چرخ دنده، نیاز دارد تا بتواند نیروهای بزرگ را در سرعت های کاری بالا تحمل کرده و اندازه و وزن آن کمینه باشد. در چنین کاربردهایی، پیش بینی عوامل اصلی خرابی برای اطمینان از یک طراحی مناسب، بسیار مهم است. عوامل اصلی خرابی چرخ دنده ها

How to Cite this Article:

[1] H. Heirani and K. Farhangdoost, "Numerical study of subsurface crack growth in the spalling phenomenon of a spur gear tooth," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 257-269, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.544154.1164> (in Persian)



ترک‌های زیرسطحی است که بر روی سطح تماس شکل می‌گیرد. شکل‌گیری اسپالینگ، پیتینگ و سایر خرابی‌ها بر روی سطح دندان چرخ‌دنده باعث تغییراتی در عملکرد چرخ‌دنده می‌شود. ازجمله این تغییرات می‌توان به ارتعاش، سفتی درگیری^۱ و نیروی انتقالی اشاره کرد. ما و همکاران [۴-۲] در پژوهش‌هایی به بررسی اثر اسپالینگ و ابعاد مختلف آن بر سفتی درگیری چرخ‌دنده پرداختند. آن‌ها اسپالینگ را به صورت یک حفره با سطح مقطع مستطیلی، بر روی سطح دندان مدل کردند. نتایج نشان داد سفتی درگیری نسبت معکوس با ابعاد اسپالینگ دارد و حضور اسپالینگ باعث کاهش سفتی درگیری می‌گردد. همچنین تأثیر وجود اسپالینگ بر ارتعاش چرخ‌دنده‌های درگیر به صورت تحلیلی مطالعه شده است. وجود یک اسپالینگ با ابعاد $2 \times 20 \text{ mm}$ باعث افزایش بیش از دو برابری پارامتر ارتعاشی چرخ‌دنده شده است.

محسن زاده و همکاران [۵] اثر به کارگیری نانو ذرات دوده و کلسیم کربنات را بر رفتار سایشی چرخ‌دنده‌ای نانوکامپوزیتی بر پایه پلی‌استال بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد افزودن این مواد باعث کاهش مقدار سایش تا ۵۸٪ نسبت به پلی‌استال خالص می‌شود.

گلودز و همکاران [۶] یک مدل جدید برای تعیین مقاومت به پیتینگ پهلوی دندان چرخ‌دنده ارائه کرده‌اند. در این مدل برای شبیه‌سازی محاسباتی فرایند خستگی منجر به پیتینگ، تئوری ترک‌های کوتاه به کار گرفته شده است. میدان تنش در ناحیه تماس چرخ‌دنده‌های درگیر و رابطه تابعی بین ضریب شدت تنش و طول ترک، با استفاده از روش اجزای محدود و مدل معادل دو استوانه، تعیین شده است. آن‌ها توانستند بر پایه نتایج محاسباتی، عمر کارکرد پهلوی دندان‌های چرخ‌دنده را با استفاده از تعداد چرخه‌های تنش لازم برای رشد ترک از طول ترک اولیه تا طول بحرانی، تعیین کنند. آن‌ها در مطالعات دیگری [۷ و ۸] یک مدل محاسباتی دو بعدی برای شبیه‌سازی سازی پیتینگ سطح قطعات مکانیکی در معرض تماس لغزشی و غلظشی ارائه کردند. آن‌ها شرایط تماس هرگز بعلاوه نیروهای اصطکاکی را در نظر گرفته و موقعیت و مقدار تنش بیشینه معادل را با استفاده از روش اجزای محدود تعیین نمودند. روش بسط مجازی ترک و تئوری رشد ترک کوتاه در چارچوب تحلیل اجزای محدود برای شبیه‌سازی دوبعدی رشد ترک خستگی تحت بارگذاری تماسی از ترک اولیه تا شکل‌گیری پیتینگ، مورد استفاده قرار گرفت. شکل پیتینگ‌ها و ارتباطشان با ضریب شدت تنش و طول ترک برای ترکیب‌های متنوع

انحنای سطوح تماس و بارگذاری تعیین شده است. فادیکا و همکاران [۹-۱۱] یک مدل محاسباتی دو بعدی برای شبیه‌سازی پیتینگ سطح قطعات مکانیکی در معرض بارگذاری تماسی ارائه کردند. آن‌ها فرض کردند ترک اولیه‌ای به طول 0.15 mm ، در مدلسان به دلیل عملیات مکانیکی و حرارتی قبلی در سطح تماس ایجاد شده باشد. مدل با ترک اولیه، در معرض فشار تماسی قائم و بارگذاری مماسی ناشی از اصطکاک بین سطوح، فرض شده است. مدل آن‌ها تأثیر روغن محبوس در ترک را نیز بر روی رشد ترک در نظر گرفته است. هنگامی که بارگذاری به دهانه ترک می‌رسد، سیال محبوس در ترک تحت فشار قرار گرفته و این فشار باعث اعمال مد بازشوندگی بر دهانه ترک می‌شود. آن‌ها برای شبیه‌سازی دو بعدی رشد ترک خستگی تحت بارگذاری تماسی از طول اولیه تا تشکیل یک پیتینگ در سطح، از روش بسط ترک مجازی بر پایه معیار چگالی انرژی کرنشی کمینه، استفاده کرده‌اند. دینگ و ریگر [۱۲] در سال ۲۰۰۳ دو پدیده پیتینگ و اسپالینگ را از هم مجزا کرده و برای هر یک تعریف واضحی ارائه دادند. آن‌ها یک مطالعه تجربی درباره اسپالینگ دندان‌های چرخ‌دنده بر روی چرخ‌دنده‌های فولادی AISI 4340 انجام داده و فرایند اسپالینگ ناشی از رشد ترک‌های نزدیک سطح تماس را نشان دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها مکانیزم اسپالینگ فروپاشی ناحیه رباط، یعنی ناحیه بین نوک ترک تا سطح تماس، (پیشنهاد شده توسط دینگ [۱۳]) را اثبات کرد. آلفردسون و همکاران [۱۴] تأثیر بارگذاری تماسی یک بی‌نظمی^۲ سطحی، یعنی زبری را به عنوان مکانیزم اصلی در خستگی تماسی غلظشی شروع شده از سطح، به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها زاویه شروع اسپالینگ از سطح را مستندسازی کرده‌اند. در این پژوهش مدل تماس به صورت دو استوانه در نظر گرفته و زبری بر روی یکی از استوانه‌ها قرار داده شده است. آن‌ها دریافتند که زبری به عنوان یک افزایش دهنده تنش در سطح تماس عمل خواهد کرد. چرخه تنش محاسبه شده با چرخه‌های تنش داده شده از ترک‌های مخروطی شکل در نقطه بارگذاری، مقایسه شده است. آن‌ها تغییر شکل ناشی از بارگذاری تماسی را برای زبری، در طول حرکت غلظشی تخمین زده‌اند. دینگ و گیر [۱۵] مدلی برای پیش‌بینی عمق اسپالینگ چرخ‌دنده ارائه کردند. مدل بر پایه مکانیزم اسپالینگ فروپاشی رباط بوده و از طریق بررسی‌های آزمایشگاهی تأیید اعتبار شده است. آن‌ها مدل محاسباتی را با استفاده از داده‌های عددی به دست آمده از تحلیل اجزای محدود پایه‌گذاری کردند. عمق اسپالینگ ناشی از بارهای تماسی و اندازه‌های ترک مختلف به دست آمده از این

² Irregularity¹ Mesh Stiffness

مدل با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از شرایط بارگذاری متناظر، مقایسه و صحت مدل پیشنهادی نشان داده شد. ژانگ و همکاران [۱۶] برای مطالعه و تحلیل خستگی تماسی چرخ دنده از تحلیل تماس دندانه چرخ دنده و یک دستگاه آزمایش چرخ دنده FZG استفاده کردند. آزمایش‌ها در دستگاه آزمایش FZG با نمونه‌های چرخ دنده ساده ساخته شده از فولاد 20MnCr5 انجام شد. شکل‌گیری پیتینگ بعد از آزمایش با استفاده از SEM بررسی شد. آن‌ها دو نوع اسپالینگ خستگی ناشی از خرابی خستگی سطحی و زیرسطحی را بررسی و تحلیل طیفی انرژی را نیز برای هر دو موقعیت خستگی تحلیل کردند. نتایج پژوهش نشان داد که پیتینگ ایجاد شده ناشی از ناخالصی‌های اکسیدی در ماده است. آن‌ها در پژوهش دیگری [۱۷] مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را بر روی نمونه‌های چرخ دنده ساده ساخته شده از فولاد 20MnCr5 انجام دادند. نتایج آن‌ها پدیده پیتینگ را در نزدیکی خط گام پینیون، جایی که به دلیل تماس یک جفت دندانه بیشترین بار به دندانه وارد می‌شود، نشان داد. آن‌ها منحنی‌های احتمال-تنش-عمر را برای استحکام خستگی تماسی به دست آوردند. داتسیشین و همکاران [۱۸] یک مدل تئوری دوبعدی برای بررسی فرایندهای شکست و ارزیابی دوام تماسی باقیمانده^۱ در قطعات تحت تماس چرخه‌ای، پیشنهاد دادند. مدل پیشنهادی بر پایه محاسبه گام به گام مسیرهای رشد ترک خستگی در ناحیه تماس می‌باشد. آن‌ها با استفاده از این مدل، شکل‌گیری آسیب‌های خستگی تماسی از قبیل پیتینگ، اسپالینگ و ترک خوردگی در اجسام غلتشی را بررسی کردند. یین و همکاران [۱۹] برای محاسبه عمر رشد ترک زیرسطحی در دندانه چرخ دنده از کرنش پلاستیک تجمع یافته استفاده کردند. برای محاسبه عمر رشد ترک زیرسطحی، محاسبه تمام چرخه‌های المان‌ها بر پایه کرنش پلاستیک تجمع یافته متغیر با زمان پیشنهاد شد. در طول این فرایند شکل‌گیری اسپالینگ از ترک زیرسطحی هم می‌تواند آشکار شود. آن‌ها اثر ضریب اصطکاک و گشتاور خارجی را نیز بر عمر رشد ترک بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش گشتاور از ۱۰۰ به N.m باعث کاهش قابل توجه عمر می‌گردد. همچنین تغییر ضریب اصطکاک در بازه ۰/۰۴-۰/۰۶ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عمر اسپالینگ نمی‌گذارد. حیرانی و فرهنگ دوست [۲۰] یک مدل دوبعدی برای پیش‌بینی موقعیت پیدایش و مسیر رشد ترک زیرسطحی روی دندانه چرخ دنده ساده پیشنهاد کردند. آن‌ها موقعیت بیشینه ΔK_{II} را به عنوان موقعیت پیدایش ترک زیرسطحی معرفی و معیار تنش مماسی

بیشینه را برای تعیین مسیر رشد ترک استفاده کردند. نتایج این مدل همخوانی خوبی با نتایج تجربی نشان داد. راگو و پاتل [۲۱] تأثیر اسپالینگ را بر عمر خستگی چرخ دنده ساده بررسی کردند. آن‌ها اثر ترک‌های اولیه با طول‌های مختلف را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد عمر خستگی چرخ دنده دارای ترک با منشأ ناحیه اسپالینگ از عمر خستگی چرخ دنده سالم کمتر است. کاسارولی و همکاران [۲۲] آزمایش‌هایی را بر روی چرخ دنده ساده ساخته شده از چدن نرم آستمپر شده برای تشخیص پیدایش و رشد ترک خستگی تماسی و درک برهمکنش احتمالی آن با عیوب ریخته‌گری و کروی‌های گرافیتی انجام دادند. در پایان آزمایش‌ها، تحلیل‌های متالورژیکی متعددی بر روی مناطق سطحی و زیرسطحی انجام شد تا مکانیزم خرابی در پیتینگ چدن نرم آستمپر شده مشخص گردد. ونگ و همکاران [۲۳] یک مدل آسیب تماسی چرخ دنده توربین بادی را بر پایه نظریه نیروی پیکربندی ماده تدوین کردند. تحلیل شبیه‌سازی میدان تنش سطح تماس برای ناحیه بحرانی حمل‌کننده بار در تماس چرخ دنده انجام و فرآیند تکامل آسیب تماس چرخ دنده تحت بارگذاری شبیه‌سازی شده است. برای مشکل خرابی چرخ دنده ناشی از ناخالصی اکسید فلزی، مدل تکامل آسیب مبتنی بر پارامترهای Jk ایجاد گردید. تأثیر عمق، شکل و موقعیت ناخالصی بر رفتار تکامل آسیب تحلیل شد. نتایج تحقیق نشان داد که مدل آسیب بر پایه نظریه نیروی پیکربندی می‌تواند به طور مؤثر پدیده آسیب تماسی چرخ دنده را شبیه‌سازی نموده و پدیده پیتینگ و اسپالینگ سطح دنده را توضیح دهد. مورالز و همکاران [۲۴] روشی برای ارزیابی ریسک نسبی خرابی خستگی تماسی سطحی نسبت به خرابی خستگی تماسی زیرسطحی در شرایط تماس دندانه چرخ دنده ارائه کردند. پارامتر ریسک خستگی سطحی بر روی نمودار شکست برحسب ضخامت ویژه فیلم روانکار و یک معیار خستگی سطحی جدید که اثرات زبری سطح، فشار هرتز و میزان لغزش بر روی سطح خستگی را در برمی‌گیرد، ترسیم شد. داده‌های تجربی برای اعتبارسنجی نمودار پیش‌بینی شده و شناسایی محدوده‌هایی از شرایط کاری که در آن‌ها میکروپیتینگ، ماکروپیتینگ سطحی یا اسپالینگ زیرسطحی محتمل‌ترین حالت شکست هستند، مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج تجربی نشان داد که داده‌ها با روندهای پیش‌بینی شده توسط مدل تطابق خوبی دارند. باتوری و همکاران [۲۵] رفتار چرخ دنده‌های ساده چاپ سه‌بعدی از جنس فولاد AISI316L را بررسی کردند. چرخ دنده‌ها در شرایط روانکاری شده و تحت بارگذاری-

¹ Residual Contact Durability

دو چرخ‌دنده از جنس فولاد (42CrMo4) با مدول یانگ 206 GPa و نسبت پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی چرخ‌دنده‌ها

مدول	تعداد	زاویه	فاصله	ضخامت
۴/۵	۲۴	۲۰°	۱۰۸mm	۷/۱mm
	دندانه	فشار	مراکز	دندانه

یک ترک اولیه در محل زیر نقطه گام و در عمق‌های مختلف به شکل خط افقی و موازی با سطح دندانه قرار می‌گیرد. محل زیر نقطه گام به دلیل بیشینه بودن فشار وارد بر سطح دندانه، انتخاب می‌شود. تماس بین دو دندانه به صورت surface-to-surface تعریف می‌شود. همچنین در دندانه دارای ترک برای جلوگیری از فرورفتن لبه‌های ترک در یکدیگر general contact نیز تعریف شده است. ضریب اصطکاک بین سطح تماس دو دندانه برابر با ۰/۰۴، مطابق با مراجع [۶] و [۲۶] و [۲۷] در نظر گرفته شده است. مراکز دایره چرخ‌دنده به عنوان نقاط مرجع تعریف شده و شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری، مطابق شکل ۳، بر روی این نقاط اعمال می‌شود. پس از تعریف تماس باید دندانه‌ها مش-بندی شوند. برای مش زدن بهتر دندانه‌ها از پارتیشن‌بندی استفاده می‌شود تا ناحیه نزدیک به محل تماس و ترک دارای اجزای ریزتری باشد. برای نوک ترک نیز از مش‌بندی خاص برای کانتور انتگرال استفاده می‌شود که در شکل ۴ نشان داده شده است. المان مورد استفاده برای مش‌زنی از نوع CPE4R می‌باشد. اندازه مش در ناحیه نوک ترک مطابق تحلیل بخش ۳-۱ برابر با $5\text{ }\mu\text{m}$ لحاظ و تعداد المان در یک دندانه ۱۹۱۵۰ عدد شد. بارگذاری مسئله در دو مرحله تعریف شده است: مرحله اول اعمال گشتاور به دندانه‌ها و مرحله دوم حرکت دورانی دندانه‌ها. در مرحله اول یک دندانه ثابت بوده و گشتاور پیچشی ۳۱ N.m به دندانه دیگر وارد می‌شود. در مرحله دوم چرخ‌دنده‌ای که در مرحله اول ثابت بود به صورت شبه‌استاتیک شروع به دوران کرده تا از روی ترک عبور کند. به این ترتیب بار تماسی بر روی سطح دندانه حرکت کرده و از بالای ترک اولیه می‌گذرد. در نهایت ضرایب شدت تنش توسط نرم‌افزار و بر اساس معیار تنش محیطی بیشینه (Maximum Tangential Stress) محاسبه می‌شود.

های مختلف آزمایش شده و تأثیر گشتاور بر مقاومت به پیتینگ مورد مطالعه قرار گرفت. چرخ‌دنده‌ها در گشتاور کمتر از 60 N.m عملکرد امیدوارکننده‌ای داشتند، اما گشتاور 135 N.m پیتینگ روی دندانه را ایجاد کرد.

در تحقیقات قبلی پیرامون شکل‌گیری اسپالینگ چرخ‌دنده از مدل معادل دو استوانه در تماس استفاده شده است. در تعداد معدودی از مطالعات از پروفیل اینولوت دندانه استفاده شده است، اما در این پژوهش‌ها به جای تماس کامل دو دندانه، توزیع سهمی شکل فشار تماسی هر ترز بر روی دندانه جابجا شده است. با توجه به جابجا شدن نقطه تماس بین دو دندانه در حین کار، شعاع انحنا و توزیع بار متغیر خواهد بود و مدل‌سازی تماس دو دندانه با پروفیل اینولوت می‌تواند تحلیل را به واقعیت فیزیکی مسئله نزدیک‌تر کند.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش هندسه مسئله به صورت دو دندانه واقعی در تماس، مدل‌سازی می‌شود. برای این کار باید پروفیل اینولوت دندانه مدل شود. یک ترک اولیه زیرسطحی در مدل در نظر گرفته شده و ترک اولیه در عمق‌های مختلف مدل‌سازی می‌شود. بارگذاری تماسی بر روی دندانه اعمال شده و ضرایب شدت تنش مد اول و دوم برای نوک‌های ترک استخراج می‌گردد. مسیر رشد ترک زیرسطحی تحت بارگذاری تماسی، با استفاده از مدل بهبودیافته ریچارد مطابق معادله ۱ که بر اساس نتایج تجربی رشد ترک مد ترکیبی پیشنهاد شده است، تعیین می‌گردد. بارگذاری به صورت گشتاور بر روی یک چرخ‌دنده وارد می‌شود. ترک به صورت نموی بسط می‌یابد و هندسه جدید ترک مدل می‌گردد تا هنگامی که نوک ترک به سطح دندانه برسد و یک اسپالینگ بر روی سطح دندانه چرخ‌دنده ایجاد کند. تحلیل میدان تنش و تعیین ضرایب شدت تنش در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام می‌شود.

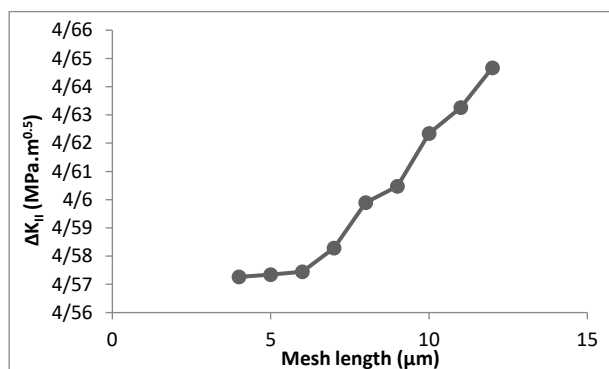
۲-۱- مدل اجزای محدود

ابتدا یک کد در محیط برنامه‌نویسی متلب فراهم شده است تا برحسب پارامترهای مختلف چرخ‌دنده، پروفیل دندانه را رسم و مختصات نقاط روی پروفیل دندانه را ارائه کند. سپس مختصات نقاط وارد نرم‌افزار آباکوس شده و هندسه دندانه در محیط نرم‌افزار ایجاد می‌شود شکل ۱ و شکل ۲ به ترتیب دندانه چرخ‌دنده‌ای با مشخصات مدول ۴/۵ و ۲۴ دندانه را مطابق مرجع [۲۶] در کد متلب و نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهند. جدول ۱ مشخصات هندسی چرخ‌دنده‌ها را ارائه می‌دهد. هر

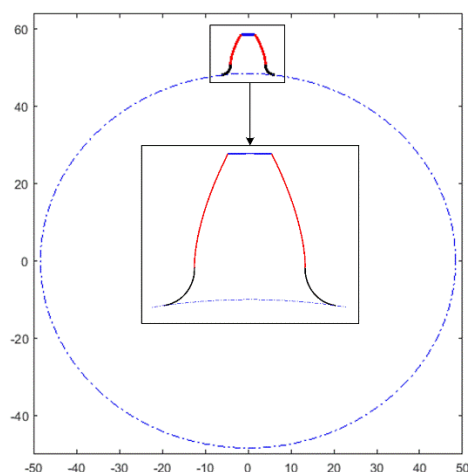
۳- نتایج و بحث

۳-۱- جوانه‌زنی ترک خستگی

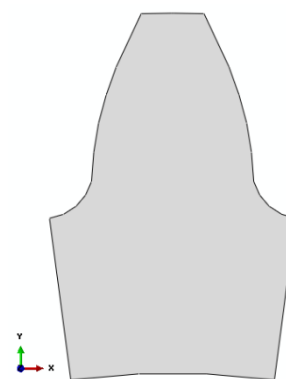
برای بررسی عددی محل جوانه‌زنی ترک خستگی زیرسطحی تحت بارگذاری خستگی تماسی در دندان‌های چرخ‌دنده ساده، دندان‌های چرخ‌دنده با مشخصات مرجع [۲۷] (مدول ۴/۵، تعداد دندان‌ها ۲۴، جنس 42CrMo4) شبیه‌سازی و بارگذاری شده و تحلیل تنش آن انجام می‌شود. مش‌بندی دندان‌ها مطابق بخش ۲-۱ انجام می‌گردد. برای تعیین اندازه مش مناسب برای تحلیل تماس، نمودار ΔK_{II} برحسب اندازه مش ناحیه تماس در شکل ۵ نشان داده شده است. با دقت در شکل ۵ دیده می‌شود که اندازه ΔK_{II} برای مش با اندازه $6 \mu m$ تقریباً ثابت می‌شود. برای ادامه مراحل شبیه‌سازی اندازه مش $5 \mu m$ انتخاب شده است.

شکل ۵: تغییرات ΔK_{II} برحسب اندازه مش

در ادامه ترک اولیه زیرسطحی به طول $25 \mu m$ ، مطابق مرجع [۲۷]، در عمق‌های مختلف از سطح تماس در محل دایره گام قرار داده شده است. با انجام بارگذاری بر روی دندان‌ها، ضریب شدت تنش برای نوک سمت چپ و راست ترک محاسبه می‌شود. شکل ۶ تغییرات ضریب شدت تنش مد دوم را برای دو نوک ترک برحسب عمق ترک اولیه از سطح تماس نشان می‌دهد. با توجه به شکل مقدار ΔK_{II} در عمق $127 \mu m$ بیشینه می‌شود. مرجع [۲۸] نیز محل جوانه‌زنی ترک زیرسطحی را برای این مشخصات بر اساس تنش برشی در عمق حدود $120 \mu m$ پیش‌بینی کرده است. این مطابقت بین نتایج صحت مدل‌سازی کار حاضر را اثبات می‌کند.



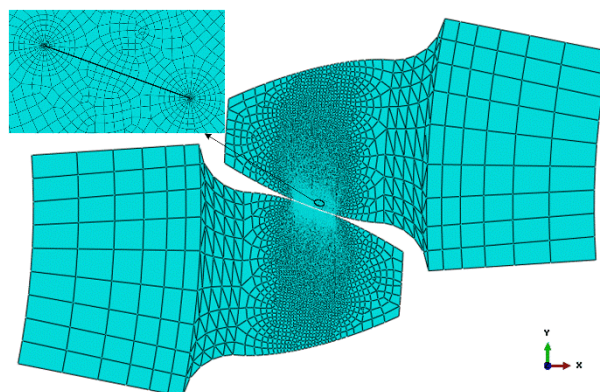
شکل ۱: پروفیل اینولوت دندان‌های چرخ‌دنده ساده در محیط متلب



شکل ۲: پروفیل دندان‌های نرم‌افزار آباکوس



شکل ۳: تعریف تماس سطوح دندان‌ها و نقاط مرجع

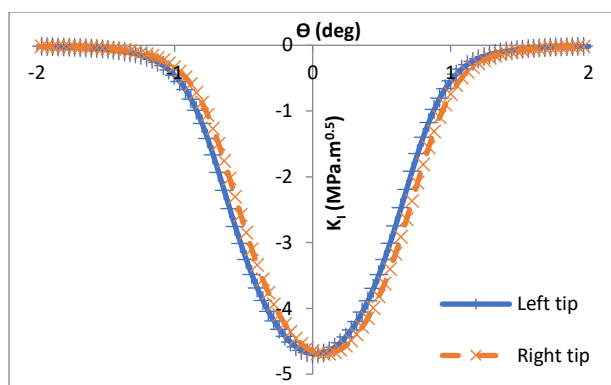


شکل ۴: مش‌بندی دندان‌ها و مش مخصوص ناحیه نوک ترک

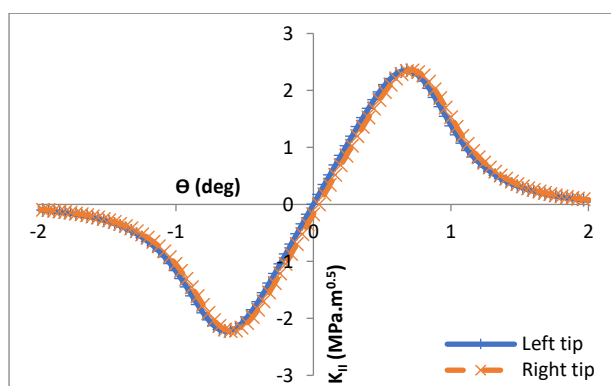
که در این رابطه θ زاویه رشد ترک، K_I و K_{II} به ترتیب ضرایب شدت تنش مد اول و مد دوم، β و γ ضرایب ثابت وابسته به ضریب شدت تنش مد اول هستند.

ترک با زاویه به دست آمده و با یک نمو طولی $10 \mu\text{m}$ بسط داده می شود. هندسه ترک به صورت دستی اصلاح شده و دندانان مجدداً مشخص می گردد. پس از آن دوباره تماس دو دندانان برای هندسه جدید ترک برقرار شده و بارگذاری تماسی بر روی دندانان انجام می شود. پس از حل مسئله توسط نرم افزار ضرایب شدت تنش نوک های ترک بسط یافته، به دست می آید. مجدداً برای ضرایب شدت تنش این مرحله نیز زاویه رشد ترک محاسبه و ترک دوباره رشد داده می شود. این روند ادامه پیدا می کند تا زمانی که نوک های ترک به سطح دندانان برسند و یک اسپالینگ کامل شکل گیرد.

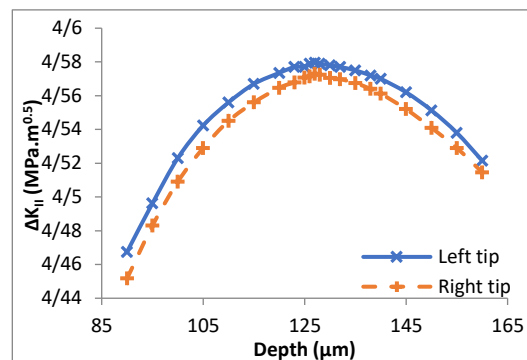
چند مرحله از رشد ترک برای نمونه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۱ نیز مسیر کامل رشد ترک زیرسطحی تا روی سطح و ایجاد اسپالینگ بر روی دندانان را نشان می دهد.



شکل ۸: تغییرات K_I بر حسب دوران چرخ دنده

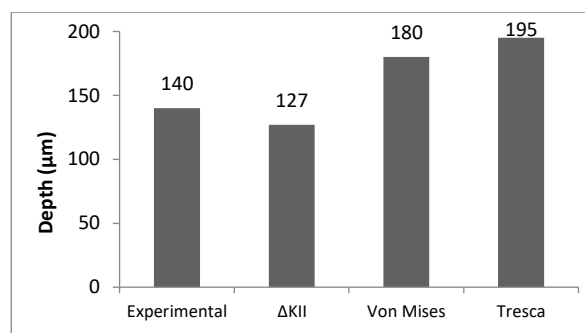


شکل ۹: تغییرات K_{II} بر حسب دوران چرخ دنده



شکل ۶: تغییرات ضریب شدت تنش مد دوم بر حسب عمق ترک اولیه

شکل ۷ عمق کف اسپالینگ تجربی مرجع [۲۷] و موقعیت مقدار بیشینه سه پارامتر ΔK_{II} تنش ون میزز و ترسکا را نمایش می دهد. مطابق این شکل، موقعیت ΔK_{II} بیشینه بهترین مطابقت را با عمق اسپالینگ تجربی نشان می دهد؛ بنابراین برای بخش رشد ترک زیرسطحی، ترک اولیه در همان عمق ΔK_{II} بیشینه قرار داده خواهد شد.



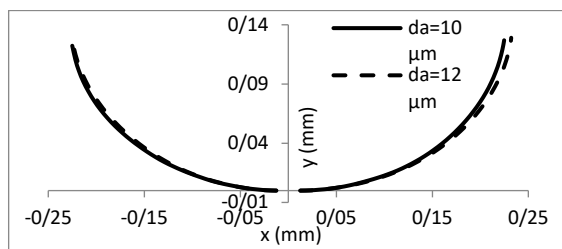
شکل ۷: عمق اسپالینگ تجربی و موقعیت بیشینه سه پارامتر ΔK_{II} تنش ون میزز و ترسکا [۲۹]

۳-۲- رشد ترک خستگی

پس از تعیین عمق ΔK_{II} بیشینه، ترک اولیه در آن موقعیت قرار داده شده و ضرایب شدت تنش برای هر دو نوک ترک محاسبه می شود. شکل ۸ و شکل ۹ به ترتیب تغییرات ضرایب شدت تنش مد اول و مد دوم را برای ترک اولیه بر حسب زاویه دوران چرخ دنده، نسبت به موقعیت تماس دندانها روی دایره گام، نشان می دهد. با جایگذاری این مقادیر ضرایب شدت تنش در رابطه بهبودیافته ریچارد، معادله ۱، ارائه شده توسط حیرانی و فرهنگ دوست [۳۰]، زاویه رشد ترک در این مرحله را می توان تعیین کرد.

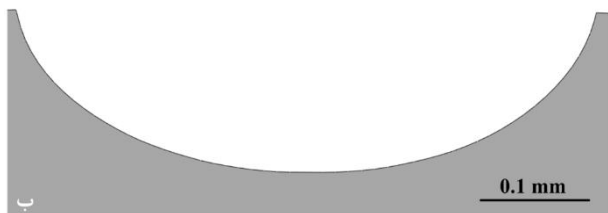
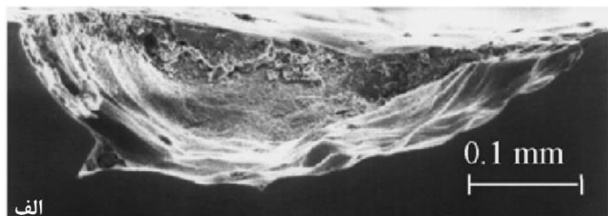
$$\theta = \beta \left[\frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right] + \gamma \left[\frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right]^2 \quad (1)$$

$$\beta = \begin{cases} 157.1, K_I > 0 \\ 125.3, K_I < 0 \end{cases}, \gamma = \begin{cases} -93.7, K_I > 0 \\ -62.5, K_I < 0 \end{cases}$$



شکل ۱۳: مقایسه شکل دو اسپالینگ پیش‌بینی شده با نمو ترک ۱۲ و ۱۰ μm

برای بررسی صحت شکل اسپالینگ پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده در این رساله، نتیجه مدل با شکل اسپالینگ تجربی ارائه شده در مرجع [۲۷] مقایسه می‌شود. شکل ۱۴ مقایسه این دو شکل را نشان می‌دهد که به لحاظ ابعادی مطابقت خوبی با هم دارند. تماس دو دندانه مطابق شکل ۴ برقرار بوده و ترک اولیه در زیر نقطه گام مدل سازی شده است. اسپالینگ تجربی این مسئله دارای عمق حدود ۱۴۰ μm و طول حدود ۴۸۰ μm بوده و اسپالینگ شبیه سازی شده نیز دارای عمق ۱۲۷ μm و طول حدود ۴۵۰ μm می‌باشد. این در حالی است که اسپالینگ شبیه سازی شده در مرجع [۲۷] که در آن از معیار تنش ون میزز بیشینه برای تعیین محل جوانه زنی ترک زیرسطحی و روش بسط مجازی ترک برای مرحله رشد ترک استفاده شده است، دارای عمق ۱۹۲ μm و طول حدود ۶۰۰ μm است. شبیه سازی توسط مدل پیشنهادی این رساله نتیجه دقیق تری نسبت به شبیه سازی مرجع [۲۷] دارد.



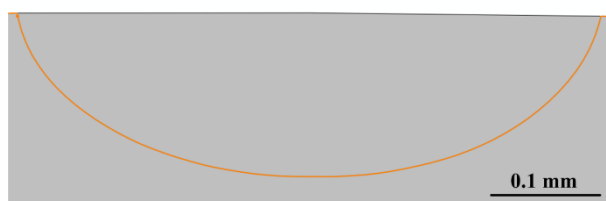
شکل ۱۴: شکل اسپالینگ، الف) تجربی [۲۷]، ب) شبیه سازی توسط مدل ارائه شده در این پژوهش

۴- نتیجه گیری

بررسی های عددی برای تعیین محل جوانه زنی ترک زیرسطحی در دندانه چرخ دنده ساده و تعیین مسیر رشد ترک زیرسطحی تا رسیدن ترک به سطح دندانه و ایجاد یک اسپالینگ کامل انجام و با نتایج تجربی

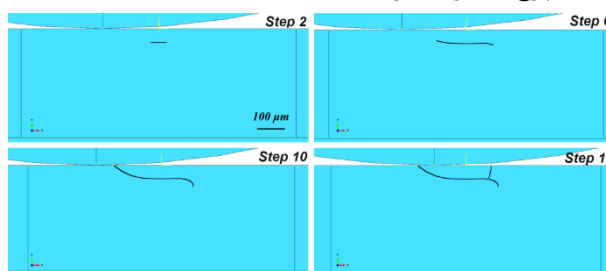


شکل ۱۰: چند مرحله از رشد ترک زیرسطحی



شکل ۱۱: مسیر رشد ترک زیرسطحی و ایجاد اسپالینگ بر روی دندانه

مسیر رشد ترک در مدل معادل دو استوانه با استفاده از معیار تنش مماسی بیشینه و مدل پروفیل اینولوت با استفاده از معیار بهبود یافته ریچارد، به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد نتایج مدل سازی پیشرفته، یعنی استفاده از پروفیل اینولوت و معیار بهبود یافته ریچارد، مشابهت بیشتری به نتایج تجربی نشان می‌دهد تا نتایج مدل سازی ساده. در مدل سازی پیشرفته هر دو نوک ترک به سمت سطح رشد یافته اما در مدل سازی ساده یک نوک ترک به سمت سطح و نوک دیگر به داخل جسم رشد می‌کند. رشد هر دو نوک ترک به سمت سطح به نتایج تجربی اسپالینگ دندانه چرخ دنده نزدیک تر است.



شکل ۱۲: چند مرحله رشد ترک زیرسطحی از ترک اولیه تا شکل گیری اسپالینگ برای نمونه a [۲۰]

در ادامه مسیر رشد ترک و شکل اسپالینگ پیش‌بینی شده با نمو رشد ترک ۱۲ و ۱۰ μm با هم مقایسه می‌شوند. شکل ۱۳ مقایسه دو شکل اسپالینگ پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ۲۰٪ افزایش در نمو رشد ترک تنها باعث ۱/۸٪ افزایش اندازه دهانه اسپالینگ پیش‌بینی شده، می‌شود که خود نشان دهنده قابل قبول بودن اندازه نمو رشد ترک است.

[4] R. Ma and Y.-S. Chen, "Bifurcation of multi-freedom gear system with spalling defect," *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 34, pp. 475–488, 2013. doi: [10.1007/s10483-013-1684-7](https://doi.org/10.1007/s10483-013-1684-7)

[5] K. S.-N. Rasool Mohsenzadeh, "Experimental studies on the durability of PA6-PP-CaCO₃ nanocomposite gears," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 3, no. 2, pp. 147–156, 2016 (in Persian).

[6] S. Glodež, H. Winter, and H. P. Stüwe, "A fracture mechanics model for the wear of gear flanks by pitting," *Wear*, vol. 208, pp. 177–183, 1997.

[7] S. Glodež, Z. Ren, and J. Flašker, "Simulation of surface pitting due to contact loading," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 43, pp. 33–50, 1998.

[8] S. Glodež, Z. Ren, and J. Flašker, "Surface fatigue of gear teeth flanks," *Computers & Structures*, vol. 73, pp. 475–483, 1999.

[9] J. Flašker, G. Fajdiga, S. Glodež, and T. K. Hellen, "Numerical simulation of surface pitting due to contact loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 23, pp. 599–605, 2001.

[10] Z. Ren, S. Glodež, G. Fajdiga, and M. Ulbin, "Surface-initiated crack growth simulation in moving lubricated contact," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 38, pp. 141–149, 2002.

[11] G. Fajdiga, J. Flašker, and S. Glodež, "Influence of different parameters on surface pitting of contacting mechanical elements," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 71, pp. 747–758, 2004.

[12] Y. Ding and N. F. Rieger, "Spalling formation mechanism for gears," *Wear*, vol. 254, pp. 1307–1317, 2003.

[13] Y. Ding, R. Jones, and B. T. Kuhnell, "Elastic-plastic finite element analysis of spall formation in gears," *Wear*, vol. 197, pp. 197–205, 1996.

[14] B. Alfredsson, J. Dahlberg, and M. Olsson, "The role of a single surface asperity in rolling contact fatigue," *Wear*, vol. 264, pp. 757–762, 2008.

موجود در مقالات مقایسه شد. مهم‌ترین نتایج این بررسی‌ها به شرح زیر می‌باشد:

■ در میان سه پارامتر ΔK_{II} ، تنش ون میزز و تنش ترسکا، محل تنش بیشینه ون میزز متداول‌ترین کاربرد را به‌عنوان موقعیت ترک اولیه زیرسطحی داشته است؛ اما نتایج این پژوهش نشان داد که موقعیت ΔK_{II} بیشینه، با اختلاف حدود ۹٪ بهترین تطابق را با کف اسپالینگ تجربی دارد. در نتیجه موقعیت ΔK_{II} بیشینه به‌عنوان معیار تعیین موقعیت جوانه‌زنی ترک زیرسطحی پیشنهاد می‌گردد.

■ ضریب شدت تنش برای نوک چپ و راست ترک اولیه زیرسطحی یکسان است و در نتیجه هر دو نوک به‌صورت هم‌زمان شروع به رشد می‌کنند.

■ تعیین زاویه رشد ترک با استفاده از معیار بهبودیافته ریچارد، ارائه‌شده توسط حیرانی و فرهنگ دوست [۳۰]، منجر به پیش‌بینی یک اسپالینگ با ابعاد نزدیک به اسپالینگ تجربی می‌شود. طول دهانه اسپالینگ پیش‌بینی‌شده حدود ۶٪ اختلاف با اسپالینگ تجربی دارد در صورتی که مدل مرجع [۲۷] حدود ۲۵٪ خطا ایجاد کرده است.

با توجه به اینکه مدل حاضر پیش‌بینی مناسبی از ابعاد اسپالینگ روی دندانه چرخ‌دنده ارائه می‌دهد؛ می‌تواند به شناخت بهتر آثار بعدی آن از جمله سفتی درگیری و ارتعاش چرخ‌دنده، در صنعت کمک کند. بررسی سه‌بعدی پدیده اسپالینگ در پژوهش‌های آتی می‌تواند فهم بهتری از این پدیده ارائه دهد.

۵- منابع

[1] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.

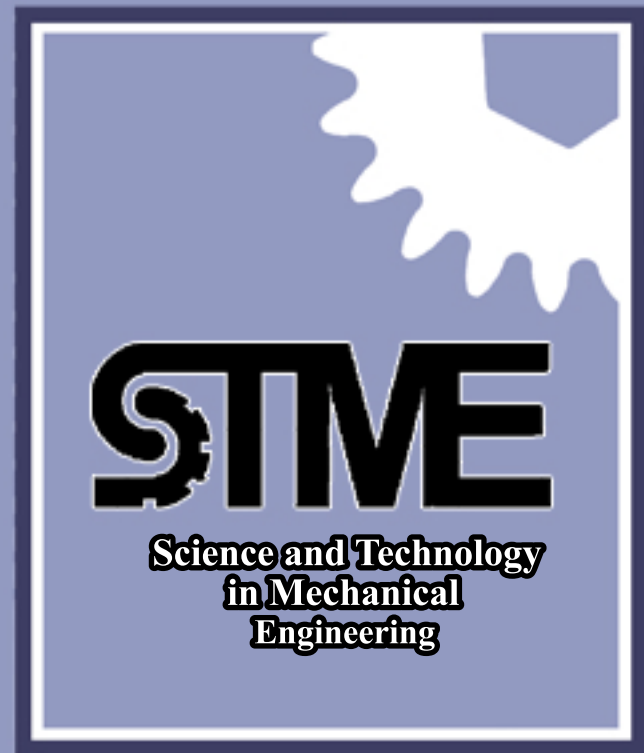
[2] R. Ma and Y. Chen, "Research on the dynamic mechanism of the gear system with local crack and spalling failure," *Engineering Failure Analysis*, vol. 26, pp. 12–20, 2012. doi: [10.1016/j.engfailanal.2012.05.022](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.05.022)

[3] R. Ma, Y. Chen, and Q. Cao, "Research on dynamics and fault mechanism of spur gear pair with spalling defect," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, pp. 2097–2109, 2012. doi: [10.1016/j.jsv.2011.12.010](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.12.010)

- [23] R. Wang, R. Liu, S. Duan, J. Wang, and C. Yu, "Effect of inclusion on contact damage evolution of wind turbine gears based on configurational force theory," *Tribology International*, vol. 202, Art. no. 110391, 2025.
- [24] G. E. Morales-Espejel and A. Kadiric, "Application of a contact fatigue life model to assess the relative risk of surface versus subsurface initiated fatigue in gears," *Wear*, vols. 578–579, Art. no. 206216, 2025.
- [25] G. Batory *et al.*, "Failure analysis of 3D-printed FZG spur gears made of AISI 316L austenitic steel," *Wear*, vols. 580–581, Art. no. 206313, 2025. doi: [10.1016/j.wear.2025.206313](https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206313)
- [26] B. Zafosnik, S. Glodež, M. Ulbin, and J. Flašker, "A fracture mechanics model for the analysis of micropitting in lubricated rolling–sliding contacts," *International Journal of Fatigue*, vol. 29, pp. 1950–1958, 2007. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2006.12.015](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.12.015)
- [27] G. Fajdiga, S. Glodež, and J. Kramar, "Pitting formation due to surface- and subsurface-initiated fatigue crack growth in contacting mechanical elements," *Wear*, vol. 262, pp. 1217–1224, 2007.
- [28] G. Fajdiga and M. Šraml, "Fatigue crack initiation and propagation under cyclic contact loading," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 76, pp. 1320–1335, 2009.
- [29] K. Farhangdoost. H. Heirani, "Effect of friction coefficient and maximum contact pressure on the spalling depth of gear teeth flank," in *Fracture, Fatigue and Wear*, Belgium, 2018, pp. 63–68.
- [30] K. F. Hasan Heirani, "Mixed-mode I/II fatigue crack growth under tensile or compressive far-field loading," *Materials Research Express*, vol. 4, Art. no. 116505, 2017. doi: [10.1088/2053-1591/aa9446](https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa9446)
- [15] Y. Ding and J. A. Gear, "Spalling depth prediction model," *Wear*, vol. 267, pp. 1181–1190, 2009.
- [16] J. Zhang, Q. Zhang, C. Wu, Z. Xu, and S. Lyu, "Experimental application of pitting formation for 20MnCr5 carburized gear tooth," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, pp. 899–903, 2014. doi: [10.1007/s12541-014-0415-9](https://doi.org/10.1007/s12541-014-0415-9)
- [17] Q. Zhang, J. Zhang, C. Wu, Z. Xu, and S. Lyu, "Evaluation of contact fatigue strength for 20MnCr5 carburized gear," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, pp. 117–121, 2014. doi: [10.1007/s12541-013-0313-6](https://doi.org/10.1007/s12541-013-0313-6)
- [18] O. P. Datsyshyn, V. V. Panasyuk, and A. Y. Glazov, "Residual lifetime estimation of tribojoint elements based on contact fatigue damage criteria," *International Journal of Fatigue*, vol. 83, pp. 300–312, 2016. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2015.10.026](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.026)
- [19] Y. Yin, Y.-X. Chen, and L. Liu, "Lifetime prediction for subsurface crack propagation using a three-dimensional dynamic FEA model," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 87, pp. 54–70, 2017. doi: [10.1016/j.ymssp.2016.09.033](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.09.033)
- [20] K. Farhangdoost. H. Heirani, "Predicting depth and path of subsurface crack propagation at gear tooth flank under cyclic contact loading," *Journal of Solid Mechanics*, vol. 9, no. 3, pp. 587–598, 2017.
- [21] S. P. Mahendra Singh Raghav, "Crack propagation and fatigue life estimation of spur gear with and without spalling failure," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 127, Art. no. 104020, 2023. doi: [10.1016/j.tafmec.2023.104020](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104020)
- [22] A. Casaroli, E. Conrado, C. Gorla, C. Crispino, R. Gerosa, and B. Rivolta, "Mechanical and metallurgical characterization of contact fatigue mechanisms in ADI spur gears," *Engineering Failure Analysis*, vol. 165, Art. no. 108775, 2024.



TVU
Technical and Vocational
University



Two Scientific Quarterly Journals
Science and Technology in Mechanical Engineering
Vol. 4 – No. 2 - 2026