



علم و فناوری در مهندسی مکانیک

دو فصلنامه علمی پژوهشی
علم و فناوری در مهندسی مکانیک

دوره ۳ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

بسم الله الرحمن الرحيم

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

دو فصلنامه علمی-پژوهشی

دانشگاه ملی مهارت

دوره ۳ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

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 ۱۴۰۲ موفق به
کسب 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 شیان 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 لگزیان	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 طیبه جلالی

کارشناس نشریه: مهندس حمیده سادات سیدحسینی

ویراستار و صفحه آرایی: مهندس ملیحه دهقان پور

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

صندوق پستی : ۹۴۵۹۴-۹۱۷۶۹

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:

محسن آزادبخت - بهنام آخوندی - کورش اسفندیاری - مهدی بقراطی - عبدالامیر بک خوشنویس - سیدهادی بنی‌هاشمی
- وحید بهلوری - اکبر جعفری - سید محمد جوادی - سید محمد جوادی مال آباد - مرتضی دلاکه‌نژاد - فرانک دهقانی -
بهمن رحمتی‌نژاد - ایمان رشدی طرق - حسین زمانی خادمانلو - محمد شیخی - محمدحسین عباسپورفرد - کریم علی
اکبری - شهاب کامل عباس‌نیا - جعفر لنگری - حسین مجدی عبدالله آباد - حمید محمدیون - حمید مرتضی‌پور - مسعود
مسیح‌طهرانی - محمدجواد مغربی - رضا ناصری - علیرضا نقوی مقدم - سعید وحیدی‌فر

فهرست مطالب

۷	..... بررسی تأثیر سلامت شمع و وایر روی آلاینده‌های خروجی موتور خودروهای بنزین.....
۱۹	..... بررسی اثر شرایط محیطی و نوع سوخت بر روی پارامترهای انرژی و انرژی یک نیروگاه بخار.....
۳۳	..... طراحی، ساخت و ارزیابی میز آزمون پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده با چرخ‌دنده ساده.....
۴۷	..... بهبود عملکرد پنل فتوولتائیک حرارتی با به‌کارگیری نانو سیال‌های ترکیبی.....
۶۹	..... تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورهای خودرو.....
۸۱	..... شبیه‌سازی عددی تأثیر زاویه کجی بر عملکرد هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پروانه دریایی DTMB.....
۹۹	..... تعیین خواص الاستیک ارتوتروپیک و مطالعه اثر اندازه نانوصفحات گرافنی یک لایه و دو لایه با استفاده از روش اجزاء محدود اتمی...
۱۱۹	..... مطالعه تجربی خستگی خمشی قطعات چاپ سه‌بعدی ساخته‌شده با روش ریزش مذاب.....
۱۳۷	..... شبیه‌سازی عددی اثر نانوسیال ساده و هیبریدی بر عملکرد خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل.....
۱۵۳	..... تأثیر ویژگی‌های شبکه متخلخل آلومینیومی بر زمان ذوب کامل روغن نارگیل و یکنواختی دمای دیواره.....
۱۷۳	..... مطالعه عددی تأثیر سازه پیک کولر بر جریان هوا و بازدهی برج خنک‌کن خشک.....
۱۹۳	..... طراحی و شبیه‌سازی نانو لاینکرهای پلی‌کاتیونی برای اتصال پلی‌آنیون‌ها به یکدیگر.....



Investigating the effect of spark plug and wire health on gasoline engine exhaust emissions

Mehdi Niajalili^{*1}, Sobhan Rezaei², Ali Kochakinejad³, Mojtaba Masoumnezhad⁴

1. Instructor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran .

2 B.Sc, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

3. Instructor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

4. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

Abstract

Nowadays, the issue of environmental pollution is one of the major challenges in densely populated cities. In the meantime, due to the prominent role of the automobile as one of the largest producers of pollution, it is very important to examine the equipment effective in producing its pollutants. Considering the effect of spark plug and wire quality on the production of engine exhaust pollutants, research has been conducted on the effect of the lifespan of this equipment on the production of engine exhaust pollutants. In this study, the main goal is to examine the effect of using spark plugs and wires with different functions on the emissions of automobile engines. Thus, spark plugs are considered in four groups including zero to 10, 10 to 20, 20 to 30 and 30 to 40 thousand kilometers and wires are considered in two ranges of zero to 20 and 20 to 40 thousand kilometers. At each stage, after installation on the vehicle, toxic pollutants emitted from the engine, including HC, CO, and NO_x, have been examined. According to the studies conducted, the production of all three pollutant gases has a direct impact on the operation of the spark plug and wire. However, the depreciation of the vehicle's spark plug has the greatest impact on the pollutant gas HC, and the maximum increase in emissions in the study groups was reported to be 51.8%, 13.8%, and 32% for HC, CO, and NO_x gases, respectively.

Keywords

Pollution

Ignition system

Spark plug

Environment

Engine

Received: 10.02.2024

Revised: 01.05.2025

Accepted: 01.12.2025

*Corresponding Author

Mehdi Niajalili

Email

mniajalili@nus.ac.ir

1- Introduction

The issue of increasing environmental pollution in different countries is known as one of their most important problems. Excessive production of vehicles, poor quality of parts and non-standard fuel are among the factors that can be considered very important in the production of polluting gases. On the other hand, the high volume of fossil fuel consumption by passenger cars is considered one of the main causes of air pollution (Salehi and Faghani, 2020). Therefore, considering that the operation of the vehicle is directly related to the production of pollutants, the need for research on equipment

related to the production of pollutants in the vehicle has increased. In this regard, many researchers have conducted research on the control of vehicle emissions and related equipment (Aliakbari et al, 2024; Bidva and Hasanzadeh, 2018; Niajalili et al, 2021). The increasing number of vehicles and their traffic has made the problem of pollution more important. Therefore, given the increasing expansion of urban areas and the increasing use of cars, the most important problem facing today's cities is the increase in pollution caused by urban transportation. Despite the statistics that are



obtained from comparing the amount of pollutants in Tehran with global standards, the main environmental problem of this city, which is one of the largest and most populous cities in Iran, can be considered the issue of air pollution (Ghanbarihamedani, 2016). Behrouz Mashhadi and Ardalan Maleki (2022) have considered the issue of pollution to be one of the most important issues in the world of automobiles and have declared it essential to provide a suitable solution to reduce fuel consumption, reduce greenhouse gas production, improve air quality, and stop the production of toxic gases.

In this study, the first stage describes the performance of the spark plug and wire of the vehicle. In the next stage, in eight stages and four repetitions, spark plugs and wires with different functions were installed on the vehicle ignition system and their effect on engine exhaust pollutants was evaluated.

2- Research Methods

To determine the effect of using spark plugs with different functions on vehicle emissions, a Pride vehicle with the specifications in Table 1 was used. At this stage, four groups of spark plugs were considered in the operating ranges of zero to 10, 10 to 20, 20 to 30, and 30 to 40 thousand kilometers, and two groups of wires were considered with the operating ranges of zero to 20 and 20 to 40 thousand kilometers. The spark plugs used in this study were all from the NGK brand with the technical code BKR6E, and the wires used were from the I.P.N.C brand. Figure 1 and Figure 2 show a view of the spark plugs (one example from each group) and the wires installed on the study vehicle, respectively. Gear wear is a common defect in mechanical power transmission systems, typically developing over time. To expedite wear formation for analysis, controlled resistant load tests were conducted on gear teeth. The crank and spring mechanism enabled precise load application, simulating real-world operational stress conditions. The selected gears had a module of 4, with a 20-tooth pinion of 80 mm diameter and a 50-tooth gear of 200 mm diameter.

Bearings of type 6306 were selected according to DIN625-1 standards to withstand maximum operational speed and load.

Table 1: Technical specifications and equipment status of the study vehicle

<i>Technical specifications</i>	
Vehicle name	Pride 131
Year of manufacture	2011
Engine code	M13
ECU type	S2000
Compression ratio	9.7:1
Engine capacity (cc)	1323
Emission standard	Euro 4
Fuel type	Gasoline
Fuel delivery system	Injector
Injection system	MPFI
<i>Equipment health status</i>	
Fuel System Status	Healthy and without defects
Sensor Status	Healthy and without errors

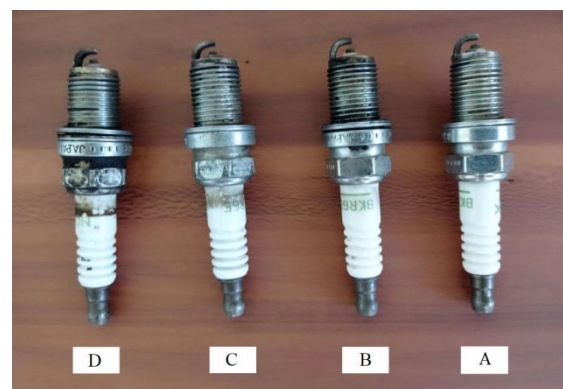


Figure 1 : View of the spark plugs used for the test with the following performance (thousands of kilometers): A) Zero to 10 B) 10 to 20 C) 20 to 30 D) 30 to 40

Therefore, in eight stages, these spark plugs and wires were installed on the study vehicle and analyzed by the NEW SPX test device, model ULTIMATE 500.

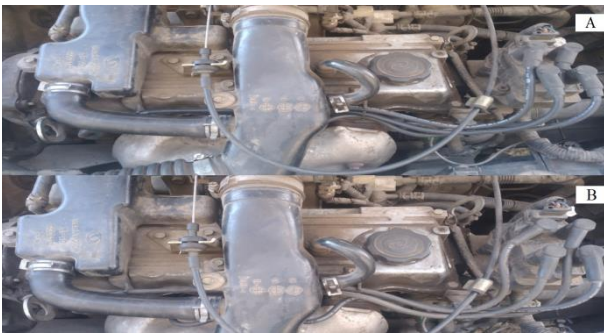


Figure 2: View of the wires used for the test, which have the following performance (thousands of kilometers): A) Zero to 20 B) 20 to 40

It should be noted that the aforementioned emission measuring device has a calibration sheet with a probability of conformity of over 99 percent and was in perfect health at the time of the emission measurement of the study vehicle. To ensure the accuracy of the information, each step was performed in four repetitions and the average of the parameters was taken into account.

3- Results

In the first case, a set of wires with a service life of 0 to 20 thousand kilometers was used for four groups of spark plugs in the service life ranges of 0 to 10, 10 to 20, 20 to 30, and 30 to 40 thousand kilometers, and emission measurements were performed for them. In the second case, wires with a service life of 20 to 40 thousand kilometers were used for spark plugs with the aforementioned classification. Figure 3 to Figure 5 show the comparison graphs of the values of the HC, CO, and NOx parameters for the two aforementioned cases. According to the studies conducted, the operation of spark plugs and wires in most cases has caused an increase in pollutant gases. As is clear from Figure 3 to Figure 5, increasing the service life of car spark plugs has a direct effect on the increase in HC, CO and NOx pollutants. This increase, which is greater in the HC pollutant gas than in the other two cases, except in one case for CO gas, where this parameter did not change with an increase in ten thousand kilometers of spark plug operation, in all categories with an increase in kilometers of spark plug operation, the amount of pollutant gases has increased.

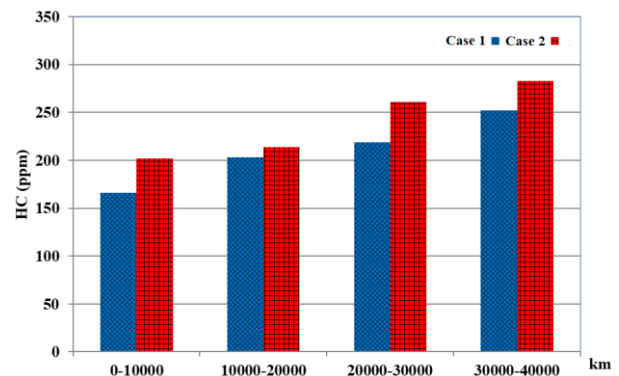


Figure 3: HC parameter values for four candle operating groups and two wire operating modes

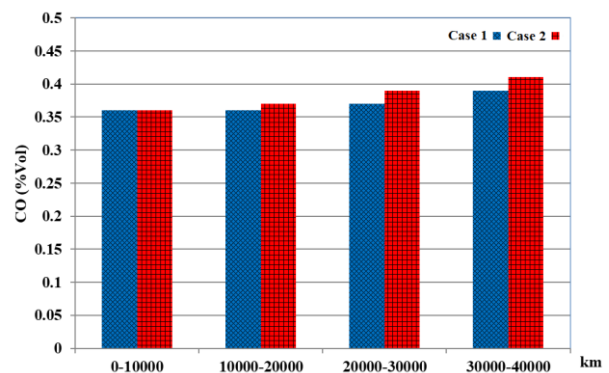


Figure 4: CO parameter values for four candle operating groups and two wire operating modes

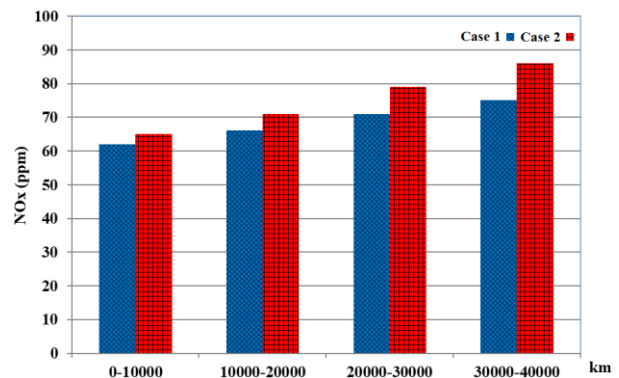


Figure 5: NOx parameter values for four spark plug operating groups and two wire operating modes

4- Conclusion

The increase in environmental pollutants is a major challenge in densely populated cities. On the other hand, cars are estimated to be one of the largest producers of toxic pollutants in Iran. Therefore, research and study on equipment that affects the production of pollutants are very important. In this study, research has been conducted on the effect of the operation of two of the most important parts of

the ignition system, including spark plugs and wires, on environmental pollutants HC, CO and NOx. Thus, spark plugs are classified into four operating groups, including zero to 10, 10 to 20, 20 to 30 and 30 to 40 thousand kilometers, and are considered in two cases with wires with an operation of zero to 20 and 20 to 40 thousand kilometers. In the next stage, in each case, they were carefully evaluated by the emission measuring device, which is of the NEW SPX type. In order to increase the accuracy of the extracted parameters, four repetitions were performed in each case of the experiment. In general, the following results were obtained:

- The percentage increase in pollutants of the study groups in the highest case was reported to be 51.8, 13.8 and 32 percent, respectively, for HC, CO and NOx pollutants.
- The wear of the parts under investigation has the greatest effect on the production of HC gas.
- Carbon monoxide gas has shown the least changes in relation to the increase in the life of the spark plug and wire, so that its changes in the low operating range of the parts are evaluated to be close to zero.
- In the higher wear range, the percentage increase in NOx gas moves with a steeper slope than the other two gases.

Therefore, in general, it can be said that timely replacement of spark plugs and wires in a car can have a significant impact on reducing the pollutants under study, and by more careful monitoring of

vehicles in this category, a cleaner environment can be achieved.

5- References

- [1] M. Salehi and H. Faghani, "Investigation of emissions and energy consumption of DENA hybrid electric vehicle," *J. Engine Res.*, vol. 58, no. 58, pp. 11–16, 2020. Available: https://www.engineerresearch.ir/article_697861_59a56fe59c7e12fa87266f58c365c7cc.pdf.
- [2] K. Aliakbari, S. M. M. Delavari, and M. Sheykhi, "Numerical simulation of EF7 engine in different operating conditions," *Sci. Technol. Mech. Eng.*, 2024. doi: [10.22034/stme.2024.446307.1056](https://doi.org/10.22034/stme.2024.446307.1056).
- [3] S. S. Bidva and M. Hasanzadeh, "Environmental review of the automotive industry and the ways to reduce its pollution," *J. Environ. Res. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 1–7, 2018. doi: [10.29252/3.4.1](https://doi.org/10.29252/3.4.1).
- [4] M. Niajalili, A. R. Nemati, H. Bakhshizadeh Kolori, and A. Kochakinejad, "Research on the effect of using optimal wires in car ignition system on its emissions," *J. Environ. Sci. Stud.*, vol. 6, no. 1, pp. 3383–3389, 2021. Available: https://www.jess.ir/article_122515_e8a167034_f8a11e4ea4dbf3ff6e0465b.pdf.
- [5] S. Ghanbarihamedani, "Survey and measure the environmental pollutants emitted from exhaust of commercial vehicles in an industrial unit," *J. Environ. Sci. Stud.*, vol. 1, no. 1, pp. 45–52, 2016. Available: https://www.jess.ir/article_46685_97dba5d82a1a5b45e8e7dd486ea4121e.pdf.
- [6] B. Mashadi and A. Maleki, "Influence of cylinder deactivation technology on fuel consumption and emissions of four-cylinder spark ignition engine," *J. Engine Res.*, vol. 35, no. 35, pp. 41–51, 2022. Available: https://www.engineerresearch.ir/article_697724_83821707fd5779c319f2daefc6cf340b.pdf.



بررسی تأثیر سلامت شمع و وایر روی آلاینده‌های خروجی موتور خودروهای بنزینی

مهدی نیاجلیلی^{۱*}، سبحان رضایی^۲، علی کوچکی نژاد^۳، مجتبی معصوم نژاد^۴

۱- مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲- کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۳- مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۴- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

کلمات کلیدی

آلاینده

سیستم جرقه زنی

شمع

محیط زیست

موتور خودرو

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

*نویسنده مسئول

مهدی نیاجلیلی

ایمیل

mmiajalili@nus.ac.ir

امروزه مسأله‌ی آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌عنوان یکی از چالش‌های بزرگ شهرهای پرجمعیت مطرح می‌باشد. در این میان به دلیل نقش برجسته خودرو به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان آلودگی، بررسی تجهیزات مؤثر در تولید آلاینده‌های آن بسیار حائز اهمیت است. با توجه به تأثیر کیفیت شمع و وایر در ایجاد آلودگی‌های خودرو، تحقیقات پیرامون تأثیر طول عمر این تجهیزات بر تولید آلاینده‌های خروجی موتور انجام شده است. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی تأثیر استفاده از شمع و وایر با کارکرد متفاوت روی آلاینده‌های خروجی موتور خودرو است. بدین‌صورت که شمع، در چهار گروه که شامل صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر و وایرها در دو بازه صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر در نظر گرفته شده و در هر مرحله پس از نصب روی خودرو، آلاینده‌های سمی خروجی از موتور شامل CO، HC و NOx مورد بررسی قرار گرفته است. برطبق بررسی‌های انجام‌شده، تولید هر سه گاز آلاینده تأثیر مستقیم با میزان کارکرد شمع و وایر دارد. این درحالی است که استهلاک شمع خودرو بیشترین تأثیر را روی گاز آلاینده HC گذاشته و حداکثر مقدار افزایش آلاینده‌ی در گروه‌های مطالعاتی به میزان ۵۱/۸، ۱۳/۸ و ۳۲ درصد به ترتیب برای گازهای CO، HC و NOx گزارش شده است.

۱- مقدمه

استفاده از سوخت‌های جایگزین [۵]، سوخت ترکیبی [۶]، انرژی الکتریکی [۷] و غیره را پیشنهاد داده‌اند. در کشور ایران، به‌عنوان یکی از کشورهای درحال توسعه، بسیاری از شاخص‌های آلودگی بیشتر از استاندارد گزارش شده است [۸]. از طرف دیگر صنعت حمل‌ونقل سهم قابل توجهی در مصرف منابع انرژی و همچنین تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی دارد [۹]. به‌گونه‌ای که برطبق مطالعات انجام‌شده نزدیک به ۴۰ درصد دی‌اکسیدکربن تولیدشده در سال ۲۰۲۰، توسط خودروها بوده است [۱۰]. افزایش روزافزون تعداد وسائل نقلیه و عبور و مرور آن‌ها، باعث شده است مسأله‌ی آلودگی مهم‌تر تلقی گردد. لذا با توجه به افزایش گسترش محدوده‌ی شهری و ازدیاد روزافزون استفاده از خودروها، مهم‌ترین مسأله‌ای که گریبان‌گیر شهرهای امروزی شده، افزایش آلودگی‌های

مسأله‌ی افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی در کشورهای مختلف به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات آن‌ها شناخته می‌شود. تولید بی‌رویه خودروها، کیفیت نامطلوب قطعات و سوخت غیراستاندارد ازجمله عواملی هستند که در تولید گازهای آلاینده می‌توانند بسیار مهم تلقی شوند. از طرف دیگر حجم بالای مصرف سوخت‌های سنگواره‌ای توسط خودروهای سواری از دلایل اصلی آلودگی هوا برشمرده می‌شود [۱]. لذا با توجه به این‌که کارکرد خودرو، ارتباط مستقیم با تولید آلاینده دارد، ضرورت تحقیق روی تجهیزات وابسته به تولید آلاینده خودرو افزایش‌یافته است. در این راستا محققان بسیاری پیرامون کنترل آلاینده‌ی خودروها و تجهیزات وابسته به آن پژوهش کرده‌اند [۲-۴]. با توجه به اهمیت کنترل آلودگی در خودروها، محققان بسیاری



برای شمع‌های چهار الکترودی ۱/۷۵ درصد کاهش هیدروکربن‌های نسوخته مشاهده گردیده است.

سید سجاد بیدوا و مرضیه حسن‌زاده [۳] تحقیقات خود را پیرامون بررسی آلودگی‌های تولیدشده ناشی از صنایع خودروسازی و راه‌های عملی برای کاهش این آلودگی‌ها انجام داده‌اند. آن‌ها در پروژه تحقیقاتی خود اذعان داشتند که با ورود وسایل حمل‌ونقل بنزینی و افزایش انبوه اتومبیل و نیاز روزافزون افراد به آن، افزایش آلودگی محیط‌زیست تحت تأثیر سامانه‌های حمل‌ونقل قرار گرفت. به‌گونه‌ای که امروزه سهم عمده‌ای از تغییرات اقلیمی را ناشی از آلاینده‌های تولیدشده از وسایل نقلیه می‌دانند. آلودگی‌های ناشی از بخش حمل‌ونقل را می‌توان به سه بخش آلودگی‌های هوا، صوتی و دیداری دسته‌بندی کرد. این محققان با بررسی سهم گروه‌های مختلف سیستم حمل‌ونقل در آلودگی منتشرشده در هوای تهران، بیشترین مقدار را برای خودروهای سبک و به میزان ۷۷/۲ درصد ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها در پژوهش خود، برخی از مهم‌ترین راهکارهای عملی برای کاهش آلودگی‌های ناشی از افزایش وسایل نقلیه را بررسی کرده و اعلام نمودند که استفاده از منابع سوختی پاک مانند LPG و CNG، بهینه‌کردن مهندسی موتور خودروها، استفاده از خودروهای جدید هیبریدی و فناوری‌های نوین برای ساخت خودروهایی با وزن کمتر، از جمله مهم‌ترین راه‌های مقابله با این آلودگی‌ها می‌باشد. همچنین آن‌ها این نظر را داشتند که استفاده از وسایل حمل‌ونقل عمومی مانند قطار شهری، اتوبوس، مونوریل، تاکسی و دوچرخه نقش به‌سزایی در کاهش آلودگی هوا خواهد داشت.

ابراهیم عبیدی و همکاران [۶] روی تأثیر استفاده از موتورهای ترکیب‌سوز بر پارامترهای خروجی موتور پژوهش کرده‌اند. این محققان با بیان این‌که نوع سوخت خودروها اثر قابل‌توجهی در تولید گازهای گلخانه‌ای دارد، استفاده از موتور اشتعال جرقه‌ای ترکیب‌سوز را پیشنهاد داده‌اند. آن‌ها بیان کردند که با توسعه موتورهای ترکیب‌سوز می‌توان به مزایای خودروهای بنزینی و گازسوز دست یافت. لذا موتور را در دو حالت گازسوز و ترکیب‌سوز با هم مقایسه کرده و در نهایت اعلام نمودند که غلظت HC در حالت موتور ترکیب‌سوز بیشتر از گازسوز بوده اما مقدار CO موجود در گازهای خروجی در حد قابل قبولی کاهش یافته است.

مهدی نیاجلیلی و همکاران [۴] در پژوهشی با بررسی وایرهای بهینه در سیستم سوخت‌رسانی، تأثیر استفاده از این وایرها در آلاینده‌های خروجی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. آن‌ها

ناشی از حمل‌ونقل شهری است. باوجود آمارهایی که از مقایسه میزان آلاینده‌های تهران با استانداردهای جهانی صورت می‌گیرد، اصلی‌ترین مشکل زیست‌محیطی این شهر، که به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهرهای ایران است را می‌توان، مسأله آلودگی هوا دانست [۱۱]. بهروز مشهدی و اردلان ملکی [۱۲] بحث آلاینده‌های را از مهم‌ترین مباحث دنیای خودروها دانسته و ارائه راهکار مناسب برای کاهش مصرف سوخت، کاهش تولید گاز گلخانه‌ای، بهبود کیفیت هوا و توقف تولید گازهای سمی را ضروری اعلام کرده‌اند.

آندرس آرسیلا و همکاران [۱۳] اثر افزایش مالیات روی خودروهایی با آلودگی بیشتر را در کشور چین مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها با بیان اینکه آلودگی هوا پیامدهای نامطلوبی برای سلامت انسان دارد، اعمال مالیات بر خودروهایی با آلودگی بیشتر را مفید دانسته‌اند. این محققان اعلام کردند که در پی افزایش مالیات روی این خودروها، انتشار همه آلاینده‌های مورد بررسی کاهش یافته که در بیشترین حالت مقدار ذرات معلق و مونوکسید کربن ۱۱ درصد کاهش یافته است.

میثم صفر و همکاران [۱۴] با بررسی شمع‌های چند الکترودی، تحقیقاتی را پیرامون بهبود عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌های خروجی انجام داده‌اند. آن‌ها بررسی‌های خود را پیرامون تأثیر استفاده از شمع‌های دو و چهار الکترودی روی پارامترهای گشتاور ترمزی، توان ترمزی و آلاینده‌های در دور موتور ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه، در دو حالت استفاده از بنزین معمولی و بنزین با افزودنی انجام داده‌اند. آن‌ها بعد از انجام تحقیقات خود این‌گونه بیان داشتند که استفاده از شمع‌های دو و چهار الکترودی باعث افزایش گشتاور و توان ترمزی در هر دو حالت استفاده از بنزین معمولی و نیز به همراه افزودنی گردیده است که این افزایش در حالتی که از بنزین معمولی استفاده شده است، بیشتر می‌باشد. هم‌چنین آن‌ها در مورد بررسی میزان تولید آلاینده‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که انتشار اکسیدهای نیتروژن در حالت استفاده از بنزین معمولی و در شمع دو الکترودی ۲/۲۳ درصد و برای شمع چهار الکترودی ۳/۲۳ درصد افزایش داشته که این افزایش برای بنزین به همراه افزودنی برای شمع دو الکترودی به‌طور میانگین ۱/۱ درصد و برای شمع چهار الکترودی ۱/۸۵ درصد گزارش شده است. این درحالی است که انتشار هیدروکربن‌های نسوخته کاهش یافته است. به‌طوری‌که در حالت استفاده از بنزین معمولی و شمع‌های دو الکترودی ۳/۴۶ درصد و برای شمع‌های چهار الکترودی ۶/۶۷ درصد و در حالت استفاده از بنزین با افزودنی و شمع‌های دو الکترودی ۱/۰۲ درصد و

توسط واحد کنترل الکترونیکی خودرو انجام می‌شود. در مرحله بعد جریان برق ایجاد شده از طریق وایرها به شمع رسیده و جرقه زده می‌شود تا عمل احتراق در موتور انجام شود [۴].

با توجه به این که موضوع اصلی تحقیق حاضر در مورد تأثیر کارکرد شمع و وایر خودرو در آلاینده‌های خروجی خودرو می‌باشد، در این قسمت توضیحات پیرامون این قطعات، وظایف و تأثیرات ناشی از خرابی آن‌ها در آلاینده‌های خروجی خودرو آورده شده است. وظیفه شمع، ایجاد جرقه به منظور مشتعل ساختن مخلوط هوا و بنزین در داخل سیلندر است. نکته حائز اهمیت این است که جرقه‌زنی باید با ولتاژ بسیار بالا، چند بار در ثانیه، در معرض حرارت بالا و در فشار هوای بالا انجام گیرد. مهم‌تر آن که کوچک‌ترین خللی در عملکرد این قطعه باعث افت بازده موتور، آلودگی محیط‌زیست و صدمه به دیگر اجزای موتور می‌گردد. اجزا و قطعات اصلی تشکیل‌دهنده شمع به ترتیب بدنه یا حفاظ، الکتروود جانبی، عایق و الکتروود مرکزی می‌باشند. در بطن عایق، قطعه‌ی میله‌ای شکلی از رسانای فلزی قرار داده شده است که از بالا تا پایین امتداد یافته است. هر شمع دارای یک بخش فلزی است که در بالا به صورت شش‌گوش بوده و از بخش روزه شده پایین به سرسیلندر متصل می‌شود [۱۵]. در بعضی از شمع‌ها، در راستای الکتروود مرکزی شمع، یک مقاومت الکتریکی قرار می‌دهند. مقدار این مقاومت بین ۵ تا ۸ کیلو اهم با توجه به نوع شمع متفاوت است. چنانچه فیلر دهانه شمع از حد مجاز کمتر شود، ولتاژ جرقه کاهش می‌یابد و حداقل ولتاژ تابع مقاومت مسیر ولتاژ از کوئل تا شمع است [۱۶]. شکل ۱ نمای شماتیک از شمع خودرو را نشان می‌دهد. در مورد وایرها هم این نکته حائز اهمیت است که با توجه به این که جریان برق ایجاد شده توسط کوئل از طریق وایرها به شمع رسیده و جرقه زده می‌شود تا عمل احتراق در موتور انجام شود، لذا وایرهای خودرو به‌عنوان عاملی مهم در انتقال برق کوئل به شمع‌ها محسوب می‌شوند. از این رو مقاومت وایرها در کیفیت جرقه تأثیرگذار می‌باشد. مقاومت داخلی وایرها نباید از ۵ کیلو اهم بیشتر باشد. افزایش مقاومت باعث می‌شود که کیفیت ارسال برق به شمع‌ها و به تناسب آن جرقه ایجاد شده ضعیف‌تر گردد [۴].

یکی از مهم‌ترین وظایف شمع خودرو به‌غیر از جرقه‌زنی، انتقال مناسب حرارت از درون اتاق انفجار به بیرون است. عایق شمع درجه حرارتی 800°C را به‌خوبی تحمل می‌کند. اما در 900°C مقاومت عایق بودن آن ضعیف شده و ولتاژ الکتروود میانی را به بدنه هدایت می‌کند. بنابراین وضعیت شمع در ساختمان موتور باید طوری طراحی گردد تا

تحقیقات خود را روی شش خودرو سالم و معیوب انجام داده و به این نتیجه رسیده‌اند که مقدار پارامتر O_2 در تمامی موارد کاهش داشته است که این موضوع نشان‌دهنده احتراق کامل‌تر می‌باشد. آن‌ها همچنین بیان داشتند که کاهش گازهای آلاینده CO و HC نیز در زمان استفاده از وایرهای بهینه در خودروهای سالم کاملاً مشهود بود، به‌گونه‌ای که میانگین کاهش CO در خودروهای سالم را حدود ۶۰ درصد بیان کرده‌اند. آن‌ها در مورد تغییرات غیرعادی گازهای آلاینده در خودروهای دارای ایرادات فنی، این‌گونه بیان کردند که ایرادات این خودروها در بخش‌های موتوری، جرقه و سوخت‌رسانی بوده که تأثیر مستقیم روی کیفیت احتراق می‌گذارد و لذا استفاده از این نوع وایر، روی خودروهایی با نقص فنی را توصیه نکرده و در نهایت اعلام کردند که استفاده از وایرهای بهینه در سیستم سوخت‌رسانی خودرو، با کاهش مقدار آلاینده‌های زیست‌محیطی، موجب داشتن هوای پاک و سالم می‌گردد.

در این پژوهش در مرحله اول تشریح عملکرد شمع و وایر خودرو آورده شده است. در مرحله بعد، در هشت مرحله و چهار تکرار، شمع‌ها و وایرهایی با کارکرد متفاوت روی سیستم جرقه‌زنی خودرو نصب شده و تأثیر آن بر آلاینده‌های خروجی موتور مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- روش کار

۲-۱- تشریح تجهیزات مورد بررسی و آلاینده‌ها

برای ایجاد جرقه در موتور و شروع فرآیند احتراق، از قطعاتی همچون کوئل، دلكو، وایر و شمع، که از اجزای سیستم جرقه‌زنی می‌باشند، استفاده می‌شود. در خودروهایی با تکنولوژی قدیمی جرقه‌زنی، از قطعاتی همچون دلكو و کوئل بهره می‌بردند. دلكو و کوئل وظیفه تولید و تقسیم برق و جرقه موردنیاز را دارند. با پیشرفت تکنولوژی این سیستم قدیمی جای خود را به کوئل‌های دبل داد که دستور جرقه را از واحد کنترل الکترونیکی خودرو دریافت کرده و از طریق وایرها، جرقه را به شمع منتقل می‌کند. امروزه بعضی از خودروها برای هریک از شمع‌ها از یک کوئل به‌صورت جداگانه استفاده می‌کنند. در این سیستم دیگر از وایر مرسوم استفاده نشده و کوئل به‌صورت مستقیم همراه یک وایر بسیار کوتاه روی شمع قرار می‌گیرد. ولتاژ ابتدایی حدود ۱۲ ولت بوده و کار کوئل این است که ولتاژ برق را بالا ببرد تا برای ایجاد جرقه توسط شمع مناسب باشد. در خودروهای قدیمی، برق بعد از کوئل وارد دلكو می‌شود. دلكو کار تقسیم برق به شمع‌ها و همچنین زمان‌بندی ایجاد جرقه در شمع را برعهده دارد. در اتومبیل‌های انژکتوری این کار

۲-۲- مطالعه موردی و آزمایش تجربی

برای تعیین میزان تأثیر استفاده از شمع‌ها با کارکرد متفاوت روی آلایندگی خودرو، از یک خودرو پراید با مشخصات موجود در جدول ۱ استفاده شده است.

در این مرحله چهار گروه شمع در بازه‌های کارکرد صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر و دو گروه وایر با کارکرد صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر در نظر گرفته شده است. شمع‌های مورد استفاده در این پژوهش در تمام حالات از برند NGK با کد فنی BKR6E و وایرهای مورد استفاده هم از برند I.P.N.C در نظر گرفته شده است. شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب نمایی از شمع‌ها (یک نمونه از هر گروه) و وایرهای نصب شده روی خودروی مطالعاتی را نشان می‌دهند.

جدول ۱: مشخصات فنی و وضعیت تجهیزات خودروی مطالعاتی

مشخصات فنی [۱۸]	
نام خودرو	پراید ۱۳۱
سال ساخت	۱۳۹۰
کد موتور	M13
نوع ECU	S2000
نسبت تراکم	۹/۷ : ۱
حجم موتور (سی)	۱۳۲۳
استاندارد آلایندگی	Euro 4
نوع سوخت	بنزین
سیستم سوخت‌رسانی	انژکتور
سیستم پاشش	چند نقطه‌ای
وضعیت سلامت تجهیزات	سالم و بدون ایراد
وضعیت سیستم سوخت‌رسانی	سالم و بدون خطا
وضعیت سنسورها	سالم
کاتالیست	سالم
سرویس‌های دوره‌ای	انجام شده است

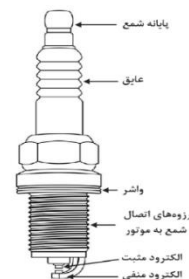


شکل ۲: نمایی از نمونه شمع‌های مورد استفاده برای آزمایش دارای کارکرد به ترتیب (بر حسب هزار کیلومتر):

(الف صفر تا ۱۰ - ب ۱۰ تا ۲۰ - ج ۲۰ تا ۳۰ - د ۳۰ تا ۴۰)

درجه حرارت آن از ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلیسیوس تجاوز نکند. از طرفی درجه حرارت کمتر از ۵۰۰°C برای شمع مناسب نمی‌باشد؛ زیرا باعث سرد ماندن شمع و رسوب‌گیری در آن می‌شود. ظرفیت انتقال حرارت در شمع، ارزش حرارتی آن را معین می‌کند. براساس ارزش حرارتی و نوع موتور، شمع‌ها در دو نوع ساخته می‌شوند که عبارتند از: شمع پایه کوتاه یا سرد و شمع پایه بلند یا گرم. به شمع‌هایی که حرارت را سریعاً انتقال می‌دهد شمع سرد و به شمع‌هایی که کندتر حرارت را انتقال داده و مقداری از حرارت را در خود نگه می‌دارد، شمع گرم اطلاق می‌گردد. شمع‌های سرد اصولاً در موتورهای با ضریب تراکم بالا مثل موتورهای توربو و موتورهای تقویت‌شده کاربرد دارند. شمع‌های گرم معمولاً برای خودروهای استاندارد که هم در دورهای پایین مثل ترافیک‌های روزمره و هم در دورهای بالا مثل جاده کار می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵].

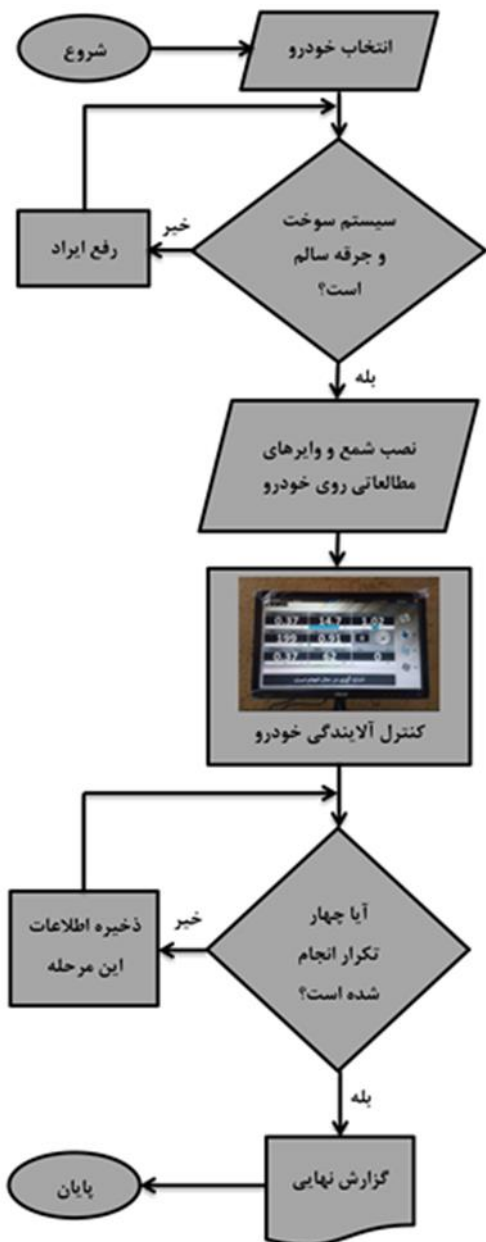
در موتورهای بنزینی عمده آلاینده‌های خروجی ناشی از احتراق شامل موارد HC، CO، و NOx می‌باشد [۱۷]. در ایران حداکثر مقدار مجاز گازهای آلاینده CO و HC به ترتیب ۰/۷ درصد حجمی و ۲۵۰ ppm در نظر گرفته شده که آلایندگی خودروها جهت اخذ برگه معاینه فنی نباید از این مقادیر تجاوز کند. لازم به ذکر است که سنجش گاز NOx برای دریافت برگه معاینه فنی الزامی نیست. مونوکسید کربن یا CO به دلیل احتراق ناقص و ایراد در سیستم جرقه‌زنی و پاشش مانند شمع، وایر و سوزن انژکتورها تولید می‌شود. از جمله نشانه‌های ظاهری برای بالا بودن CO خروج دود سیاه در دور بالا از اگزوز می‌باشد. علاوه بر این، وجود ایراد در کاتالیست خودرو نیز می‌تواند باعث بالا رفتن مقدار CO از حد مجاز شود. هیدروکربن‌های نسوخته یا HC به دلیل احتراق ناقص از اگزوز خارج می‌شود. این گاز که به شدت سمی بوده و باعث ایجاد بوی نامطبوع و دود سیاه در خروجی اگزوز می‌شود. اکسیدهای نیتروژن یا NOx نیز در اثر ترکیب گاز نیتروژن با اکسیژن در درجه حرارت بالای محفظه احتراق تولید می‌شوند. این گاز بسیار واکنش‌پذیر بوده و می‌تواند به‌عنوان یک عامل مهم در آلودگی هوا تلقی گردد.



شکل ۱: نمایی شماتیک از شمع خودرو

۳- نتایج و بحث

در اولین حالت از یکدست وایر در محدوده بین صفر تا ۲۰ هزار کیلومتر کارکرد، برای چهار گروه شمع در محدوده‌های کاری صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر استفاده شده و سنجش آلاینده‌ها برای آن انجام شده است. در حالت بعد، از وایرهایی با کارکرد ۲۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر برای شمع‌ها با دسته‌بندی مذکور استفاده شده است. شکل ۵ تا شکل ۷ نمودار مقایسه مقادیر پارامترهای CO، HC و NOX برای دو حالت مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۴: فلوجارت کلی پژوهش حاضر برای هر مرحله آزمایش

از این رو، در هشت مرحله این شمع و وایرها روی خودروی مطالعاتی نصب شده و توسط دستگاه تست ۵ گاز NEW SPX مدل ULTIMATE 500 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. لازم به ذکر است دستگاه سنجش آلاینده‌ها مذکور دارای برگه کالیبراسیون با احتمال تطابق بالای ۹۹ درصد بوده و در زمان سنجش آلاینده‌ها خودروی مطالعاتی از سلامت کامل برخوردار بوده است. جدول ۲ مشخصات دستگاه سنجش آلاینده‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات دستگاه سنجش آلاینده‌ها [۱۹]

نام دستگاه	New SPX	
مدل	ULTIMATE 500	
کشور سازنده	فرانسه	
فشار محیط کاری دستگاه (میلی‌بار)	۷۵۰-۱۱۵۰	
حداکثر زمان پیش‌گرمایش (دقیقه)	۹	
CO (درصد حجمی)	۰-۱۵	محدوده اندازه‌گیری
CO ₂ (درصد حجمی)	۰-۲۰	
HC (ppm)	۰-۲۰۰۰۰	
O ₂ (درصد حجمی)	۰-۲۵	
NO _x (ppm)	۰-۵۰۰۰۰۲	
λ	۰-۹.۹۹	

جهت اطمینان از صحت اطلاعات، هر کدام از مراحل در چهار تکرار انجام شده و میانگین پارامترها در نظر گرفته شده است. فلوجارت کلی این پژوهش از زمان انتخاب خودرو تا گزارش‌گیری نهایی برای هر مرحله از آزمایش شمع و وایر در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل نمایی از دستگاه سنجش آلاینده‌ها NEW SPX در زمان ثبت اطلاعات نیز نشان داده شده است.



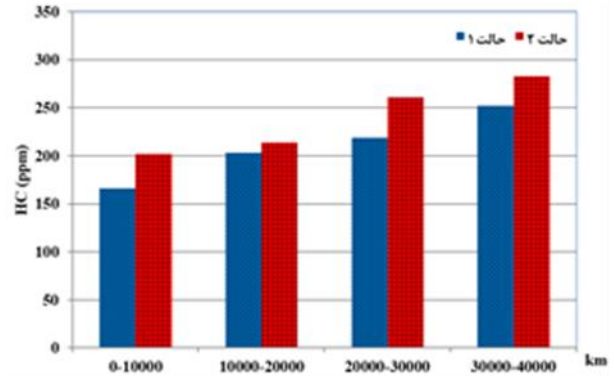
شکل ۳: نمایی از وایرهای مورد استفاده برای آزمایش که دارای کارکرد به ترتیب (بر حسب هزار کیلومتر): الف) صفر تا ۲۰ (ب) ۲۰ تا ۴۰

این که گروه بندی شمع جهت انجام آزمایش سنجش آلاینده‌گی، در محدوده‌ای با فاصله ۱۰ هزار کیلومتر در نظر گرفته شده است، جهت بررسی دقیق‌تر، این افزایش آلاینده‌گی در دسته بندی‌های کامل تر و برای دو حالت گزینش وایر، در جدول ۳ آورده شده است.

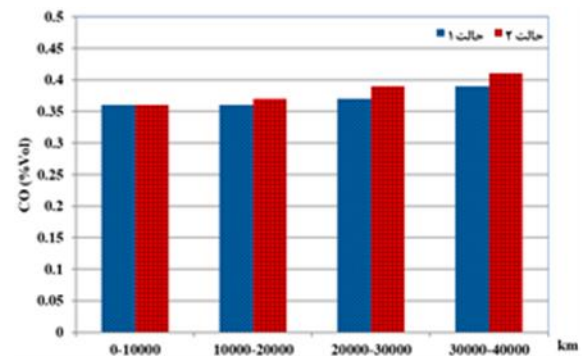
همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، درحالتی که شمع خودرو در محدوده کارکرد ۳۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر است در مقایسه با شمع با کارکرد صفر تا ۱۰ هزار کیلومتر، ۵۱/۸ درصد HC بیشتر، ۸/۳ درصد CO بیشتر و ۲۰/۹ درصد NOx بیشتر گزارش شده است که محدوده کارکرد وایر برای این حالت صفر تا ۲۰ هزار کیلومتر می باشد. این افزایش در محدوده کارکرد ۲۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر وایر، ۴۰ درصد HC، ۱۳/۸ درصد CO و ۳۲ درصد NOx بیشتر، ارزیابی شده است.

جدول ۳: درصد افزایش گازهای آلاینده در بازه های مختلف کارکرد شمع و وایر خودرو

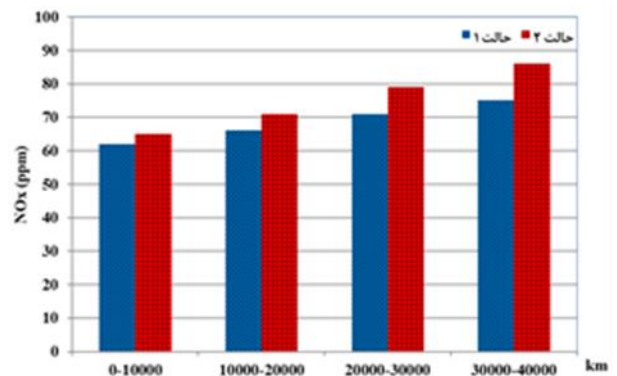
محدوده کارکرد وایر (هزار کیلومتر)	محدوده کارکرد شمع (هزار کیلومتر)	درصد افزایش گاز آلاینده HC	درصد افزایش گاز آلاینده CO	درصد افزایش گاز آلاینده NOx
۰ تا ۱۰	۰ تا ۲۰	نسبت ۱۰ تا ۲۰	۰	۶/۴
۱۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۳۰	نسبت ۲۰ تا ۳۰	۲/۷	۷/۵
۲۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۴۰	نسبت ۳۰ تا ۴۰	۵/۴	۵/۶
۳۰ تا ۴۰	۴۰ تا ۵۰	نسبت ۱۰ تا ۲۰	۲/۷	۱۴/۵
۰ تا ۱۰	۱۰ تا ۲۰	نسبت ۲۰ تا ۳۰	۸/۳	۱۳/۶
۱۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۳۰	نسبت ۱۰ تا ۲۰	۸/۳	۲۰/۹
۲۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۴۰	نسبت ۱۰ تا ۲۰	۲/۷	۹/۲
۳۰ تا ۴۰	۴۰ تا ۵۰	نسبت ۲۰ تا ۳۰	۵/۴	۱۱/۲
۰ تا ۱۰	۱۰ تا ۲۰	نسبت ۳۰ تا ۴۰	۵/۱	۸/۸
۱۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۳۰	نسبت ۱۰ تا ۲۰	۸/۳	۲۱/۵
۲۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۴۰	نسبت ۲۰ تا ۳۰	۱۰/۸	۲۱/۱
۳۰ تا ۴۰	۴۰ تا ۵۰	نسبت ۱۰ تا ۲۰	۱۳/۸	۳۲



شکل ۵: مقادیر مربوط به پارامتر HC برای چهار گروه کارکرد شمع و دو حالت کارکرد وایر



شکل ۶: مقادیر مربوط به پارامتر CO برای چهار گروه کارکرد شمع و دو حالت کارکرد وایر



شکل ۷: مقادیر مربوط به پارامتر NOx برای چهار گروه کارکرد شمع و دو حالت کارکرد وایر

برطبق بررسی های انجام شده، کارکرد شمع و وایر در اکثر حالات باعث افزایش گازهای آلاینده شده است. همان طور که در شکل ۵ تا شکل ۷ مشخص است، افزایش عمر کارکرد شمع خودرو تأثیر مستقیم روی افزایش آلاینده های HC، CO و NOx دارد. این افزایش که در گاز آلاینده HC نسبت به دو مورد دیگر بیشتر است، به جز در یک مورد برای گاز CO، که این پارامتر با افزایش ده هزار کیلومتر کارکرد شمع تغییری نکرده است، در کل دسته بندی ها با افزایش کیلومتر کارکرد شمع، مقدار گازهای آلاینده افزایش یافته است. با توجه به

۴- نتیجه‌گیری

افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی به‌عنوان چالش مهمی در شهرهای پرجمعیت مطرح می‌باشد. از سمت دیگر خودروها به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان آلاینده‌های سمی در ایران برآورد شده‌اند. لذا تحقیق و پژوهش پیرامون تجهیزات تأثیرگذار در تولید آلاینده‌ی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش بررسی‌ها روی تأثیر کارکرد دو مورد از مهم‌ترین قطعات سیستم جرقه‌زنی شامل شمع و وایر بر آلاینده‌های زیست‌محیطی HC، CO و NOx انجام شده است. بدین‌صورت که شمع‌ها در چهار گروه کارکرد که شامل صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر دسته‌بندی شده و در دو حالت با وایرهایی با کارکرد صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ هزار کیلومتر در نظر گرفته شده‌اند.

در مرحله بعد، در هر حالت توسط دستگاه سنجش آلاینده‌ی، که از نوع NEW SPX است، مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته‌اند. جهت افزایش دقت پارامترهای استخراج‌شده، در هر مورد از آزمایش، چهار تکرار انجام شده است. در حالت کلی نتایج زیر به‌دست آمده است:

۱- استهلاک قطعات به‌جز در یک مورد، در تمام حالات باعث افزایش هر سه گاز آلاینده موردبررسی شده است.

۲- درصد افزایش آلاینده‌های گروه‌های مطالعاتی در بیشترین حالت به ترتیب ۵۱.۸، ۱۳/۸ و ۳۲ درصد، برای آلاینده‌های CO، HC و NOx گزارش شده است.

۳- استهلاک قطعات موردبررسی بیشترین تأثیر را رو تولید گاز HC دارد.

۴- گاز مونوکسید کربن کمترین تغییرات را در مقابل افزایش عمر شمع و وایر از خود نشان داده است به‌گونه‌ای که تغییرات آن در محدوده کم کارکرد قطعات نزدیک به صفر ارزیابی شده است.

۵- در محدوده استهلاک بالاتر درصد افزایش گاز NOx با شیب بیشتری نسبت به دو گاز دیگر حرکت می‌کند.

لذا در حالت کلی می‌توان گفت، تعویض به‌موقع شمع و وایر خودرو می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش آلاینده‌های مورد مطالعه داشته و با پایش دقیق‌تر خودروها در این مقوله، می‌توان محیط‌زیست پاک‌تری را به ارمغان آورد.

۵- منابع

[1] M. Salehi and H. Faghani, "Investigation of emissions and energy consumption of DENA hybrid electric vehicle," *J. Engine Res.*, vol. 58, no. 58, pp. 11–16, 2020. Available: https://www.engineerresearch.ir/article_697861_59a56fe59c7e12fa87266f58c365c7cc.pdf.

[2] K. Aliakbari, S. M. M. Delavari, and M. Sheykhi, "Numerical simulation of EF7 engine in different operating conditions," *Sci. Technol. Mech. Eng.*, 2024. doi: [10.22034/stme.2024.446307.1056](https://doi.org/10.22034/stme.2024.446307.1056).

[3] S. S. Bidva and M. Hasanzadeh, "Environmental review of the automotive industry and the ways to reduce its pollution," *J. Environ. Res. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 1–7, 2018. doi: [10.29252/3.4.1](https://doi.org/10.29252/3.4.1).

[4] M. Niajalili, A. R. Nemati, H. Bakhshizadeh Kolori, and A. Kochakinejad, "Research on the effect of using optimal wires in car ignition system on its emissions," *J. Environ. Sci. Stud.*, vol. 6, no. 1, pp. 3383–3389, 2021. Available: https://www.jess.ir/article_122515_e8a167034f8a1e4ea4dbf3ff6e0465b.pdf.

[5] B. Shadidi, H. Haji Agha Alizade, G. Najafi, S. A. Moosavian, and M. Khazaei, "Investigation of performance and exhaust emission of diesel engine in different ratios of lambda coefficient using diesel-ethanol fuel blends," *J. Engine Res.*, vol. 60, no. 60, pp. 19–28, 2022. Available: https://www.engineerresearch.ir/article_697880_9a862f952e34c585dc9a7c415e5fecc8.pdf.

[6] E. Abdi Aghdam, M. Ataee Tarzanagh, and J. Kanani, "The output performance of the 25% gasoline-75% NG combination mode and its comparison with NG mode," *J. Engine Res.*, vol. 71, no. 1, pp. 40–51, 2024. doi: [10.22034/er.2024.2025041.1037](https://doi.org/10.22034/er.2024.2025041.1037).

[7] F. Ommi, S. Soury, and E. Rostami, "Design and simulation of a hybrid electric vehicle in order to increasing efficiency and reducing pollution," *J. Engine Res.*, vol. 37, no. 37, pp. 35–48, 2022. Available: https://www.engineerresearch.ir/article_697736_4065d11beaa4956b91e82b75cee04987.pdf.

- [13] A. Arcila, T. Chen, and X. Lu, "The effectiveness of consumption tax on the reduction of car pollution in China," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 134, p. 104302, 2024.
- [14] M. Safar, F. Ommi, and Z. Saboohi, "Experimental study of the effects of multi-electrode spark plugs to improve engine performance and reduce pollutants of the XU7JP/L3 engine," *J. Mech. Eng.*, vol. 50, no. 4, pp. 105–113, 2021. doi: [10.22034/jmeut.2021.9959](https://doi.org/10.22034/jmeut.2021.9959).
- [15] M. Baghani and A. HoseinAbadi, "Car spark plug," *Mater. World J.*, vol. 9, pp. 17–19, 2010.
- [16] A. Ahmad, A. Shahram, D. Davood, and G. Kiomarc, *Fuel and ignition system for passenger cars*, Iranian Textbook Publishing Company, 2019. (in Persian)
- [17] E. Akbarpouran Khayati et al., "Reduction of emissions and fuel consumption of diesel engine by using common rail fuel injection and aftertreatment systems," *J. Engine Res.*, vol. 68, no. 68, pp. 3–11, 2022. doi: [10.22034/er.2022.697921](https://doi.org/10.22034/er.2022.697921).
- [18] *M13 Engine Repair Manual*, Saipa Motor Corporation. Available: <https://www.saipacorp.com/>. (in Persian)
- [19] *Gas Analyzer, ULTIMATE 500 NEW SPX*. Available: <https://parizanzabazar.ir/>. (in Persian)
- [8] S. Khalilzadeh, Z. Khalilzadeh, H. Emami, and M. R. Masjedi, "The relation between air pollution and cardiorespiratory admissions in Tehran," 2009.
- [9] M. R. Saberi, A. Ghandehariun, and E. Naghashzadeh, "Investigating the sustainability of diesel, biodiesel and hydrogen fuels in diesel engines with the approach of sustainable development analysis," *Sci. Technol. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 101–113, 2023. doi: [10.22034/stme.2023.409418.1042](https://doi.org/10.22034/stme.2023.409418.1042).
- [10] R. Zhang and S. Fujimori, "The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios," *Environ. Res. Lett.*, vol. 15, no. 3, p. 034019, 2020.
- [11] S. Ghanbarihamedani, "Survey and measure the environmental pollutants emitted from exhaust of commercial vehicles in an industrial unit," *J. Environ. Sci. Stud.*, vol. 1, no. 1, pp. 45–52, 2016. Available: https://www.jess.ir/article_46685_97dba5d82a1a5b45e8e7dd486ea4121e.pdf.
- [12] B. Mashadi and A. Maleki, "Influence of cylinder deactivation technology on fuel consumption and emissions of four-cylinder spark ignition engine," *J. Engine Res.*, vol. 35, no. 35, pp. 41–51, 2022. Available: https://www.engineerresearch.ir/article_697724_83821707fd5779c319f2daefc6cf340b.pdf.



Investigating the effect of environmental conditions and fuel type on the energy and exergy parameters of a steam power plant

Reza Babaei^{*1}, Meysam Mahmoudi², Mohsen Kiamansouri³, Milad Khanchoupan⁴, Elham Moghadamnia⁵

1. Ph.D, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran.

3. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Noushahr, Iran.

4. B.Sc, Departeman of chemical engineering, faculty of engineering, university of urmia, urmia, iran.

5. M.Sc, Department of Technology Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Due to the existence of various gas sources in various regions of the country, the extracted natural gas has different heat value, which has a significant impact on the performance of the power plant. In the current research, the effect of natural gas extracted in various regions of Iran, including Khangiran, Kangan, Pars, Bidboland, Ahvaz and Sarakhs on Ramin Ahvaz steam power plant was investigated. Power plant cycle modeling has been done using EES software and the effect of parameters such as ambient temperature and relative humidity on net power, exergy destruction rate, energy and exergy efficiency has been investigated. The amount of additional air to provide the flame temperature of 2000 °C was calculated between 12 and 17.5% for various regions. Investigating the increase in temperature from 5 to 40 °C showed that the net power output of the power plant decreases to 14 MW and of the exergy destruction rate in the condenser increases to 16 MW. At 25 °C, the maximum exergy destruction rate is related to Bidbland region with 500 MW and the lowest rate is related to Sarakhs region with 370 MW. For low relative humidity, the reduction of energy and exergy efficiency is 4.7% and 4%, respectively, and for saturated humidity, it is 9% and 8.3%, respectively, which it indicates the increasing effect of ambient humidity with increasing temperature.

Keywords

Energy and exergy analysis
steam power plant
natural gas
exergy destruction rate
EES
Dynamic Analysis
Gearbox
Remaining Useful Life
Vibration Analysis

Received: 10.24.2024

Revised: 12.22.2024

Accepted: 01.18.2025

*Corresponding Author

Reza Babaei

Email

r.babaei@modares.ac.ir

1- Introduction

Although new energy sources such as renewable energies are growing due to technological advancements, fossil fuels account for 62% of the power generation in power plants [1]. This value shows that optimization and performance improvement are very important. Although energy analysis of power plant subsystems provides important information about the operation of

equipment, exergy analysis is used to examine the quality of the energy transfer process and find points in the system that have irreversible losses. By knowing these points, a corrective solution can be provided to reduce losses and increase the efficiency of the power plant. These corrections include adjusting the operating pressure of the equipment or replacing it with another equipment.



Haji Dolu and Vosouq [2] analyzed the energy and exergy of a supercritical power plant (Ramin, Ahvaz) by considering two assumptions of constant pressure and constant temperature for the condenser. They showed that assuming constant pressure, exergy loss in the condenser decreases with increasing temperature, but if the temperature is assumed to be constant, this process is reversed. They also reported a decrease in boiler and condenser efficiency with increasing ambient temperature. Ahmadi and Toghræi [3] studied the energy and exergy analysis of the Montazeri power plant in Isfahan and wrote the governing equations including mass, momentum and energy continuity using EES software. They showed that the condenser has the highest thermal energy loss. The condenser wastes more than 70% of the input fuel energy. Of course, this is inevitable given the need to liquefy the steam exiting the turbines. The exergy quality analysis also shows that 85% of exergy loss occurs in the power plant boiler. This high amount of loss is due to entropy and irregularities in the chemical reaction process resulting from combustion in the boiler combustion chamber. Sidor et al. [4] also showed, by analyzing the energy and exergy of an industrial boiler, that the exergy destruction in it is 65%. They increased the efficiency of the power plant through variable speed in the boiler fan and heat recovery from the exhaust smoke from the chimney. Athir et al. [5] studied the energy and exergy parameters including equipment irreversibility, exergy losses, and input energy losses in the temperature range of 5 to 30 Celsius. In this temperature range, the exergy efficiency decreases from 35.6% to 32%. Al-Jandi et al. [6], by studying the Al-Hussein power plant in Egypt, showed that the condenser with 134 MW has the largest share in the amount of losses. This amount of loss for the boiler is 13 MW. The maximum amount of exergy destruction occurs in the boiler. This amount is 77%, which can be reduced by preheating the input air .

The innovation of the present work can be stated as follows:

In the aforementioned research, the focus was on one type of fuel (coal, natural gas, etc.), but in the

present study, the effect of different types of natural gas extracted in Iran on the performance of the power plant is investigated, considering their calorific value and different compositions.

In the present work, the effect of temperature and humidity on the performance of the power plant is simultaneously investigated, and the effect of these parameters on energy and exergy efficiencies is investigated.

In the present work, the combustion process in the boiler is fully simulated, and the amount of excess air to produce an adiabatic flame temperature of 2000 Celsius is calculated for different types of natural gas.

2- Research Methods

The Ramin Ahvaz power plant is a supercritical steam power plant with 4 operating units (Fig. 1). Each unit consists of a single-pass boiler, high-pressure, medium-pressure and low-pressure turbines, three high-pressure heaters and four low-pressure heaters, and a feed tank. The nominal power generation capacity for each unit is 315 MW [2]. The volumetric flow rate of fuel (or natural gas) and the amount of air required for combustion are 69,000 and 690,000 cubic meters per second, respectively. For modeling the cycle system, the steady-state cycle is considered and the combustion process in the boiler is considered complete. In the present work, a limit of 2000 Celsius is considered for the adiabatic flame temperature. The superheated steam temperature and pressure are 540 Celsius and 24 MPa, respectively. The feed water flow rate to the boiler is 1017 ton/hr and the cooling water flow rate in the condenser is 10000 kg/s. The efficiency of the turbines (high, medium and low pressure) is assumed to be 80% and that of the pumps is assumed to be 75%. The temperature range is considered to be 5-40 Celsius and the relative humidity is considered to be variable between zero and 100%. The standard pressure is one atmosphere and the relative humidity is considered to be 30% in the initial design state.

3- Discussion and Results

Figure 2 shows the effect of ambient temperature on net power output. The output power reduction in the temperature range of 5-40°C is from 310.7 MW to 296.7 MW (a 14 MW reduction). Figure 3 also shows the effects of ambient temperature on the condenser exergy destruction rate. An increase in ambient temperature increases the temperature of the water entering the condenser (outlet of the cooling tower), which increases the exergy destruction rate.

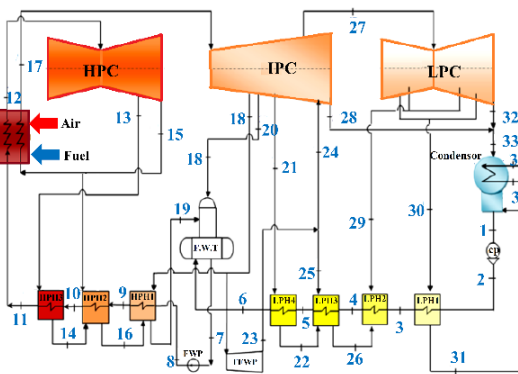


Figure 1: Schematic of the cycle of the Ramin Power Plant in Ahvaz [2]

Figure 4 and 5 show the energy and exergy efficiency values in terms of ambient temperature at different relative humidity values. It is observed that with increasing ambient temperature, the graphs diverge from each other. Also, at constant ambient temperature values, the energy and exergy efficiency values decrease with increasing ambient relative humidity. It is observed that at a temperature of 5 ° C, the changes in the energy efficiency value are between 37.86 and 37.64 percent (difference of 0.6 percent) and the exergy efficiency is between 34.61 and 34.42 (difference of 0.55 %). For a temperature of 40 ° C, the changes in the energy efficiency value are between 36.16 and 34.27 percent (difference of 5.2 percent) and the exergy efficiency is between 33.23 and 31.54 (difference of 5.1 %). It can be concluded that with increasing temperature, the effect of relative humidity on energy and exergy efficiency parameters also increases. Also, at a constant relative humidity, the energy and exergy efficiency

values decrease with increasing ambient temperature, so that at a relative humidity of 0%, the energy and exergy efficiency values decrease by 4.7% and 4%, respectively. However, at a relative humidity of 100%, the energy and exergy efficiency decreases by 9% and 8.3%, respectively, which indicates the great effect of humidity in reducing efficiency.

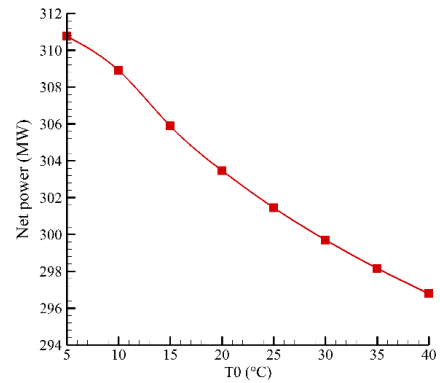


Figure 2: Effect of ambient temperature changes on the net power generation of the power plant

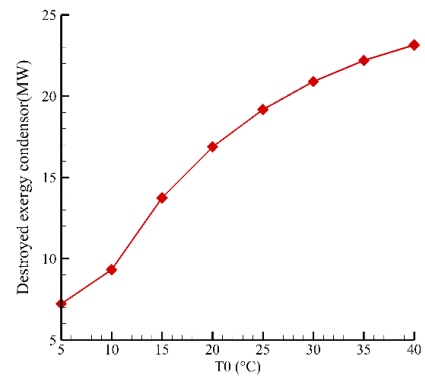


Figure 3: Effect of ambient temperature changes on the condenser exergy destruction rate

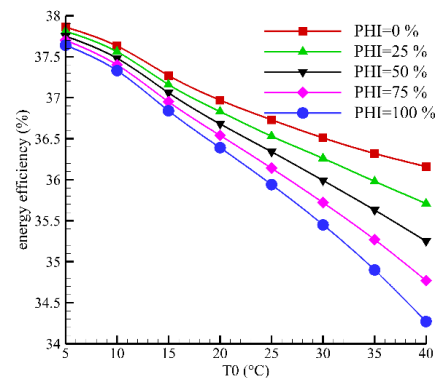


Figure 4: Effect of ambient temperature changes and relative humidity changes on energy efficiency for gas extracted from Ahvaz

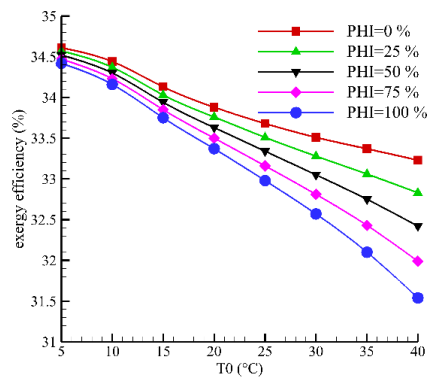


Figure 5: Effect of ambient temperature changes and relative humidity changes on exergy efficiency for gas extracted from Ahvaz

4- Conclusion

As a general conclusion, it can be stated that with increasing temperature, the performance of the power plant in terms of energy and exergy efficiency decreases. The destructive effect of high ambient temperature on the low-pressure turbine is greater due to its connection to the condenser assembly. At low temperatures, the destructive effect of humidity is low, but with increasing temperature, this effect increases significantly. Given the need to produce an adiabatic flame temperature of 2000 Celsius, additional air is required in the combustion chamber, which increases the exergy destruction in the boiler.

5- References

- [1] B. G. Miller, Coal as Fuel. In Clean Coal Engineering Technology, 2011. [Online]. Available: doi: [10.1016/b978-1-85617-710-8.00001-7](https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-710-8.00001-7)
- [2] E. Hajidavalloo and A. Vosough, "Energy and exergy analyses of a supercritical power plant," *Int. J. Exergy*, vol. 9, no. 4, pp. 435–452, 2011. [Online]. Available: doi: [10.1504/IJEX.2011.044059](https://doi.org/10.1504/IJEX.2011.044059)
- [3] G. R. Ahmadi and D. Toghraie, "Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 56, pp. 454–463, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2015.11.074](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.074)
- [4] R. Saidur, J. U. Ahamed, and H. H. Masjuki, "Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers," *Energy Policy*, vol. 38, no. 5, pp. 2188–2197, 2010. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.enpol.2009.11.087](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.087)
- [5] A. Acir, A. K. Bilginsoy, and H. Coşkun, "Investigation of varying dead state temperatures on energy and exergy efficiencies in thermal power plant," *J. Energy Inst.*, vol. 85, no. 1, pp. 14–21, 2012. [Online]. Available: doi: [10.1179/174396711X13116932752074](https://doi.org/10.1179/174396711X13116932752074)
- [6] I. H. Aljundi, "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 2–3, pp. 324–328, 2009. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029)



بررسی اثر شرایط محیطی و نوع سوخت بر روی پارامترهای انرژی و انرژی یک نیروگاه بخار

رضا بابایی^{۱*}، میثم محمودی^۲، محسن کیامنصوری^۳، میلاد خانچویان^۴، الهام مقدم‌نیا^۵

- ۱- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران.
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران.
- ۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد نوشهر، نوشهر، ایران.
- ۴- کارشناسی، گروه فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
- ۵- کارشناسی ارشد، گروه فنی مهندسی، دانشگاه آزاد تهران، تهران، ایران.

چکیده

به دلیل وجود منابع گازی متفاوت در مناطق مختلف کشور، گاز طبیعی برداشت‌شده دارای ارزش حرارتی متفاوتی است که در عملکرد نیروگاه تأثیر بسزایی دارد. در تحقیق حاضر اثر گاز طبیعی استخراج شده در نواحی مختلف ایران شامل خانگیران، کنگان، پارس، بیدبلند، اهواز و سرخس بر روی نیروگاه بخار رامین اهواز بررسی گردید. مدل سازی سیکل نیروگاه با استفاده از نرم افزار EES انجام شده و اثر پارامترهای مؤثر مانند دمای محیط و رطوبت نسبی بر توان تولیدی، نرخ تخریب انرژی، راندمان انرژی و انرژی برگشتی بررسی شده است. میزان هوای اضافی برای تأمین دمای ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد شعله بین ۱۲ تا ۱۷/۵ درصد برای مناطق مختلف محاسبه شد. بررسی افزایش دما از ۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که توان خروجی خالص نیروگاه ۱۴ مگاوات کاهش و نرخ تخریب انرژی در کندانسور به میزان ۱۶ مگاوات افزایش می‌یابد. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نرخ تخریب انرژی بیشینه مربوط به شهر بیدبلند با ۵۰۰ مگاوات و کمترین نرخ مربوط به شهر سرخس با ۳۷۰ مگاوات می‌باشد. با افزایش دما، میزان کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی برگشتی برای رطوبت پایین (۰٪) به ترتیب ۴/۷ درصد و ۴ درصد و برای رطوبت اشباع (۱۰۰٪) به ترتیب ۹ درصد و ۸/۳ درصد می‌باشد که این نشان‌دهنده اثر تخریبی رطوبت محیط بر روی عملکرد نیروگاه است.

کلمات کلیدی

آنالیز انرژی و انرژی
نیروگاه بخار
گاز طبیعی
نرخ تخریب انرژی
EES

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

* نویسنده مسئول

رضا بابایی

ایمیل

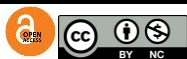
r.babaei@modares.ac.ir

۱- مقدمه

شامل تنظیم فشار عملکردی تجهیز و یا جایگزینی آن با تجهیز دیگر می‌شود.

حاجی دولو و وثوق [۲] با در نظر گرفتن دو فرض فشار ثابت و دما ثابت برای کندانسور به آنالیز انرژی و انرژی یک نیروگاه فوق بحرانی (رامین اهواز) پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با فرض فشار ثابت با افزایش دما اتلاف انرژی در کندانسور کاهش می‌یابد، اما در صورت فرض دما ثابت این پروسه برعکس می‌گردد. آن‌ها همچنین کاهش راندمان بویلر و کندانسور را با افزایش دمای محیط گزارش دادند. احمدی و طغرابی [۳] به بررسی آنالیز انرژی و انرژی در نیروگاه منتظری اصفهان پرداخته و معادلات حاکم شامل پیوستگی جرم،

با وجود اینکه منابع جدید انرژی مانند انرژی‌های نو با توجه به پیشرفت تکنولوژی رو به رشد می‌باشند، سوخت‌های فسیلی با ۶۲ درصد سهم اصلی تولید توان در نیروگاه‌ها را دارند [۱]. این مقدار نشان می‌دهد که بهینه‌سازی و بهبود عملکرد بسیار با اهمیت است. با وجود اینکه تحلیل انرژی زیرسیستم‌های نیروگاه اطلاعات مهمی از کارکرد تجهیزات ارائه می‌دهد، اما جهت بررسی کیفیت فرایند انتقال انرژی و پیدا کردن نقاطی از سیستم که دارای اتلافات بازگشتناپذیر هستند از تحلیل انرژی استفاده می‌شود. با اطلاع از این نقاط می‌توان راهکار اصلاحی جهت کاهش اتلافات و افزایش بهره‌وری نیروگاه ارائه داد. این اصلاحات

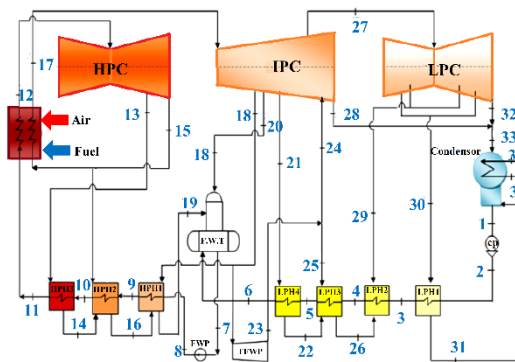


مومنتم و انرژی را با نرم‌افزار EES نوشتند. آن‌ها نشان دادند که کندانسور بیشترین اتلاف حرارتی انرژی را دارد. کندانسور بیش از ۷۰ درصد انرژی سوخت ورودی را به هدر می‌دهد. البته با توجه به لزوم مایع‌سازی بخار خروجی از توربین‌ها، این یک امر اجتناب‌ناپذیر است. آنالیز بررسی کیفیت انرژی نیز نشان می‌دهد که در بویلر نیروگاه ۸۵ درصد اتلاف انرژی رخ می‌دهد. این مقدار زیاد اتلاف به دلیل آنتروپی و بی‌نظمی‌های رخ داده در فرایند واکنش‌های شیمیایی حاصل از احتراق در محفظه احتراق بویلر است. سیدور و همکاران [۴] نیز با آنالیز انرژی و انرژی یک دیگ بخار صنعتی نشان دادند که تخریب انرژی در آن به میزان ۶۵ درصد می‌باشد. آن‌ها از طریق سرعت متغیر در فن بویلر و بازیابی حرارت از دود خروجی از دودکش میزان راندمان نیروگاه را افزایش دادند. اثیر و همکاران [۵] به بررسی پارامترهای انرژی و انرژی شامل بازگشت‌ناپذیری‌های تجهیزات، اتلافات انرژی، هدر رفت انرژی ورودی در بازه دمایی ۵ الی ۳۰ سلسیوس پرداختند. در این بازه دمایی راندمان انرژی از ۳۵/۶ درصد به ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. الجندی و همکاران [۶] با بررسی نیروگاه الحسین مصر نشان داد که کندانسور با ۱۳۴ مگاوات بیشترین سهم را در میزان اتلافات دارد. این مقدار اتلاف برای بویلر ۱۳ مگاوات است. میزان تخریب انرژی بیشینه در بویلر رخ می‌دهد. این میزان ۷۷ درصد بوده که با پیش گرمایش هوای ورودی از مقدار آن می‌توان کاست. الترانه و همکاران [۷] با بررسی نیروگاه حرارتی ۴۰۰ مگاواتی نشان دادند که با استفاده از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت نیروگاه میزان تخریب انرژی بویلر ۶۷٪ کل نیروگاه (حدود ۳۹۰ مگاوات) و اگر از گازوییل استفاده شود میزان تخریب انرژی بویلر ۷۵٪ کل نیروگاه (معادل ۳۷۸ مگاوات) خواهد بود. مهرپویا و همکاران [۸] با بررسی یک نیروگاه ۵۹۷۰ مگاواتی نشان دادند که راندمان انرژی و انرژی سیستم به ترتیب ۵۶/۴٪ و ۵۷/۹٪ می‌باشد. آن‌ها با استفاده از یک سیستم جانبی (شامل پیل سوختی)، راندمان مجموعه سیکل ترکیبی را به ۸۰ درصد رسانیدند. امیدپناه و همکاران [۹] با بررسی سیکل ترکیبی یزد نشان دادند که با تفاوت دمایی بین فصول تابستان و زمستان مقدار راندمان نیروگاه ۱۴٪ تفاوت دارد. آن‌ها با فعال کردن سیستم کولر تبخیری در ورودی کمپرسور میزان توان تولیدی را ۱۵ درصد افزایش دادند. کمالی و همکاران [۱۰] نیز بیشترین میزان اتلاف حرارتی را برای کندانسور به میزان ۶۷٪ محاسبه نمودند. ماموریان و همکاران [۱۱] یک آنالیز انرژی و انرژی بر روی یک بویلر صنعتی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش هر ۱۰۰ کیلوپاسکال فشار ورودی به توربین بخار،

راندمان‌های انرژی و انرژی به ترتیب ۲/۷ و ۲/۶۷ درصد افزایش می‌یابند. دهقانی و همکاران [۱۲] با بررسی نیروگاه ۳۶۸ مگاواتی تبریز نشان دادند که کندانسور بیشترین مقدار اتلاف انرژی و بویلر بیشترین تلفات انرژی را دارد. راندمان انرژی و انرژی در بار نامی ۴۰ درصد و ۳۷ درصد است. کیالاشکی [۱۳] با تحلیل انرژی و انرژی نیروگاه بخار بعثت در تهران نشان داد که کندانسور دارای ۷۷ درصد تلفات انرژی و بویلر دارای ۸۳ درصد تخریب انرژی کل نیروگاه است. در رتبه بعدی توربین قرار دارد. پورسید و همکاران [۱۴] به بررسی اثر سه نوع سوخت گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت بر روی عملکرد نیروگاه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که از منظر انرژی بیشترین راندمان برای سوخت گاز طبیعی اتفاق می‌افتد. گازوئیل به‌عنوان سوخت جایگزین و مازوت نیز به‌عنوان بدترین سوخت تعیین شد. در هر سه نوع سوخت بیشترین اتلاف انرژی در بویلر رخ داد. چن و همکاران [۱۵] یک آنالیز انرژی، انرژی و اقتصادی بر روی یک سیکل نیروگاهی زغال سوز که با یک سیستم تبرید کوپل است، انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که بهبود راندمان انرژی در سیکل جدید نسبت به سیکل فقط نیروگاهی بین ۷/۷ تا ۲۵/۸ درصد می‌باشد. رثوف و همکاران [۱۶] نشان دادند که با تنظیم فشار و دمای بویلر به ترتیب ۱۷۵ بار و ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد عملکرد نیروگاه بهینه خواهد شد. عادل و همکاران [۱۷] نشان دادند که بیشترین تخریب انرژی مربوط به محفظه احتراق است. آن‌ها نشان دادند که با بهینه‌سازی حداکثر می‌توان ۳ درصد به راندمان انرژی افزود. اگوار و همکاران [۱۸] به بررسی اثر دمای محیط بر راندمان انرژی یک نیروگاه ۱۵۳ مگاواتی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که بهترین دما برای عملکرد بهینه نیروگاه دمای ۲۷/۸۵ سلسیوس خواهد بود. کومار و همکاران [۱۹] با بررسی یک نیروگاه ۲۱۰ مگاواتی نشان دادند که کندانسور با ۶۴/۲۴ درصد بیشترین اتلاف انرژی و بویلر با ۸۸/۹۱ درصد بیشترین اتلاف انرژی را دارا است. آن‌ها نشان دادند که با افزایش دما از ۲۵ تا ۴۵ سلسیوس مصرف زغال‌سنگ ۱۹/۰۱ کیلوگرم کاهش می‌یابد. الوردانی و همکاران [۲۰] با بررسی یک نیروگاه ۷۵۰ مگاواتی نشان دادند که محفظه احتراق و HRSG منابع اصلی تخریب انرژی (به ترتیب با ۵۳ و ۳۲ درصد) هستند.

نوآوری کار حاضر را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

- در تحقیقات مذکور تمرکز بر روی یک نوع سوخت (زغال‌سنگ، گاز طبیعی و ...) بوده ولی در تحقیق حاضر اثر انواع گاز طبیعی استخراجی در ایران با توجه به ارزش



شکل ۱: شماتیک سیکل نیروگاه رامین اهواز [۲]

۲-۲- معادلات حاکم بر تئوری مسئله

معادلات بقای جرم و انرژی به صورت زیر بیان می‌گردد [۴]:

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e + \dot{W} \quad (2)$$

\dot{Q} ، \dot{W} و h میزان انتقال حرارت و توان (تولیدی یا مصرفی)، دبی جرمی و آنتالپی می‌باشد.

اگرژی^۴ به عنوان حداکثر کار مفید قابل استخراج با توجه به دمای محیط برای یک سیستم تعریف می‌گردد. تخریب اگرژی نیز به عنوان معیار برگشت‌ناپذیری سیستم معرفی می‌گردد [۳]. معادله تعادل اگرژی به صورت زیر بیان می‌گردد که در آن $\dot{E}x_D$ نرخ تخریب اگرژی^۵، $\dot{E}x_W$ نرخ اگرژی توان و $\dot{E}x_Q$ نرخ اگرژی انتقال گرما است [۳]:

$$\dot{E}x_Q + \sum \dot{m}_i ex_i = \sum \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_W + \dot{E}x_D \quad (3)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (4)$$

$$\dot{E}x_Q = (1 - \frac{T_0}{T_i}) \dot{Q} \quad (5)$$

ex نرخ اگرژی واحد جرم بوده که مجموع اگرژی فیزیکی (ex_{ph}) و اگرژی شیمیایی (ex_{ch}) می‌باشد [۴]:

۲- روش‌شناسی

۲-۱- تشریح سیستم

حرارتی و ترکیبات متفاوت آن‌ها بر روی عملکرد نیروگاه بررسی می‌شود.

- در کار حاضر به صورت هم‌زمان اثر دما و رطوبت بر روی عملکرد نیروگاه بررسی شده و تأثیر این پارامترها بر روی راندمان‌های انرژی و اگرژی تحقیق می‌شود.
- در کار حاضر فرایند احتراق در بویلر به طور کامل شبیه‌سازی شده و میزان هوای اضافی برای تولید دمای آدیاباتیک شعله به میزان ۲۰۰۰ سلسیوس برای انواع گاز طبیعی محاسبه می‌گردد.

نیروگاه رامین اهواز یک نیروگاه بخار فوق بحرانی^۱ با ۴ واحد بهره‌برداری می‌باشد (شکل ۱). هر واحد متشکل از یک بویلر یک بار-گذر^۲، توربین فشار قوی، فشار متوسط و فشار ضعیف، سه هیتر فشار قوی و چهار هیتر فشار ضعیف و یک تانک تغذیه می‌باشد. ظرفیت اسمی تولید توان برای هر واحد ۳۱۵MW [۲] است. دبی حجمی سوخت (یا همان گاز طبیعی) و میزان هوای مورد نیاز احتراق به ترتیب ۶۹۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. جهت مدل‌سازی سیستم سیکل به صورت پایا در نظر گرفته شده و فرایند احتراق در بویلر کامل در نظر گرفته می‌شود. در کار حاضر محدودیت ۲۰۰۰ سلسیوس برای دمای شعله آدیاباتیک^۳ در نظر گرفته می‌شود. دما و فشار بخار سوپرهایت به ترتیب ۵۴۰ سلسیوس و ۲۴ مگاپاسکال است. دبی آب تغذیه ورودی به بویلر ۱۰۱۷ton/hr و دبی آب خنک‌کن در کندانسور ۱۰۰۰۰ kg/s است. راندمان توربین‌ها (فشار قوی، متوسط و ضعیف) ۸۰ درصد و پمپ‌ها ۷۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. بازه دمایی بین ۴۰-۵ سلسیوس و رطوبت نسبی بین صفر تا ۱۰۰ درصد متغیر در نظر گرفته شده است. فشار استاندارد یک اتمسفر و رطوبت نسبی در حالت طراحی اولیه ۳۰ درصد در نظر گرفت می‌شود.

⁴ Exergy

⁵ Destroyed exergy

¹ Supercritical

² Once-through

³ Adiabatic flame temperature

$$\dot{m}_f ex_f + \dot{m}_a ex_a = \dot{m}_g ex_g + \dot{m}_{12} ex_{12} + \dot{m}_{17} ex_{17} - \dot{m}_{12} ex_{11} - \dot{m}_{17} ex_{15} + \dot{E}_{d, boiler} \quad (11)$$

$$etha_{2, boiler} = \frac{\dot{m}_{17} \cdot ex_{15} + \dot{m}_{12} \cdot ex_{11} - \dot{m}_{17} \cdot ex_{17}}{\dot{m}_f ex_f + \dot{m}_a ex_a - \dot{m}_g ex_g} \quad (12)$$

اگرژی سوخت ورودی برحسب مقدار LHV توسط رابطه زیر بیان می‌گردد [۲]:

$$ex_f = 1.06 LHV \quad (13)$$

جدول ۱: اجزای گاز طبیعی استخراج شده از نواحی مختلف ایران [۲۱]

ترکیب سوخت	خانگیان	کنگان	پارس	بیدبلند	اهواز	سرخس
CH ₄	0.9879	0.9426	0.9155	0.8573	0.8533	0.9634
C ₂ H ₆	0.0081	0.0386	0.0568	0.0946	0.0907	0.0121
C ₃ H ₈	0.0018	0.0097	0.0179	0.0351	0.0351	0.0035
i-C ₄ H ₁₀	0.0004	0.0020	0.0031	0.0034	0.0036	0.0013
n-C ₄ H ₁₀	0.0005	0.0030	0.0047	0.0065	0.0081	0.0042
i-C ₅ H ₁₂	0.0003	0.0015	0.0013	0.0010	0.0081	0.0042
n-C ₅ H ₁₂	0.0002	0.0008	0.0011	0.0009	0.0081	0.0042
n-C ₆ H ₁₄	0.0008	0.0014	0.0007	0.0009	0.0081	0.0042
N ₂	0.0056	0.4481	0.0313	0.0044	0.000	0.0127
CO ₂	0	0	0.0185	0.001	0.004	0.0028

جدول ۲: اجزای هوای ورودی به بویلر [۲]

ترکیبات	مقدار مول
N ₂	$n_{N_2, a} = \sum 3.76 a f_i (C_i + \frac{H_i}{4})$
O ₂	$n_{O_2, a} = \sum a f_i (C_i + \frac{H_i}{4})$
H ₂ O	$n_{H_2O, a} = \frac{w (MW_{N_2} \cdot n_{N_2, a} + MW_{O_2} \cdot n_{O_2, a})}{(1-w) MW_{H_2O}}$

مقادیر ارزش حرارتی سوخت برای مناطق اهواز، خانگیان، کنگان، پارس، بیدبلند و سرخس به ترتیب ۴۸۵۲۶، ۵۰۱۵۱، ۴۲۵۸۲، ۴۷۷۵۲ و ۴۹۰۵۰ کیلوژول بر کیلوگرم است.

$$ex = (ex_{ch} + ex_{ph}) \quad (6)$$

$$ex_{ph} = [h - h_0 - T_0 (s - s_0)] \quad (7)$$

$$ex_{ch} = (\sum x e_0^{ch} + R T_0 \sum x \ln x) \quad (8)$$

x درصد مولی و e_0^{ch} اگرژی شیمیایی می‌باشد. در ادامه روابط (۶-۱) برای همه تجهیزات نیروگاه ارائه می‌گردند.

۲-۳- بویلر

بویلر به علت فرایند پیچیده احتراق و تولید دمای بالا جزء پیچیده‌ترین تجهیزات نیروگاه است. سوخت ورودی به بویلر گاز طبیعی با ترکیب هیدروکربن، نیتروژن و دی‌اکسید کربن و هوای ورودی به بویلر با ترکیب نیتروژن، اکسیژن و بخار آب می‌باشد. گاز خروجی از دودکش نیز شامل دی‌اکسید کربن، آب، نیتروژن و اکسیژن است. در کار حاضر چهار نوع گاز طبیعی استخراج شده از شش منطقه مختلف کشور ایران به‌عنوان سوخت ورودی به بویلر بررسی خواهد شد. اجزای گاز طبیعی استخراج شده در نواحی مختلف ایران شامل خانگیان، کنگان، پارس، بیدبلند، اهواز و سرخس در جدول ۱ آمده است. f_i درصد مولی اجزای بخش هیدروکربن سوخت می‌باشد. کسر مولی هوای ورودی به بویلر در جدول ۲ آمده است. مقدار a نسبت مقدار هوای واقعی به مقدار هوای استوکیومتری، MW جرم مولکولی و w رطوبت مخصوص بوده که تابعی از فشار بخار (P_g)، دمای محیط (T_0) و رطوبت نسبی (Φ) است. معادله انرژی و راندمان انرژی برای بویلر در ادامه آمده است که LHV ارزش حرارتی سوخت^۱ و $Q_{loss, boiler}$ اتلاف حرارتی بویلر است.

$$\dot{m}_f LHV + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_g h_g + \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{12} h_{11} - \dot{m}_{17} h_{15} + Q_{loss, boiler} \quad (9)$$

$$etha_{1, boiler} = \frac{\dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_{12} h_{11} - \dot{m}_{17} h_{15}}{\dot{m}_f LHV} \quad (10)$$

معادله اگرژی و راندمان اگرژی نیز در ادامه آمده است که $\dot{E}_{d, boiler}$ نرخ تخریب اگرژی بویلر می‌باشد.

¹ Lower heating value

۳- روش حل و صحت‌سنجی

در کار حاضر از نرم‌افزار EES¹ جهت حل همزمان معادلات انرژی و انرژی و از نتایج کار [۲] جهت اعتبارسنجی نتایج استفاده می‌شود. در جدول ۳ مقادیر انرژی و انرژی برای نقاط مختلف سیکل نیروگاه محاسبه شده و با نتایج مقاله مرجع [۲] مقایسه و اعتبارسنجی شده است. مشاهده می‌شود که در اکثر نقاط تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر و مرجع [۲] وجود دارد.

۴- نتایج و بحث

هر چه دمای شعله در محفظه احتراق بویلر بالاتر باشد، بخار تولیدی درجه سوپرهیت و فشار بالاتری خواهد داشت که منجر به توان تولیدی بالاتری خواهد شد؛ اما محدودیت متالورژی مواد و تنش حرارتی و مقاومت خزشی پره‌های توربین گاز و جداره بویلر سبب می‌شود که یک مقدار بیشینه و مجاز برای دمای شعله آدیباتیک تعریف می‌شود. مقدار مجاز دمای شعله برای نیروگاه رامین اهواز ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با کاهش هوای ورودی به محفظه احتراق احتمال کامل نشدن فرایند احتراق و ایجاد آلودگی‌های ناکس و مونوکسیدکربن افزایش می‌یابد. در حالت استوکیومتری^۲ کمترین مقدار هوای موردنیاز جهت ایجاد فرایند احتراق کامل محاسبه می‌شود. مقدار هوای اضافی نسبت به حالت استوکیومتریک سنجیده می‌شود. شکل ۲ تغییرات دمای شعله در محفظه احتراق را براساس تغییرات هوای اضافه برای گاز طبیعی استخراج شده از نواحی مختلف ایران نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به‌طور کلی با افزایش درصد هوای اضافه دمای شعله نیز کاهش می‌یابد. میزان هوای اضافه برای رسیدن به دمای شعله ۲۰۰۰ سلسیوس در شهرهای خانگیران، کنگان، پارس، بیدبلند، اهواز و سرخس به ترتیب ۰.۱۵٪، ۰.۱۲٪، ۰.۱۶٪، ۰.۱۷٪، ۰.۱۷/۵٪ و ۱۵ درصد می‌باشد. کمترین میزان هوای اضافه مورد نیاز مربوط به کنگان و بیشترین مربوط به اهواز است.

شکل ۳ اثر میزان هوای اضافه را بر نرخ تخریب انرژی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار هوای اضافه اندکی بر مقدار تخریب انرژی افزوده می‌شود که این نشان‌دهنده افزایش بازگشت‌ناپذیری‌ها می‌باشد. همچنین در یک مقدار هوای اضافه ثابت کمترین میزان تخریب انرژی برای گاز استخراجی منطقه سرخس و بیشترین میزان تخریب انرژی مربوط به گاز استخراجی منطقه بیدبلند است. جدول ۴ نتایج آنالیز انرژی و انرژی را برای نقاط

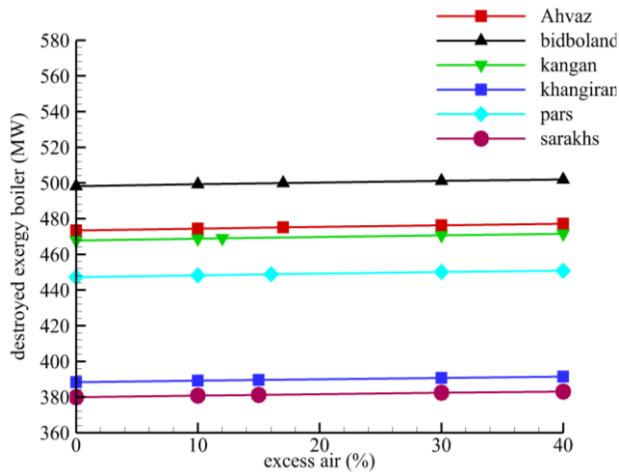
مختلف نیروگاه رامین اهواز در شرایط استاندارد و رطوبت نسبی ۳۰ درصد نشان می‌دهد.

جدول ۳: مقایسه نتایج مقادیر آنتالپی و انرژی با نتایج [۲] برای نقاط مختلف نیروگاه

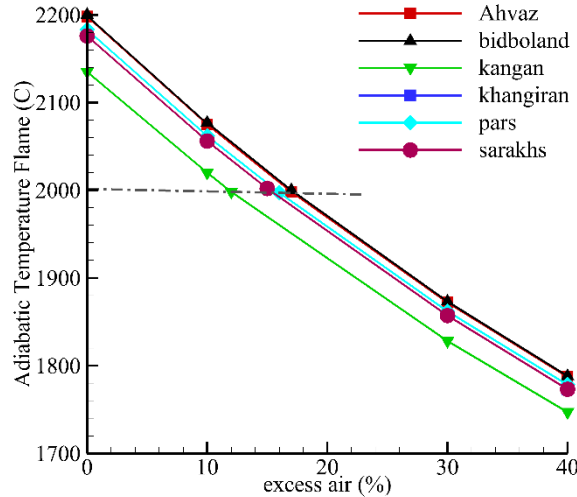
نقاط سیکل	آنتالپی (kJ/kg)		انرژی (kJ/kg)	
	مرجع [۲]	کار حاضر	خطا (%)	خطا (%)
1	205.00	205.21	0	3.93
2	215.5	215.52	0	7.39
3	244.5	242.52	1.5	9.2
4	382.5	382.61	0.02	27.18
5	504.8	504.81	0	54.31
6	628.6	628.49	0	87.54
7	693.00	692.89	0.01	106.7
8	730.1	746.11	2.1	120.89
9	857.9	870.73	1.6	165.8
10	1095.1	1098.2	0.05	262.5
11	1243.2	1242.12	0.15	328.98
12	3316.3	3319.19	0.12	1482.0
13	3047.5	3046.14	0.05	1180.0
14	1139.0	1140.15	0.11	282.15
15	2952	2962.11	0.31	1080
16	889.4	889.42	0	178.2
17	3536	3537.01	0.031	1396.0
18	3282	3284.05	0.07	1127.0
19	763.6	763.43	0.03	130.70
20	3166	3167.10	0.04	1005
21	2988	2990.12	0.07	818.9
22	637	636.5	0.08	89.38
23	2901	2904.2	0.11	673.05
24	2941	2942.1	0.04	683.6
25	2901	2902.2	0.04	663.9
26	427.6	427.7	0.02	35.95
27	2830	2831.14	0.04	638.95
28	2442.2	2528.2	3.1	162.99
29	2693	2672.1	0.81	482.6
30	2501	2493.2	0.35	263.1
31	255.4	260.15	1.9	8.47
32	2440	2415.21	1.1	159.01
33	2441	2415.31	1.2	158.03
34	113.3	113.45	0.1	0.26
35	146.6	151.2	2.85	1.25

² Stoichiometric

¹ Equation engineering solver



شکل ۳: اثر هوای اضافه بر میزان تخریب آگزوزی در شرایط استاندارد $T_0 = 25^\circ\text{C}$



شکل ۲: اثر هوای اضافه بر دمای آدیاباتیک شعله برای شهرهای مختلف

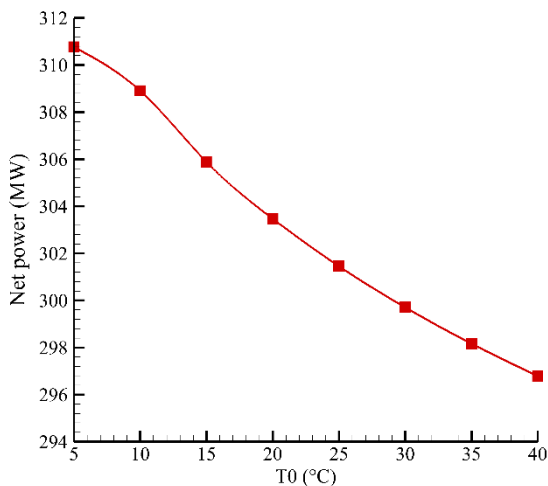
جدول ۴: نتایج آنالیز انرژی و آگزوزی برای نیروگاه رامین اهواز در شرایط استاندارد

تجهیزات	مقدار ورودی LHV (MW)	مقدار مصرف LHV (MW)		تخریب آگزوزی (MW)	راندمان قانون اول (%)	راندمان قانون دوم (%)
		* توان تولیدی	** توان مصرفی			
بویلر	خانگیران	735	11***	390	98	48
	سرخس	727	10***	382	99	49
	اهواز	815	78***	486	89	43
	بیدبلند	839	100***	500	87	44
	پارس	791	54***	449	93	46
	کنگان	810	73***	470	90	45
توربین	HPC		98*	12	88	79
	IPC		50*	23	87	81
	LPC		171*	7	86	85
	جمع		319*	42	-	-
پمپ			17**	4.7	86	62
	LPH1		2***	2.3	88	84
هیترها	LPH2		1***	2.9	71	68
	LPH3		1.5***	0.7	93	87
	LPH4		0.15***	1.5	98	85
	HPH1		0.35***	1.7	97	86
	HPH2		2.1***	0.5	97	95
	HPH3		2.4***	0.2	98	93
	DA		6.5***	1.3	95	92
	جمع		16***	11.3	-	-
کندانسور		339***	17	90	37	

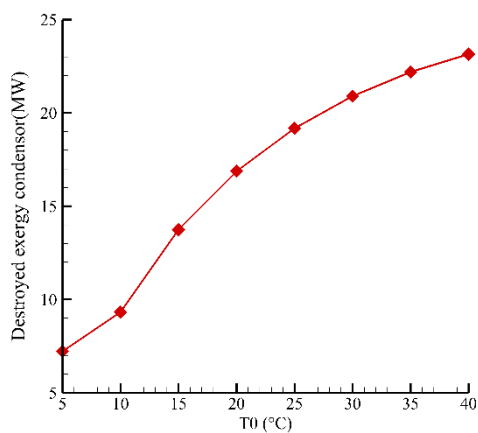
سوخت گاز طبیعی استخراج شده از مناطق مختلف ایران محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که میزان تولید توان در توربین LPC حدود

در این جدول سهم مصرف انرژی هر یک از تجهیزات شامل توان تولیدی، توان مصرفی و اتلاف انرژی حرارتی از انرژی ورودی حاصل از

انرژی و انرژی را برحسب دمای محیط در مقادیر مختلف رطوبت نسبی نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای محیط نمودارها نسبت به هم واگرا می‌شوند. همچنین در مقادیر دمای ثابت محیط، مقادیر راندمان انرژی و انرژی با افزایش رطوبت نسبی محیط کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد تغییرات مقدار راندمان انرژی بین ۳۷/۸۶ و ۳۷/۶۴ درصد (اختلاف ۰/۶ درصد) و راندمان انرژی بین ۳۴/۶۱ و ۳۴/۴۲ درصد (اختلاف ۰/۱۵۵ درصد) می‌باشد.



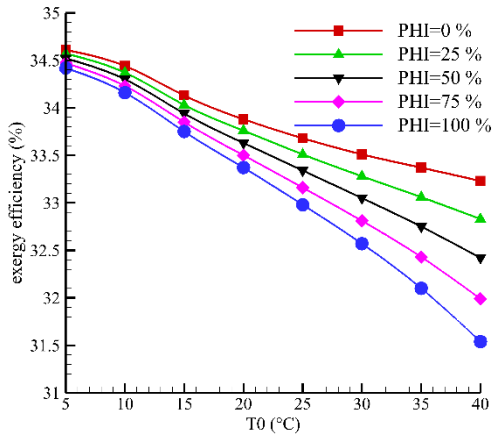
شکل ۴: اثر تغییرات دمای محیط بر توان خالص تولیدی نیروگاه



شکل ۵: اثر تغییرات دمای محیط بر نرخ تخریب انرژی کندانسور

برای دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز تغییرات مقدار راندمان انرژی بین ۳۶/۱۶ و ۳۴/۲۷ درصد (اختلاف ۵/۲ درصد) و راندمان انرژی بین ۳۳/۲۳ و ۳۱/۵۴ درصد (اختلاف ۵/۱ درصد) می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دما اثر رطوبت نسبی بر روی پارامترهای راندمان انرژی و انرژی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در یک رطوبت نسبی ثابت، مقادیر راندمان انرژی و انرژی با افزایش مقدار دمای محیط

۱۷۱ مگاوات می‌باشد که بیشترین سهم در تولید توان (۵۴ درصد) می‌باشد. توربین IPC با ۵۰ مگاوات کمترین سهم در تولید توان (۱۶ درصد) دارد. توربین HPC نیز وظیفه تولید ۳۰ درصد توان کلی نیروگاه را داراست. مشاهده می‌شود که مقادیر مربوط به تخریب انرژی برای بویلر نسبت تجهیزات دیگر قابل‌ملاحظه‌تر می‌باشد. مشاهده می‌شود که توربین و کندانسور بیشترین سهم را در مصرف انرژی سوخت ورودی دارند. سهم توربین جهت تولید توان و سهم کندانسور مربوط به دریافت انرژی از بخار مرده و انتقال آن به برج خنک‌کن جهت مایع سازی جهت پمپاژ به سمت بویلر است. شکل ۴ اثر دمای محیط را بر روی توان خالص تولیدی نشان می‌دهد. میزان کاهش توان خروجی در بازه دمای ۴۰-۵ درجه سانتی‌گراد از ۳۱۰/۷ مگاوات به مقدار ۲۹۶/۷ مگاوات (۱۴ مگاوات کاهش) می‌باشد. شکل ۵ نیز اثرات دمایی محیط را بر میزان نرخ تخریب انرژی کندانسور نشان می‌دهد. افزایش دمای محیط سبب افزایش دمای آب ورودی به کندانسور (خروجی از برج خنک‌کن) شده و این سبب افزایش نرخ تخریب انرژی می‌شود. شکل ۶ اثر دمای محیط را بر روی تخریب انرژی توربین‌های فشار قوی (HPC)، فشار متوسط (IPC) و فشار ضعیف (LPC) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که میزان تخریب انرژی در توربین فشار متوسط (IPC) بیشتر از بقیه توربین‌ها است. دلیل آن نیز سهم بیشتر تولید توان برای این توربین می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که تغییرات تخریب انرژی برای انرژی توربین‌های فشار قوی (HPC) و فشار متوسط (IPC) افزایشی و البته ناچیز می‌باشد، در حالیکه تغییرات تخریب انرژی برای توربین فشار ضعیف (LPC) بسیار بیشتر از دو توربین دیگر است. دلیل آن نیز در تماس بودن این توربین با کندانسور بوده که در نتیجه آن تغییرات محیطی شامل تغییرات دما را سریع‌تر درک می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که تخریب انرژی در توربین فشار ضعیف (LPC) کاهش یافته است. دلیل آن نیز کاهش توان تولیدی با افزایش دما است، به طوری که افزایش دما سبب کاهش توان تولیدی و در نتیجه کاهش اثرات تخریب انرژی می‌باشد. شکل ۷ اثر دمای هوای محیط را بر روی تخریب انرژی بویلر با توجه به نوع گاز طبیعی استخراجی از مناطق مختلف نشان می‌دهد. دلیل افزایش در بویلر افزایش بازگشت‌ناپذیری‌ها و اتلافات سیستم به دلیل افزایش دمای ورودی به بویلر می‌باشد. مشاهده می‌شود که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نرخ تخریب انرژی بیشینه مربوط به شهر بیدبلند با ۵۰۰ مگاوات و کمترین نرخ مربوط به شهر سرخس با ۳۷۰ مگاوات می‌باشد. شکل ۸ و شکل ۹ مقادیر راندمان



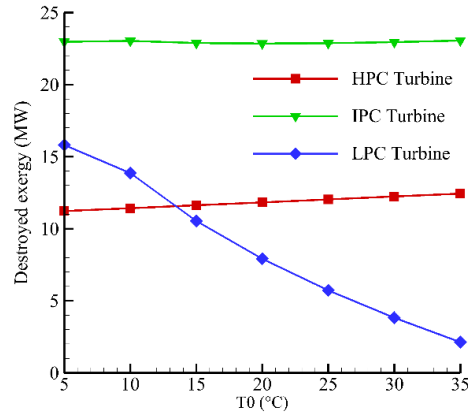
شکل ۹: اثر تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی بر راندمان انرژی برای گاز استخراجی از اهواز

۵- نتیجه گیری

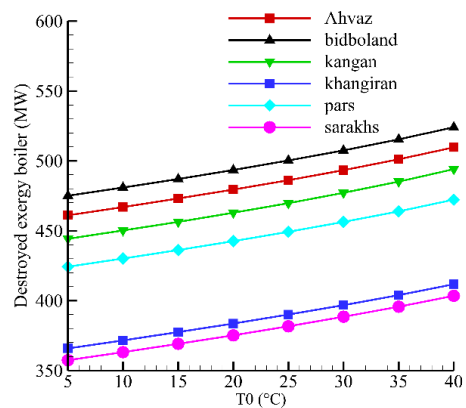
مقاله حاضر به آنالیز انرژی و انرژی اثر گاز طبیعی استخراج شده در نواحی مختلف ایران شامل خانگیران، کنگان، پارس، بیدبلند، اهواز و سرخس بر روی نیروگاه بخار رامین اهواز پرداخته است. گاز طبیعی استخراجی شامل ترکیبات مختلف از هیدروکربن‌ها، نیتروژن و دی‌اکسید کربن می‌باشد که هر کدام مقادیر ارزش حرارتی متفاوت دارند. سوخت با هوا (شامل ترکیبی از نیتروژن، اکسیژن و بخار آب) ترکیب شده و تحت یک فرایند احتراق کامل ترکیبات دی‌اکسید کربن، آب، نیتروژن و اکسیژن را تولید می‌کند. پژوهش حاضر پس از مطالعه و مدل‌سازی سیکل نیروگاه با استفاده از نرم‌افزار EES به بررسی پارامترهای مؤثر مانند دمای محیط و رطوبت نسبی بر توان تولیدی، نرخ تخریب انرژی، راندمان انرژی و انرژی پرداخته است که نتایج آن به صورت زیر بیان می‌گردد.

- جهت تأمین دمای شعله آدیاباتیک محفظه احتراق بویلر نیروگاه برای سوخت‌های مایع استخراجی از مناطق خانگیران، کنگان، پارس، بیدبلند، اهواز و سرخس نیاز به هوای اضافی به میزان ۱۵٪، ۱۲٪، ۱۶٪، ۱۷٪، ۱۷٪/۵ و ۱۵ درصد می‌باشد. افزایش میزان هوای اضافه سبب افزایش جزئی نرخ تخریب انرژی می‌گردد.
- نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، توان خروجی خالص نیروگاه از ۳۱۰/۷ مگاوات به مقدار ۲۹۶/۷ مگاوات (۱۴ مگاوات کاهش) می‌رسد. افزایش دما در این بازه سبب افزایش نرخ تخریب انرژی در کندانسور به میزان ۱۶ مگاوات می‌شود. در مجموعه توربین‌ها افزایش دما اثر ناچیزی بر روی نرخ تخریب انرژی بر توربین‌های توربین‌های فشار قوی (HPC) و فشار متوسط (IPC) دارد، اما سبب کاهش فوق‌العاده

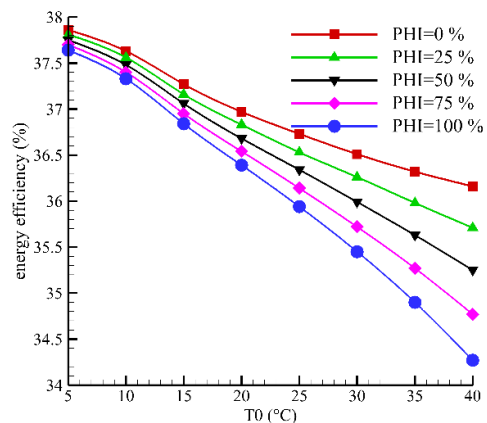
کاهش می‌یابد، به طوری که در مقدار رطوبت نسبی صفر درصد مقدار راندمان انرژی و انرژی به ترتیب ۴/۷ درصد و ۴ درصد کاهش می‌یابد؛ اما در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد مقدار کاهش راندمان انرژی و انرژی به ترتیب ۹ درصد و ۸/۳ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده اثر زیاد رطوبت در کاهش راندمان است.



شکل ۶: اثر تغییرات دمای محیط بر نرخ تخریب انرژی مجموعه توربین



شکل ۷: اثر تغییرات دمای محیط بر نرخ تخریب انرژی بویلر برای گاز استخراجی از مناطق مختلف



شکل ۸: اثر تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی بر راندمان انرژی برای گاز استخراجی از اهواز

[2] E. Hajidavalloo and A. Vosough, "Energy and exergy analyses of a supercritical power plant," *Int. J. Exergy*, vol. 9, no. 4, pp. 435–452, 2011. [Online]. Available: doi: [10.1504/IJEX.2011.044059](https://doi.org/10.1504/IJEX.2011.044059)

[3] G. R. Ahmadi and D. Toghraie, "Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 56, pp. 454–463, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2015.11.074](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.074)

[4] R. Saidur, J. U. Ahamed, and H. H. Masjuki, "Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers," *Energy Policy*, vol. 38, no. 5, pp. 2188–2197, 2010. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.enpol.2009.11.087](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.087)

[5] A. Acir, A. K. Bilginsoy, and H. Coşkun, "Investigation of varying dead state temperatures on energy and exergy efficiencies in thermal power plant," *J. Energy Inst.*, vol. 85, no. 1, pp. 14–21, 2012. [Online]. Available: doi: [10.1179/174396711X13116932752074](https://doi.org/10.1179/174396711X13116932752074)

[6] I. H. Aljundi, "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 2–3, pp. 324–328, 2009. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029)

[7] O. R. Altarawneh, A. A. Alsarayreh, A. M. Al-Falahat, M. J. Al-Kheetan, and S. S. Alwashdeh, "Energy and exergy analyses for a combined cycle power plant in Jordan," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 31, p. 101852, 2022. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.csite.2022.101852](https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101852)

[8] M. Mehrpooya, M. M. M. Sharifzadeh, and S. A. Mousavi, "Evaluation of an optimal integrated design multi-fuel multi-product electrical power plant by energy and exergy analyses," *Energy*, vol. 169, pp. 61–78, 2019.

[9] M. Omidpanah, S. Amir, A. Elomee, and M. A. Malayer, "Process Simulation and Extraction of Parameters Affecting the Production Capacity and Efficiency of a Combined Cycle Power Plant Unit (Case study: Yazd Combined Cycle Power Plant)," *Quarterly Sci. J. Tech.*, vol. 18, no. 3, pp. 55–77, 2021.

میزان نرخ تخریب انرژی توربین فشار ضعیف (LPC) می‌گردد. مشاهده شد که با افزایش دما میزان نرخ تخریب انرژی در هر شش منطقه افزایشی بوده است، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نرخ تخریب انرژی بیشینه مربوط به شهر بیدبلند با ۵۰۰ مگاوات و کمترین نرخ مربوط به شهر سرخس با ۳۷۰ مگاوات می‌باشد.

- نتایج بررسی رطوبت نسبی نشان داد که اثر رطوبت محیط بر روی راندمان انرژی و انرژی با افزایش دما بیشتر می‌شود، به طوری که مقدار کاهش راندمان انرژی و انرژی برای رطوبت نسبی صفر به ترتیب ۴/۷ درصد و ۴ درصد و برای رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد مقدار کاهش راندمان انرژی و انرژی به ترتیب ۹ درصد و ۸/۳ درصد می‌باشد.

به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان نمود که با افزایش دما عملکرد نیروگاه از نظر راندمان‌های انرژی و انرژی کاهش می‌یابد. اثر تخریبی دمای بالای محیط بر روی توربین فشار ضعیف به علت اتصال آن به مجموعه کندانسور بیشتر است. در دماهای پایین اثر تخریبی رطوبت کم بوده، ولی با افزایش دما این اثر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با توجه به لزوم تولید دمای آدیاباتیک شعله ۲۰۰۰ سلسیوس، در محفظه احتراق نیاز به هوای اضافه بوده که این هوای اضافه سبب افزایش تخریب انرژی در بویلر می‌گردد.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
LHV	ارزش حرارتی سوخت، kJ/kg
h	آنتالپی مخصوص، kJ/kg
\dot{E}_X	نرخ انرژی، kJ/s
\dot{E}_{X_D}	تخریب انرژی، kJ/kg
T_0	دمای مرجع، K
P_0	فشار مرجع، kPa
علائم یونانی	
ϕ	رطوبت نسبی، %
زیرنویس	
f	سیال
g	گاز یا دود

۷- منابع

[1] B. G. Miller, *Coal as Fuel*. In *Clean Coal Engineering Technology*, 2011. [Online]. Available: doi: [10.1016/b978-1-85617-710-8.00001-7](https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-710-8.00001-7)

- [16] R. M. Radhi, H. N. Mohammed, and A. Basem, "Power plant systems performance assessment with applications of combined pinch and exergy analysis," *J. Eng. Res.*, 2024.
- [17] A. A. M. Omara, A. A. M. Mohammedali, and R. Dhivagar, "Energy, exergy and advanced exergy analyses on Garri "1" combined cycle power plant of Sudan," *Int. J. Thermofluids*, vol. 24, p. 100930, 2024.
- [18] H. O. Egware and O. O. Ighodaro, "Evaluating the effect of ambient air temperature on the exergy sustainability of a 153MW gas turbine power plant," *Int. J. Thermofluids*, vol. 18, p. 100375, 2023.
- [19] V. Kumar, V. K. Saxena, R. Kumar, and S. Kumar, "Energy, exergy, sustainability and environmental emission analysis of coal-fired thermal power plant," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 2, p. 102416, 2024.
- [20] M. Elwardany, A. M. Nassib, H. A. Mohamed, and M. R. Abdelaal, "Energy and exergy assessment of 750 MW combined cycle power plant: A case study," *Energy Nexus*, vol. 12, p. 100251, 2023.
- [21] A. H. Kakaee, A. Paykani, and M. Ghajar, "The influence of fuel composition on the combustion and emission characteristics of natural gas fueled engines," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 38, pp. 64–78, 2014. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.rser.2014.05.080](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.080)
- [10] K. Kamali, M. Saleh, B. Jahromi, and M. Sefid, "Energy and Exergy Analysis of a Direct Solar Steam Power Plant with Solar Parabolic Concentrator for Yazd City with Several Water Preheaters," *Quarterly Sci. J. Tech.*, vol. 19, no. 1, pp. 333–355, 2022.
- [11] M. Mamourian, A. Akbari, and Y. Javanashir, "Energy and exergy analysis of an organic Rankine cycle used for waste heat recovery in the cement industry," *Sci. Res. J. Sci. Technol. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 7–25, 2023 (in Persian).
- [12] S. A. Dehghani and A. R. Khosroshahi, "Energy and exergy analysis of Tabriz steam thermal power plant," *Iranian Energy J.*, vol. 18, no. 3, 2015 (in Persian).
- [13] Y. Kialashki, "Energy and exergy performance analysis of Be'sat steam power plant," *Quarterly J. Energy Policy Res. and Planning*, vol. 2, no. 3, pp. 179–193, 2016 (in Persian).
- [14] M. H. Poursaid, G. Shahriyari, P. Azhari, and A. Mehrpanahi, "Exergy and energy analysis of fuel regime change in a combined cycle power plant," *Energy Eng. and Management*, vol. 5, no. 1, pp. 32–43, 2022 (in Persian).
- [15] Y. Chen et al., "Energy, exergy and economic (3E) analysis of a novel integration process based on coal-fired power plant with CO₂ capture & storage, CO₂ refrigeration, and waste heat recovery," *Energy*, vol. 299, p. 131443, 2024. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.energy.2023.131443](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.131443)



Design, Evaluation and Construction of a Test Rig For Predicting the Remaining Usefull Life of a Gearbox with a Spur Gear

Mahdi Zamani¹, Mohammad Aboonajmi ^{*2}, Seyed Reza Hassan-Beygi³, Ashkan Moosavian⁴

1. Ph.D Student, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2 Associate professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

4. Assistant professor, Department of Agricultural Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Abstract

Health monitoring of rotating machinery, particularly gearboxes, is crucial for ensuring operational efficiency and preventing unexpected failures. Gearboxes are among the most critical components in rotating machinery, with gears playing an essential role in transmitting torque and maintaining appropriate speeds. Due to the importance of fault diagnosis and predicting the remaining useful life (RUL) of gearboxes, numerous studies have recently been conducted in this area. One widely used method for predicting the RUL of equipment is accelerated life testing. To achieve this, a test bench was designed using CATIA software to estimate the RUL of spur gears, which are key components of gearboxes. Subsequently, dynamic and vibrational analyses were conducted using ADAMS software. These analyses included investigating the impact of vibration interference caused by the operation of the crank and spring mechanism—a load applicator on the gear teeth. Simulation results were compared with experimental data, confirming the model's accuracy. Additionally, vibrations from the crank and spring mechanism did not affect data related to gear faults. Experimental data collected from the system showed that the engagement frequency range of the gear increased from 44.5 dB to 66.87 dB, and the presence of sidebands around this frequency indicated wear-related faults. The findings of this research suggest that the collected data can be effectively used to estimate the remaining useful life of gearboxes.

Keywords

Design

Dynamic Analysis

Gearbox

Remaining Useful Life

Vibration Analysis

Received: 11.04.2024

Revised: 01.25.2025

Accepted: 01.29.2025

*Corresponding Author

Mohammad Aboonajmi

Email

abonajmi@ut.ac.ir

1- Introduction

Fault detection and identification in mechanical systems during operation is one of the key challenges in maintenance and repair (MR) [1]. The predictive MR approach enables failure prediction and the implementation of appropriate solutions by monitoring the operational conditions of equipment. One effective method in this field is Condition-Based Monitoring (CBM), which detects changes in

the system's dynamic response through vibration and acoustic analysis [2].

Gearboxes, widely used in military and industrial applications, experience variations in load and speed, leading to various defects in their gears. These defects include gear scratches, chipping, overall wear, and cracks caused by bending fatigue, which are categorized into widespread and localized defects [3]. Studies show that 60% of gearbox issues



originate from gear tooth defects, while 24% result from inadequate maintenance practices, emphasizing the significance of gearbox condition monitoring [4].

A critical factor in gear performance is the involute profile of the teeth. Any deviation from this profile reduces accuracy and increases the likelihood of failure. Gear wear is classified into abrasive and adhesive types, typically caused by insufficient lubrication or excessive stress [5]. Proper monitoring of these changes can lower maintenance costs and improve system efficiency.

Modeling and simulating defects are effective tools for predicting failures and optimizing gear design. Software such as MATLAB for numerical analysis, ABAQUS and ANSYS for finite element methods, and ADAMS for multi-body dynamic analysis provide precise gear performance evaluations [6,7]. Among these, ADAMS is extensively used for modeling and analyzing multi-body mechanical systems, supporting design optimization [8].

Validating dynamic models is essential, as theoretical results without reliable experimental data cannot be applied to real-world scenarios. Combining modeling data with experimental tests enhances defect detection accuracy and reduces computational complexity in classification systems. Selecting relevant features to describe machine conditions improves defect identification and prediction accuracy [9].

Given the challenges in analyzing real-world systems, integrating dynamic and simulated methods for system condition assessment and applying findings to similar cases is necessary. In this study, a data acquisition system was designed and evaluated for a sample gearbox with simple gears. Initially, a 3D model of the system was developed in CATIA, followed by dynamic gear analysis using ADAMS software. The developed 3D model simulated the gears' dynamic response, and the results were compared with an experimental model to validate the analysis [10,11].

Ultimately, by monitoring gearbox conditions and analyzing tooth profile variations, maintenance

costs can be reduced, the operational lifespan of equipment can be extended, and mechanical system performance can be optimized. Simulation and data validation are powerful tools for defect prediction, design improvement, and enhancing industrial equipment efficiency [12,13].

2- Research Methods

Fault detection and the estimation of remaining useful life in mechanical systems, particularly gearboxes, present significant challenges in maintenance and repair. This study focuses on evaluating gear wear and its impact on gearbox performance using accelerated tests. A test system, comprising a gearbox, main chassis, electric motor, and a resistant load application mechanism (crank and spring system), was designed and built to analyze gear wear under controlled conditions and predict its failure timeline.

Gear wear is a common defect in mechanical power transmission systems, typically developing over time. To expedite wear formation for analysis, controlled resistant load tests were conducted on gear teeth. The crank and spring mechanism enabled precise load application, simulating real-world operational stress conditions. The selected gears had a module of 4, with a 20-tooth pinion of 80 mm diameter and a 50-tooth gear of 200 mm diameter. Bearings of type 6306 were selected according to DIN625-1 standards to withstand maximum operational speed and load.

Flexible couplings were used to connect the input and output shafts, ensuring smooth torque transmission while accommodating minor misalignments. This design prevents excessive axial or bending stresses, thereby reducing the risk of sudden mechanical failures.

To determine the required resistance load, the gearbox output torque was calculated using power and angular velocity relationships. The calculated torque of 57 Nm guided the design of the crank and spring mechanism. The crank arm length was set at 35 mm, and the spring was designed with a wire diameter of 7 mm, an outer diameter of 65 mm, a

height of 175 mm, and 14 active coils. The theoretical maximum force exerted by the spring at 75 mm compression was calculated to be 1100 N.

Dynamic simulations using ADAMS View analyzed the effects of gear displacement and vibrations on structural integrity. This software allows for defining essential gear parameters, such as module, tooth count, width, and thickness, ensuring precise system modeling. The gears used were made of St37 steel, with physical properties detailed in Table 1.

Table 1: parameters of the gears used

<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Pinion</i>	<i>Gear</i>
Number of teeth	Z	20	50
Module	M	4	4
Pitch circle Diameter	P	80 mm	200 mm
Gear thickness	T	20 mm	20 mm

To validate the experimental results, boundary conditions were set, including fixing the gear centers while allowing only rotational motion around the Z-axis (DOF=1). The gearbox input speed was set at 1496 rpm, corresponding to the electric motor's maximum speed. Static and dynamic friction coefficients were assigned values of 0.15 and 0.11, respectively.

A flexible multi-body dynamic model was created in MSC ADAMS to assess defect-induced variations in gear dynamics. The model incorporated driving and driven shafts, pinions, gears, and bearings. Data from finite element analysis in CATIA were integrated to refine mass centers, moment distributions, and stiffness functions. Torsional and translational springs were included to simulate contact conditions and frictional effects. Rotational motion was applied to the gearbox input, while output torque constraints were established.

By analyzing gear wear progression and dynamic responses, this study enhances predictive

maintenance strategies. The combined experimental and simulation-based approach facilitates early fault detection, extends equipment lifespan, and optimizes mechanical system performance. The findings underscore the effectiveness of integrating accelerated testing with dynamic modeling for industrial gearbox reliability assessment.

3- Discussion and Results

To assess the impact of the crank and spring mechanism on gearbox performance, parameters such as speed, power, and vibration were simulated and analyzed. In this study, the mechanism was initially simulated in two states: before and after the application of spring force. The results indicated that connecting the mechanism did not significantly affect the amplitude of the gear meshing frequency.

For validation, system data was recorded before and after the mechanism was connected and subsequently analyzed. Fourier Transform and the SPL method were applied to transfer data into the frequency domain, revealing that the mechanism had no effect on the meshing frequency. Additionally, system data was collected over 60 hours, and using the FFT method, the impact of wear on the meshing frequency and sidebands was examined.

The findings demonstrated that, based on the collected data and the Weibull distribution, the remaining useful life of the gearbox could be estimated, providing a valuable framework for predicting the lifespan of similar mechanical systems.

4- Conclusion

A system was designed, evaluated, and built to estimate the remaining useful life of a gearbox. As wear was the primary defect studied, it was essential to analyze the impact of vibration generated by the resistant load mechanism on gear failure data. Before constructing the experimental system, simulations of the applied load mechanism were performed to gather vibration data.

The study examined the effect of the resistant load mechanism on system dynamics, considering forces generated by the crank and spring. Simulation results indicated that the vibrations caused by the mechanism did not significantly influence the overall system vibration. After constructing the system, a comparison between simulation and experimental data validated the findings.

Frequency analysis using the SPL method initially showed a frequency reduction due to manufacturing defects, followed by an increase to 66.87 dB as wear progressed. By applying the Weibull distribution and statistical methods, the gearbox's remaining useful life was estimated accurately.

5- References

- [1] X. Liang, M. J. Zuo, and Z. Feng, "Dynamic modeling of gearbox faults: A review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 98, pp. 852–876, 2018. doi: [10.1016/j.ymsp.2017.05.024](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.05.024).
- [2] W. Caesarendra, A. Widodo, and B. S. Yang, "Combination of probability approach and support vector machine towards machine health prognostics," *Probabilistic Eng. Mech.*, vol. 26, no. 2, pp. 165–173, 2011. doi: [10.1016/j.proengmech.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.proengmech.2010.09.008).
- [3] G. Dalpiaz, A. Rivola, and R. Rubini, "Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 14, no. 3, pp. 387–412, 2000. doi: [10.1006/mssp.1999.1294](https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1294).
- [4] K. Feng, W. A. Smith, R. B. Randall, H. Wu, and Z. Peng, "Vibration-based monitoring and prediction of surface profile change and pitting density in a spur gear wear process," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 165, p. 108319, 2022. doi: [10.1016/j.ymsp.2021.108319](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108319).
- [5] O. D. Mohammed and M. Rantatalo, "Gear fault models and dynamics-based modelling for gear fault detection—A review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 117, p. 104798, 2020. doi: [10.1016/j.engfailanal.2020.104798](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104798).
- [6] J. Xia, R. Huang, Y. Liao, J. Li, Z. Chen, and W. Li, "Digital twin-assisted gearbox dynamic model updating toward fault diagnosis," *Front. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 2, p. 32, 2023. doi: [10.1007/S11465-023-0748-0](https://doi.org/10.1007/S11465-023-0748-0).
- [7] Q. Chen, Y. Ma, S. Huang, and H. Zhai, "Research on gears' dynamic performance influenced by gear backlash based on fractal theory," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 313, pp. 325–332, 2014. doi: [10.1016/J.APSUSC.2014.05.210](https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2014.05.210).
- [8] A. Kahraman and R. Singh, "Non-linear dynamics of a spur gear pair," *J. Sound Vib.*, vol. 142, no. 1, pp. 49–75, 1990. doi: [10.1016/0022-460X\(90\)90582-K](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90582-K).
- [9] S. Ebrahimi and P. Eberhard, "Rigid-elastic modeling of meshing gear wheels in multibody systems," *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 16, pp. 55–71, 2006. doi: [10.1007/S11044-006-9021-7](https://doi.org/10.1007/S11044-006-9021-7).
- [10] Y. Wang, H. M. E. Cheung, and W. J. Zhang, "Finite element modelling of geared multi-body system," *Commun. Numer. Methods Eng.*, vol. 18, no. 11, pp. 765–778, 2002. doi: [10.1002/CNM.526](https://doi.org/10.1002/CNM.526).
- [11] G. Litak and M. I. Friswell, "Dynamics of a gear system with faults in meshing stiffness," *Nonlinear Dyn.*, vol. 41, pp. 415–421, 2005. doi: [10.1007/S11071-005-1398-Y](https://doi.org/10.1007/S11071-005-1398-Y).
- [12] G. A. Ambaye and H. G. Lemu, "Dynamic analysis of spur gear with backlash using ADAMS," *Mater. Today: Proc.*, vol. 38, pp. 2959–2967, 2021. doi: [10.1016/j.matpr.2020.09.309](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.309).
- [13] R. K. Y. Chang, C. K. Loo, and M. V. C. Rao, "Enhanced probabilistic neural network with data imputation capabilities for machine-fault classification," *Neural Comput. Appl.*, vol. 18, pp. 791–800, 2009. doi: [10.1007/s00521-008-0215-1](https://doi.org/10.1007/s00521-008-0215-1).



طراحی، ساخت و ارزیابی میز آزمون پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده با چرخ‌دنده ساده

مهدی زمانی^۱، محمد ابونجمی^{۲*}، سیدرضا حسن بیگی بیدگلی^۳، سیداشکان موسویان بالاباش^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۳- استاد، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

کلمات کلیدی

طراحی
تحلیل دینامیکی
جعبه‌دنده
عمر مفید
تحلیل ارتعاش

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

*نویسنده مسئول

محمد ابونجمی

ایمیل

abonajmi@ut.ac.ir

چکیده

با توجه به افزایش استفاده از تجهیزات دوار در صنایع مختلف بررسی وضعیت سلامتی این تجهیزات به یکی از حوزه‌های مورد توجه محققین تبدیل شده است. جعبه‌دنده یکی از اجزاء مهم در ماشین‌های دوار می‌باشد و چرخ‌دنده نقش اساسی در جعبه‌دنده به‌منظور انتقال گشتاور و سرعت مناسب ایفا می‌کند. با توجه به اهمیت تشخیص عیب و پیش‌بینی عمر مفید جعبه‌دنده اخیراً مطالعات بسیاری در این حوزه انجام می‌پذیرد. یکی از رویکردهای متداول در پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده استفاده از روش آزمون‌های شتابدار می‌باشد. به همین منظور میز آزمون تخمین عمر مفید باقیمانده چرخ‌دنده ساده به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزاء جعبه‌دنده‌ها با استفاده از نرم‌افزار CATIA طراحی شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار ADAMS تحلیل‌های دینامیکی و ارتعاشی بر روی آن انجام شده است. یکی از تحلیل‌های انجام‌شده بررسی میزان و اثر تداخل ارتعاش ناشی از کارکرد مکانیزم لنگ و فنر به‌عنوان اعمال‌کننده بار مقاوم بر روی دنده‌های چرخ‌دنده می‌باشد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با داده‌ها تجربی، اعتبار مدل شبیه‌سازی را تأیید می‌کند و همچنین مشخص شد ارتعاش ناشی از مکانیزم لنگ و فنر تداخلی در داده‌های مرتبط با عیوب چرخ‌دنده نخواهد داشت. با اخذ داده‌های تجربی از سامانه ساخته‌شده و با بررسی دامنه فرکانس درگیری چرخ‌دنده از مقدار ۴۴/۵ دسی‌بل به ۶۶/۸۷ دسی‌بل و نیز افزایش باندهای جانبی در اطراف این فرکانس، عیب سایش مشخص گردید. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده می‌توان، نسبت به تخمین عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده اقدام کرد.

۱- مقدمه

می‌آورد تا با توجه به شرایط عملکرد تجهیز، وضعیت سلامتی پایش شود تا در صورت نمایان‌شدن علائم یک عیب زمان وقوع خرابی پیش‌بینی و راهکار مناسب در مورد رفع عیب اتخاذ شود. یکی از راه‌های تشخیص و یافتن به‌موقع عیب، پایش وضعیت^۵ می‌باشد. به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات، کاهش هزینه‌های نگهداری

تشخیص و یافتن عیب در سیستم‌های مکانیکی در حین کار یکی از مهم‌ترین چالش‌های حوزه نگهداری و تعمیرات^۱ می‌باشد [۱]. نگهداری و تعمیرات (نت) دارای روش‌ها یا استراتژی‌های گوناگونی شامل استراتژی کار تا خرابی^۲، استراتژی نگهداشت پیشگیرانه^۳ و استراتژی نگهداشت پیشگویانه^۴ می‌باشد. نت پیشگویانه این امکان را فراهم

⁴ Predictive maintenance

⁵ Condition monitoring

¹ Maintenance

² Run to failure (RTF)

³ Preventive maintenance (PM)



حالت‌های خرابی^۲ مانند خراش دنده، لب‌پزدگی^۳، سایش کلی، ترک‌های ناشی از خستگی^۴ خمش و ... می‌شود. عیوب سطحی دندانه معمولاً به‌عنوان عیوب گسترده دنده شناخته می‌شوند و اکثراً به دلیل روغن‌کاری غیرکافی ایجاد می‌گردند. در مقابل عیوبی که تنها بر روی تعداد محدودی از دندانه‌ها تأثیر می‌گذارند، به‌عنوان عیوب موضعی شناخته می‌شوند و اکثراً به دلیل تنش خمشی اضافی در دندانه‌ها ایجاد می‌گردند. در جعبه‌دنده‌ها عیوب مربوط به دندانه ۶۰٪ و عیوب ناشی از عملیات نگهداری غیر صحیح ۲۴٪ از مشکلات جعبه‌دنده‌ها را تشکیل می‌دهند [۳]. به همین دلیل پایش وضعیت جعبه‌دنده‌ها یکی از مهم‌ترین موارد قابل‌اجرا برای کاهش خسارات و اطمینان از کارکرد مناسب و دائمی ماشین‌ها می‌باشد.

براساس قانون چرخ‌دنده‌ها حفظ نسبت سرعت ثابت در یک جفت چرخ‌دنده درگیر نیازمند وجود پروفیل خاصی برای دندانه‌های چرخ‌دنده می‌باشد، که یکی از این منحنی‌ها، منحنی اینولوت^۵ نام دارد. هرگونه انحراف از این منحنی، چه در زمان ساخت و چه بعد از آن و در حین کارکرد چرخ‌دنده موجب از بین رفتن دقت چرخ‌دنده شده و در مراحل بعدی موجب بروز خرابی می‌گردد. میزان انحراف سطح از پروفیل فعال دندانه‌ها سایش^۶ نامیده‌شده که دارای انواع گوناگونی می‌باشد. دو حالت مشخص از سایش، سایش خراشنده^۷ و سایش چسبنده^۸ می‌باشد. خراش بر روی یک سطح توسط یک جرم خارجی سخت هنگامی رخ می‌دهد که دو سطح بر روی یکدیگر حرکت لغزشی داشته باشند و چسبندگی زمانی اتفاق می‌افتد که سطوح لغزان تحت فشار تماسی کافی برای تغییر شکل پلاستیک و چسبندگی قرار داشته باشند. هرگاه تغییر شکل پلاستیک رخ دهد، انرژی به‌صورت گرمای ناشی از اصطکاک جذب می‌شود. اولین علامت سایش چسبنده، سطح صیقلی (لعاب‌دار) است که با پوسته‌شدن و سپس جدایش قسمتی از سطح همراه خواهد شد. این فرآیند اصطلاحاً میکرو جوش نامیده می‌شود در صورت ادامه‌دار بودن موجب بروز نوعی از سایش می‌گردد که به شکل ایجاد حفره در سطح جانبی دندانه دیده می‌شود. داشتن توانایی دقیق پایش و پیش‌بینی تغییرات پروفیل (مانند عمق سایش در راستای عمود بر سطح دندانه) و پیشرفت حفره‌های سطح می‌تواند مزایای بی‌شماری برای فعالیت‌های صنعتی داشته باشد [۴]. اخیراً یافتن خرابی در چرخ‌دنده این اجازه را می‌دهد که زمان‌بندی

و افزایش عمر تجهیز از رویکرد پایش براساس وضعیت (CBM^۱) استفاده می‌شود، این رویکرد تضمین می‌کند که نگهداری براساس داده‌های حاصل از سیستم و تنها در صورت لزوم انجام شود. نقش پایش براساس وضعیت بر پایه ارتعاش یا صوت، یافتن هرگونه تغییر در پاسخ دینامیکی براساس تغییر در یکپارچگی ساختاری یا نیروهای تحریک کننده می‌باشد. این روش به‌عنوان مؤثرترین و به‌صرفه‌ترین راه برای جلوگیری از آسیب جدی به ماشین‌های صنعتی شناخته شده است. یافتن اطلاعات دقیق از شرایط دستگاه‌ها علاوه بر افزایش کیفیت و کمیت محصول باعث می‌شود که با برنامه‌ریزی دقیق برای تعمیرات، هزینه‌های نگهداری دستگاه کاهش یابد. پایش سلامت ماشین به معنی اندازه‌گیری یا ثبت وضعیت انحراف با شرایط عادی بوده و در ماشین‌های دوار، پایش و تشخیص عیوب به‌عنوان اولویت اول برای جلوگیری از خرابی‌های غیرمنتظره محسوب می‌شود. به‌طور کلی تشخیص سلامت ماشین می‌تواند به‌عنوان توانایی مشاهده وضعیت آینده یک بخش یا سیستم و پیش‌بینی زمان باقیمانده قبل از یک حادثه فاجعه‌آمیز تعریف شود [۲].

سیستم‌های مکانیکی دارای اجزاء مختلفی بوده و یکی از اجزاء مهم در سیستم‌های مکانیکی جعبه‌دنده می‌باشد. جعبه‌دنده‌ها به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای نظامی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده گسترده از جعبه‌دنده موجب ایجاد شرایط متنوع کاری تحت تغییرات ناگهانی بار و سرعت می‌شود. این تغییرات به اجزاء سازنده جعبه‌دنده منتقل و موجب ایجاد تغییراتی در این اجزاء می‌گردد. چرخ‌دنده به‌عنوان جزئی از جعبه‌دنده که انتقال حرکت و نیرو را انجام می‌دهد یکی از اجزائی می‌باشد که همواره در معرض عیوب متفاوتی قرار دارد. عدم تشخیص به‌موقع این عیوب منجر به افزایش هزینه، مخاطرات ایمنی و کاهش قابلیت اطمینان می‌گردد، همچنین تشخیص و یافتن به‌موقع عیوب، امکان زمان‌بندی مناسب برای انجام تعمیرات یا رفع عیوب را فراهم می‌کند و از این طریق مانع بروز خرابی‌های فاجعه‌بار و در نتیجه افزایش امنیت در محیط کاری می‌گردد [۱]. در یک سیستم جعبه‌دنده زمانی که عیبی در یک یا چند دندانه به وجود می‌آید، انتقال دلخواه و دقیق سرعت و توان در سیستم از بین می‌رود. اگر دندانه‌ای به هر دلیلی معیوب شود، بر روی همه یا تعدادی از چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده مذکور تأثیر می‌گذارد. این عیوب شامل

⁵ Involute

⁶ Wear

⁷ Abrasive wear

⁸ Adhesive wear

¹ Condition base monitoring

² Failure modes

³ Chipped tooth

⁴ Fatigue cracks

دینامیکی، اعتبارسنجی^۴ یک مرحله بسیار مهم می‌باشد. بدون اعتبارسنجی معتبر نتایج تئوری نمی‌توانند در کاربردهای واقعی بکار برده شوند [۱]. بنابراین داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل‌های دینامیکی یا مدل‌سازی شده به‌وسیله نرم‌افزار می‌بایست به‌وسیله داده‌های تجربی اعتبارسنجی شوند. همچنین در بحث پیش‌بینی و برای طبقه‌بندی داده‌ها استفاده از تمامی داده‌ها حجم محاسبات را افزایش خواهد داد و در برخی موارد موجب کاهش دقت و در نتیجه عدم طبقه‌بندی صحیح داده‌ها می‌شود. پس به‌منظور درک بهتر از وضعیت دستگاه و نیز افزایش دقت در تشخیص عیب و همچنین به‌منظور کاهش بار محاسباتی در سیستم طبقه‌بندی، ویژگی‌هایی که به بهترین شکل توان توصیف وضعیت دستگاه را داشته باشند، شناسایی و استخراج شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳].

با توجه به محدودیت‌های موجود در خصوص تحلیل سیستم‌های واقعی ضرورت دارد تا با ترکیبی از مدل‌های دینامیکی و یا شبیه‌سازی شده به بررسی وضعیت این سیستم‌ها پرداخت و با اعتبارسنجی، این روش‌ها را به سایر سیستم‌های مشابه تعمیم داد. بنابراین هدف از این مقاله طراحی و ارزیابی منجر به ساخت سامانه داده‌برداری از یک جعبه‌دنده نمونه با چرخ‌دنده‌های ساده می‌باشد که می‌توان از این سامانه به‌منظور انجام آزمون‌های شتابدار برای تخمین عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده استفاده نمود.

در این پژوهش ابتدا مدل سه‌بعدی سامانه در نرم‌افزار CATIA ایجاد و سپس دینامیک چرخ‌دنده ساده با مقادیر متفاوت عکس‌العمل با استفاده از نرم‌افزار آدامز تحلیل شده است. مدل سه‌بعدی توسعه‌یافته چرخ‌دنده ساده با حرکات و نیروهای اعمال‌شده بر دندانه‌های چرخ‌دنده شبیه‌سازی شده و پاسخ دینامیکی به‌دست‌آمده از این تغییرات مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. سپس براساس این مقادیر نسبت به طراحی و ساخت سامانه اقدام، و در نهایت نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل دینامیکی با یک مدل تجربی ساخته‌شده، مقایسه شده است.

۲- روش تحقیق

میز تخمین عمر مفید باقیمانده مطابق شکل ۱ شامل قسمت‌های (۱) جعبه‌دنده، (۲) شاسی اصلی دستگاه، (۳) الکتروموتور، (۴) سامانه اعمال بار مقاوم (مکانیزم لنگ و فنر) می‌باشد. این سامانه به‌منظور بررسی عمر مفید باقیمانده چرخ‌دنده ساده در یک جعبه‌دنده نمونه طراحی و

دقیقی از ایجاد عیب و خارج از دسترس بودن تجهیز را داشته باشیم [۵]. از روش‌هایی که به‌وفور در پایش وضعیت ماشین‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، آنالیز ارتعاش و صدا می‌باشد. ارتعاش صوتی، دارای مشخصاتی مشابه با ارتعاشات مکانیکی است و می‌توان از آن برای عیب‌یابی و پایش وضعیت دقیق ماشین‌ها استفاده کرد.

تشخیص یا پیش‌بینی عیوب در جعبه‌دنده‌ها با چالش‌هایی روبرو می‌باشد. یکی از روش‌های تشخیص و پیش‌بینی عیب استفاده از مدل‌سازی یا شبیه‌سازی عیوب با استفاده از مشخصه‌های دینامیکی چرخ‌دنده می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از ابزارهای مدل‌سازی به مهندسان امکان می‌دهد تا طراحی چرخ‌دنده‌ها را بهینه کنند. با شبیه‌سازی، می‌توان عیوب محتمل را پیش‌بینی کرده و طراحی را به‌گونه‌ای تغییر داد که نیاز به آزمایش‌های گسترده کاهش یابد. این روش باعث کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری می‌شود. همچنین با بهبود طراحی، خطرهای مرتبط با عیوب در محصول نهایی کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی عیوب چرخ‌دنده این امکان را فراهم می‌آورد تا به بحث پیش‌گیری از وقوع خرابی هم پرداخته شود. با تشخیص زود هنگام عیوب، می‌توان از توقف‌های ناگهانی جلوی‌گیری و هزینه‌های تعمیراتی را کاهش داد. این روش باعث افزایش عمر مفید چرخ‌دنده‌ها و بهبود کارایی سیستم‌های مکانیکی شده و در نتیجه شبیه‌سازی عیوب چرخ‌دنده، می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای بهبود طراحی، پیش‌بینی عیوب و افزایش کارایی مطرح گردد [۶].

در مواردی مانند پایش وضعیت، به دلیل دشواری ایجاد سیگنال‌های ارتعاشی در شرایط تجربی می‌توان برای شبیه‌سازی وضعیت‌های مختلف جعبه‌دنده، از مدل‌سازی دینامیکی استفاده کرد. امروزه مدل‌سازی درگیری چرخ‌دنده به دلیل مزایای فراوان برای ایجاد تغییر آسان در پارامترهای آزمایش‌های مجازی، ترجیح داده می‌شود. چندین روش برای شبیه‌سازی رفتار جفت چرخ‌دنده از طریق مدل‌های ریاضی مانند روش‌های عددی در نرم‌افزار متلب^۱ [۷]، روش‌های المان محدود در نرم‌افزارهای آباکوس یا انسیس^۲ [۹]، [۸] و روش‌های دینامیکی چند بدنه [۱۱]، [۱۰] در نرم‌افزار آدامز^۳، استفاده می‌شود. نرم‌افزار آدامز یک نرم‌افزار محاسباتی قابل‌استفاده برای مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های مکانیکی چند بدنه می‌باشد [۱۲]. در مباحث مربوط به شبیه‌سازی و مدل‌سازی تشخیص عیب براساس مدل

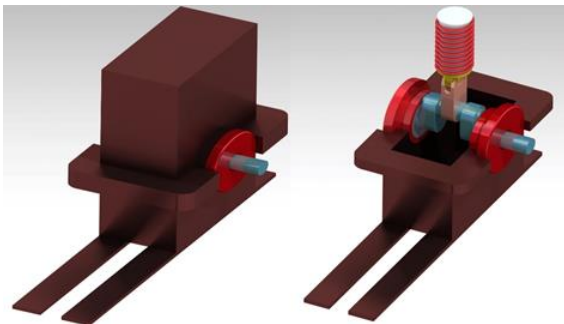
³ Msc adams

⁴ Validation

¹ Matlab

² Abaqus or ansys

به منظور اتصال محورهای ورودی و خروجی از کوپلینگ انعطاف پذیر استفاده شده است. کوپلینگ‌های انعطاف پذیر به منظور انتقال آرام گشتاور، در عین حال مجاز نمودن کمی نا هم-محوری، محوری، شعاعی و زاویه‌ای طراحی می‌شود. انعطاف پذیری طوری است که در موقع پدید آمدن نا هم-محوری، قطعات کوپلینگ با کمی مقاومت یا بدون مقاومت حرکت می‌کنند. پس تنش‌های محوری یا خمشی جدی در محور به وجود نمی‌آید.



شکل ۲: مکانیزم لنگ و فنر به منظور اعمال بار مقاوم در جعبه دنده

به منظور اعمال بار مقاوم، متناسب با جعبه دنده ابتدا گشتاور خروجی جعبه دنده با استفاده از روابط (۱ تا ۳) محاسبه گردید:

$$P = \omega T \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi n / 60 \quad (2)$$

$$T = 60P / 2\pi n \quad (3)$$

در این روابط P نماینده توان، ω نماینده سرعت زاویه‌ای، n نماینده تعداد دور بر دقیقه و T نماینده گشتاور می‌باشد. با جایگذاری مقادیر مربوطه، گشتاور خروجی جعبه دنده معادل ۵۷ نیوتن متر به دست می‌آید. بر اساس گشتاور محاسبه شده نسبت به طراحی مکانیزم لنگ و سپس طراحی فنر مناسب اقدام گردید. در خصوص مکانیزم لنگ با توجه به فضای موجود طول بازوی لنگ به اندازه ۳۵ میلی متر در نظر گرفته شد (شکل ۳).

با توجه به سایر پارامترها مانند طول لنگ، توان ورودی و میزان گشتاور خروجی جعبه دنده نسبت به طراحی و ساخت فنر اقدام شد.

ساخته شده است. به همین منظور نیاز به بررسی شرایط کار تا خرابی جعبه دنده نمونه تحت تأثیر یکی از انواع عیوب اصلی چرخ دنده خواهد بود. عیب سایش یکی از عیوب متداول در چرخ دنده و جعبه دنده‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه این عیب تحت شرایط کار عادی جعبه دنده طی مدت زمان نسبتاً طولانی ایجاد می‌شود، نیاز به انجام آزمون‌های شتابدار^۱ جهت ایجاد سایش در مدت زمان کم می‌باشد. یکی از مواردی که منجر به ایجاد سایش در چرخ دنده می‌گردد وجود بار مقاوم بر روی دندانه‌های چرخ دنده می‌باشد. در سامانه مذکور، انجام آزمون‌های شتابدار نیاز به تجهیزاتی به منظور اعمال بار مقاوم مورد نیاز دارد. به همین منظور از یک مکانیزم لنگ و فنر جهت ایجاد بار مناسب بر روی چرخ دنده‌ها استفاده خواهد شد. نمای شماتیک سامانه اعمال بار مقاوم، در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این تحقیق با توجه به بیشینه سرعت دورانی الکتروموتور و نیز بیشینه بار انتقالی، از چرخ دنده‌هایی با مدول ۴ استفاده شده است. تعداد دندانه‌های پینیون ۲۰ و قطر آن ۸۰ میلی متر و تعداد دندانه‌های چرخ دنده ۵۰ و قطر آن ۲۰۰ میلی متر انتخاب شده است. همچنین با توجه به حداکثر دور ایجاد شده در جعبه دنده و طبق استاندارد DIN 625-1 از یاتاقان نوع ۶۳۰۶ استفاده شده است.



شکل ۱: اجزاء سامانه شامل الکتروموتور، جعبه دنده، مکانیزم بار مقاوم و شاسی، بالا: مدل طراحی شده و پایین: مدل ساخته شده

¹ Accelerated tests

جدول ۱: پارامترهای چرخ‌دنده‌های مورد استفاده

پارامتر	نماد	پینیون	چرخ‌دنده
تعداد دندانه	Z	۲۰	۵۰
مدول	m	۴	۴
دایره گام	P	۸۰	۲۰۰
ضخامت چرخ‌دنده	t	۲۰	۲۰

در این پژوهش از چرخ‌دنده فولادی (St37) استفاده شده که دارای مشخصات فیزیکی مطابق با جدول ۲ می‌باشد.

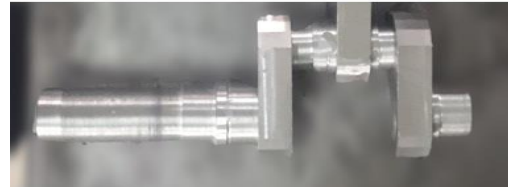
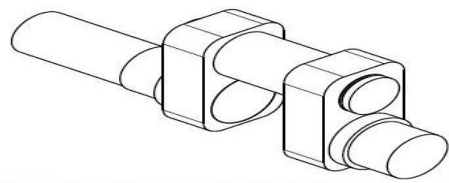
جدول ۲: مشخصات فولاد St37

مدول الاستیسیته (pa)	ضریب پواسون	جرم حجمی (Kg/m ³)	استحکام کششی (Mpa)	استحکام تسلیم (Mpa)
2.0×10^9	۰/۳	۸۰۰۰	۳۵۰ تا ۳۴۰	۲۳۵

به منظور انجام تحلیل، شرایط مرزی به این شرح انتخاب گردید: اتصال نقطه مرکزی چرخ‌دنده و پینیون با زمین به نحوی که چرخ‌دنده‌ها به جز حرکت دورانی حول محورشان (در این مقاله محور Z) هیچ‌گونه حرکتی نداشته باشند یا به عبارت دیگر هر چرخ‌دنده فقط یک درجه آزادی خواهد داشت (DOF=1) نقطه مرکز هر دو چرخ‌دنده به ترتیب C1 برای پینیون و C2 برای چرخ‌دنده در نظر گرفته شد. سرعت ورودی به جعبه دنده معادل ۱۴۹۶ دور بر دقیقه و معادل بیشینه سرعت الکتروموتور در نظر گرفته شد، ضریب اصطکاک استاتیکی معادل ۰/۱۵ و ضریب اصطکاک دینامیکی معادل ۰/۱۱ تعیین گردید.

۲-۲- مدل دینامیکی چند بدنه‌ای

به منظور بررسی اثر عیب بر روی مشخصات دینامیکی چرخ‌دنده، مدلی انعطاف‌پذیر از سیستم چرخ‌دنده‌ای در نرم‌افزار MSC ADAMS ایجاد گردید. بر اساس مدل توسعه سایش بر روی پروفیل دندانه‌ها، پاسخ دینامیکی سیستم چرخ‌دنده‌ای شبیه‌سازی گردید. به همین منظور ابتدا محور محرک و محور متحرک به همراه پینیون و چرخ‌دنده و نیز یاتاق‌های مربوطه در نرم‌افزار CATIA مدل شدند. سپس با توجه به تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل ایجاد شده در نرم‌افزار CATIA و نتایج به دست آمده از این تحلیل‌ها بابت مشخص شدن نقاط مرکز جرم، توزیع ممان‌ها و ... مدل انعطاف‌پذیر در نرم‌افزار MSC ADAMS توسعه داده شد. به منظور مدل کردن توابع سختی در



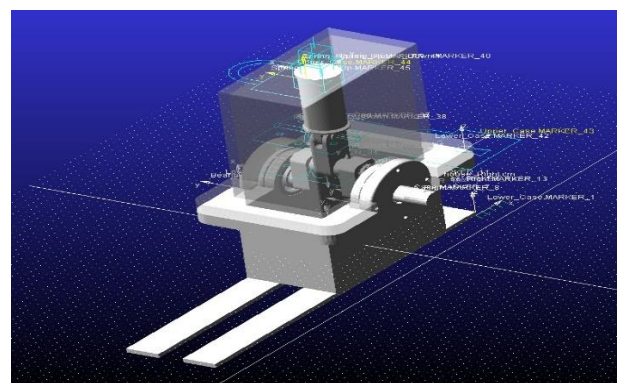
شکل ۳: لنگ طراحی شده در نرم‌افزار CATIA (بالا) و مدل ساخته شده (پائین)

برهمن اساس قطر مفتول ۷ میلی‌متر، قطر خارجی فنر ۶۵ میلی‌متر، ارتفاع فنر با احتساب قلاب‌های انتهایی ۱۷۵ میلی‌متر و تعداد حلقه‌های فعال ۱۴ حلقه به دست آمد. به صورت تئوری، بیشینه نیروی اعمال شده از جانب فنر در هنگام فشرده شدن به اندازه ۷۵ میلی‌متر (جابجایی بازوی لنگ از پائین‌ترین نقطه تا بالاترین نقطه) معادل ۱۱۰۰ نیوتن به دست آمد.

۲-۱- شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار ADAMS View

از نرم‌افزار ADAMS View به منظور شبیه‌سازی دینامیکی، بررسی اثر ارتعاش حاصل از جابجایی فنر بر روی سازه و تحلیل نتایج استفاده گردید (شکل ۴).

نرم‌افزار آدامز در ماژول Machinery و در قسمت Gear با تعریف پارامترهای عمومی مانند مدول، تعداد دندانه، عرض چرخ‌دنده و ضخامت دندانه امکان ایجاد انواع سیستم‌های چرخ‌دنده‌ای را ارائه می‌دهد. پارامترهای طراحی چرخ‌دنده ساده که در این پژوهش استفاده شده است طبق جدول ۱ می‌باشد.



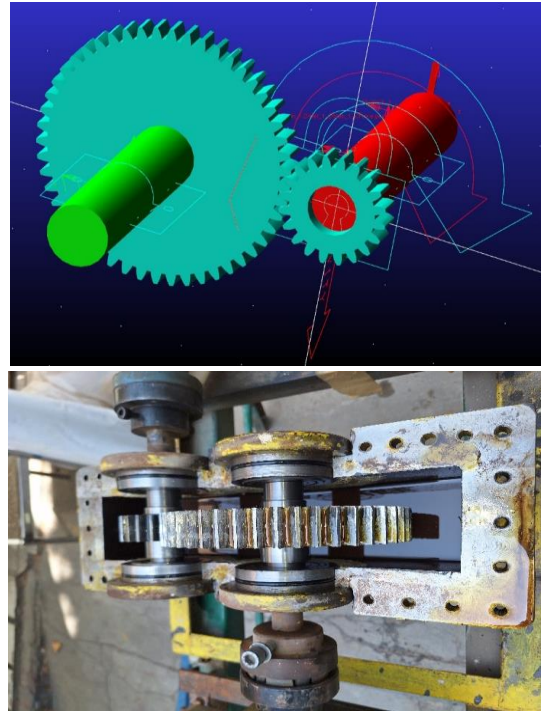
شکل ۴: تحلیل مکانیزم لنگ و فنر در محیط نرم‌افزار ADAMS View

پذیرفت. به منظور تحلیل سیگنال‌های صوتی، داده‌های صوتی به دست آمده از سامانه در شرایط سالم، پس از اتصال مکانیزم لنگ و فنر، بعد از مدت ۳۰ ساعت کار و در نهایت پس از مدت ۶۰ ساعت کار اخذ شده و تفاوت این سیگنال‌ها که در اثر ایجاد عیب سایش به وجود آمده بود به عنوان ویژگی انتخاب گردید. این تغییر در فرکانسی برابر با فرکانس درگیری چرخ‌دنده^۱ (GMF) به وجود می‌آید. فرکانس درگیری از حاصل ضرب تعداد دندانه‌ها در سرعت دورانی چرخ‌دنده (N) برحسب دور بر ثانیه^۲ که با عنوان هرتز معروف می‌باشد، محاسبه می‌شود. در این پژوهش با توجه به منبع توان محور ورودی که با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه (۲۵ هرتز یا دور بر ثانیه) دوران می‌کند، و همچنین با توجه به تعداد دندانه‌های پینیون فرکانس درگیری معادل ۵۰۰ هرتز به دست می‌آید. در خصوص عیب سایش، تغییر به صورت افزایش دامنه فرکانس درگیری و نیز ایجاد باندهای جانبی در اطراف این فرکانس و هارمونیک‌های آن می‌باشد. تراز فشار صدا (SPL^۳) که یکی از کمیت‌های لگاریتمی (تراز) صدا بوده و بیانگر کمیت فیزیکی (مطلق) فشار صوت به صورت تراز از آستانه شنوایی انسان می‌باشد و با رابطه (۴) محاسبه می‌شود، به عنوان روش تحلیل سیگنال‌های صوتی استفاده شد:

$$SPL = 10 \log \frac{SP^2}{SP_0^2} = 20 \log \frac{SP}{SP_0} \quad (4)$$

در این رابطه که با واحد db^۴ شناخته می‌شود، SP^۵ نماینده فشار صوت^۶ و اندیس صفر نشان‌دهنده کمیت مبنا است که مقدار این کمیت در حد آستانه شنوایی انسان یعنی $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ است. برای ضبط سیگنال‌های صوتی در این پژوهش از دستگاه صداسنج مدل HT-157 کلاس ۱ ساخت کشور ایتالیا استفاده شد (شکل ۶). میکروفن این صداسنج دارای حساسیتی معادل ۵۰ میلی‌ولت بر پاسکال بوده که برای استفاده در کارهای تحقیقاتی مناسب می‌باشد. داده‌های صوتی با نرخ ۱۹۲۰۰۰ نمونه بر ثانیه ضبط شده است که نرخ مناسبی جهت مشاهده ضربه‌های بسیار کوچک نیز می‌باشد.

چرخ‌دنده و یاتاقان‌ها از فنرهای پیچشی و رفت و برگشتی در محل‌های مناسب استفاده شده است، در همین حال از مفاصل چرخشی در محل اتصال اجزاء دوار به بدنه یا به یکدیگر استفاده گردید. تماس در محل دندانه‌های پینیون و چرخ‌دنده به همراه پارامترهای اصطکاک که پیش از این مقادیر آنها ذکر شده است ایجاد گردید. میزان حرکت دورانی بر روی مفصل ورودی به جعبه‌دنده و میزان گشتاور بر روی خروجی چرخ‌دنده تنظیم گردید.



شکل ۵: مدل ایجاد شده در نرم‌افزار MSC ADAMS. پایین: نمونه چرخ‌دنده‌های واقعی

۳- آزمون تجربی

پس از انجام تحلیل‌های مربوط به مکانیزم لنگ و فنر نسبت به ساخت نمونه واقعی سامانه مذکور اقدام گردید و داده‌های حاصل از کار نمونه ساخته شده اخذ و تحلیل این داده‌ها به منظور تخمین عمر مفید باقیمانده چرخ‌دنده انجام پذیرفت. در این بخش داده‌های جعبه‌دنده از شروع کار سامانه تا زمان ایجاد سایش جمع‌آوری گردید. با توجه به حجم داده‌های اخذ شده و نیز با توجه به مشخصات دستگاه اخذ داده‌های صوتی، قطعات ۰/۵ ثانیه‌ای برای پردازش و به دست آوردن مشخصات مدنظر جدا و پردازش نهایی بر روی این داده‌ها انجام

^۶ در رابطه مربوط به سطح فشار صدا (SPL) برای نشان دادن فشار صوت همواره از متغیر P استفاده می‌شود، اما در این مقاله به دلیل تشابه با سایر روابط از متغیر SP برای نشان دادن فشار صوت استفاده شده است.

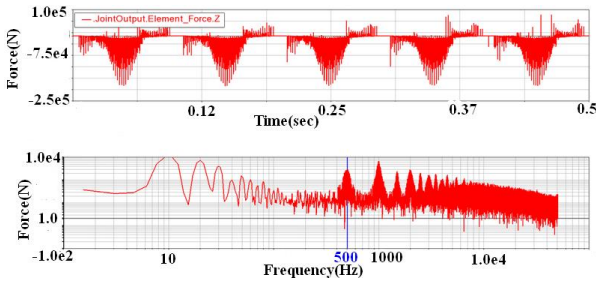
^۱ Gear mesh frequency

^۲ Cycle per second

^۳ Sound pressure level

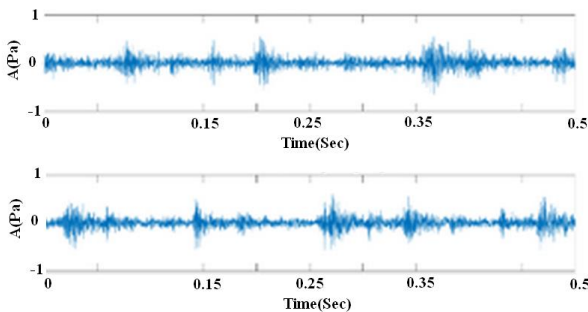
^۴ Deci bell

^۵ Sound pressure



شکل ۸: نتایج تغییرات نیرو حاصل از شبیه‌سازی بعد از اتصال مکانیزم (بالا): حوزه زمان (پائین): حوزه فرکانس

به منظور اعتبارسنجی داده‌های به دست آمده از نرم افزار MSC ADAMS نیاز به تحلیل سیگنال‌های اخذ شده از سامانه، قبل از اتصال مکانیزم لنگ و فنر و بعد از اتصال مکانیزم به جعبه‌دنده می‌باشد. به همین منظور چرخ‌دنده نمونه که در این پژوهش، پینیون جعبه‌دنده مدنظر می‌باشد، بدون هیچ‌گونه تیماری بر روی سامانه نصب و نسبت به داده‌برداری از سامانه اقدام گردید. به منظور بررسی تأثیر مکانیزم لنگ و فنر داده‌برداری با اتصال مکانیزم به سامانه و بدون هیچ‌گونه تغییری در سایر پارامترها تکرار گردید، و داده‌های حاصل از این مرحله جمع‌آوری گردید. نمایش حوزه زمان این داده‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: نمایش حوزه زمان سیگنال به دست آمده از سامانه (بالا قبل از اتصال مکانیزم، پایین بعد از اتصال مکانیزم)

تحلیل حوزه زمان معمولاً به جز مشخصات آماری، اطلاعات چندانی در خصوص وجود یا عدم وجود عیب به دست نمی‌دهد. باین‌حال میزان تأخیر زمانی ایجاد شده در سیگنال زمانی بعد از اتصال مکانیزم لنگ و فنر که در شکل ۹ (پایین) مشخص است می‌تواند نشان‌دهنده اثر مکانیزم بر روی سیگنال در حوزه زمان باشد. با توجه به اینکه ایجاد و پیشرفت عیب در حوزه فرکانس قابل مشاهده می‌باشد، با استفاده از تبدیل فوریه و روش SPL داده‌ها به حوزه فرکانس منتقل گردید.

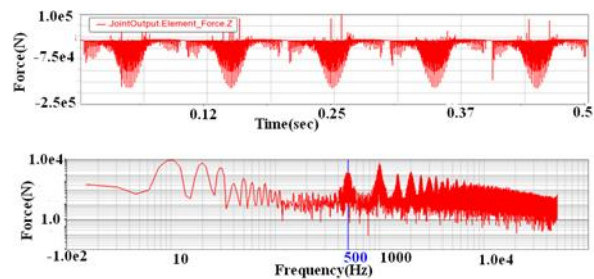


شکل ۶: صدا سنج مدل HT-157

یکی از مزایای استفاده از تحلیل صوتی عدم نیاز به نصب تجهیز داده‌برداری بر روی سامانه و امکان داده‌برداری با فاصله از سامانه می‌باشد. این تجهیز بر روی یک چهارپایه و در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از جعبه‌دنده نسبت به ضبط داده‌ها اقدام گردید.

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی شرایط مکانیزم لنگ و فنر و تأثیر آن بر روی جعبه‌دنده پارامترهایی نظیر سرعت، توان و ارتعاش انتقال یافته شبیه‌سازی و نتایج حاصله در ادامه توضیح داده می‌شود. در شبیه‌سازی مکانیزم لنگ، شرایط در دو حالت قبل از اعمال نیروی فنر و بعد از اعمال نیروی فنر بررسی گردید. مقادیر مربوط به تغییرات نیرو در حوزه زمان و حوزه فرکانس قبل از اتصال مکانیزم لنگ و فنر در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل فرکانس درگیری و هارمونیک‌های این فرکانس قابل مشاهده می‌باشد.

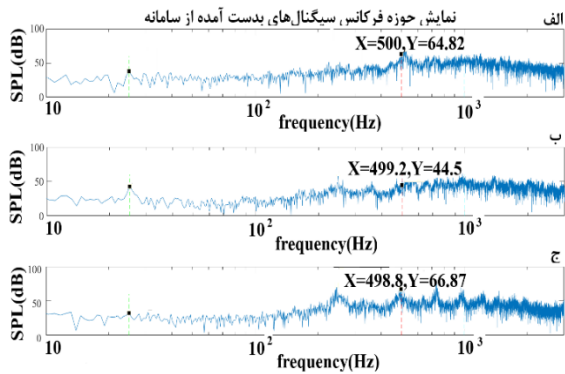


شکل ۷: نتایج تغییرات نیرو حاصل از شبیه‌سازی قبل از اتصال مکانیزم (بالا): حوزه زمان (پائین): حوزه فرکانس

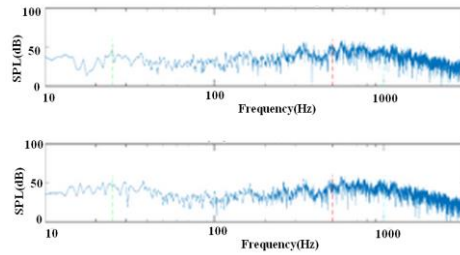
شبیه‌سازی با اتصال مکانیزم لنگ و فنر به خروجی جعبه‌دنده مجدد انجام و نتایج مربوط به تغییرات نیرو در حوزه زمان و فرکانس در شکل ۸ نشان داده شده است.

طبق آنچه در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است اتصال مکانیزم لنگ و فنر تغییر معناداری در دامنه فرکانس درگیری و هارمونیک‌های آن ایجاد نکرده است و به عبارت دیگر مشخص گردید که میزان ارتعاش منتقل شده به پوسته و به تبع آن به جعبه‌دنده تأثیری در داده‌های به دست آمده از جعبه‌دنده به منظور پایش وضعیت چرخ‌دنده نخواهد داشت.

است. میزان تغییر در فرکانس درگیری و هارمونیک‌های آن و نیز ایجاد باندهای جانبی نشان‌دهنده ایجاد و پیشرفت عیب سایش می‌باشد.



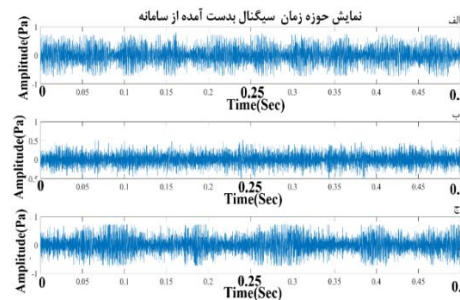
شکل ۱۰: نمایش حوزه SPL (فرکانس) سیگنال به‌دست‌آمده از سامانه (بالا) قبل از اتصال مکانیزم، پایین بعد از اتصال مکانیزم



شکل ۱۱: نمایش حوزه زمان داده‌های به‌دست‌آمده از سامانه، الف) ابتدای داده‌برداری، ب) بعد از اتصال مکانیزم لنگ و فنر و پس از ۳۰ ساعت کارکرد، ج) پس از ایجاد سایش بعد از مدت ۶۰ ساعت کارکرد سامانه

از مقایسه حوزه فرکانس (شکل ۱۰) سیگنال‌های قبل و بعد از اتصال مکانیزم لنگ و فنر، با توجه به عدم تغییر در فرکانس درگیری چرخ‌دنده (۵۰۰ هرتز) مشخص گردید که مکانیزم تأثیری بر روی داده‌های ایجادشده نخواهد داشت، این موضوع قبلاً توسط تحلیل آدامز هم مشخص شده بود. مقایسه بین سیگنال‌های به‌دست‌آمده از سامانه و نیز مدل شبیه‌سازی شده مشخص می‌کند که داده حاصل از شبیه‌سازی دقت کافی را داشته و به این ترتیب صحت اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی نیز تأیید می‌گردد.

به‌منظور تخمین عمر چرخ‌دنده داده‌های سامانه حین کارکرد دستگاه طی مدت زمان ۶۰ ساعت اخذ گردید. بررسی این سیگنال‌ها با هدف به دست آوردن ویژگی‌های برتر انجام شد. همان‌طور که پیش از این نیز آورده شده است، داده‌های به‌دست‌آمده در حوزه زمان (شکل ۱۱) برای تشخیص عیوب مناسب نبوده و به‌جز چند ویژگی آماری، نمی‌توان مشخصه منحصر به فردی در این حوزه تعریف کرد.



شکل ۱۲: نمایش سطح فشار صدا (SPL)، الف) ابتدای داده‌برداری، ب) پس از اتصال مکانیزم لنگ و فنر و پس از ۳۰ ساعت کارکرد سامانه، ج) پس از ایجاد سایش بعد از مدت ۶۰ ساعت کارکرد سامانه

شکل ۱۲ مربوط به نمایش سطح فشار صدا از سه زمان متفاوت سامانه (به شرح الف) ابتدای داده‌برداری ب) پس از اتصال مکانیزم لنگ و فنر با هدف انجام آزمون‌های شتابدار پس از ۳۰ ساعت کارکرد سامانه و به‌منظور تسریع در فرآیند سایش و درنهایت ج) پس از ایجاد سایش بعد از مدت ۶۰ ساعت کارکرد سامانه، می‌باشد. فرکانس درگیری در ابتدای کار سامانه مقداری معادل ۶۴/۸۲ دسی‌بل را نشان می‌دهد که بعد از اتصال مکانیزم لنگ و مدت ۳۰ ساعت کارکرد این مقدار به عدد ۴۴/۵ دسی‌بل می‌رسد. این میزان کاهش به دلیل وجود عیوب اولیه از جمله عیوب حین ساخت در پروفیل چرخ‌دنده بوده که به مرور و بعد از مدتی کارکرد از بین می‌روند. اما در مرحله سوم میزان فرکانس درگیری به عدد ۶۶/۸۷ دسی‌بل می‌رسد که این افزایش در فرکانس درگیری به همراه به وجود آمدن باندهای جانبی نشان‌دهنده وجود عیب سایش در پینیون می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از سامانه و مدت زمان ایجاد عیب سایش برای یک چرخ‌دنده و نیز به کمک روش‌های آماری مخصوصاً روش توزیع وایبل^۲ می‌توان عمر مفید جعبه‌دنده را تخمین زده و از این الگو برای تخمین عمر مفید سایر ماشین‌های مشابه استفاده نمود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور بررسی عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده نسبت به طراحی، ارزیابی و ساخت سامانه‌ای اقدام گردید. با توجه به عیب

به همین منظور داده‌ها از حوزه زمان به‌وسیله تبدیل سریع فوریه (FFT^۱) به حوزه فرکانس برده می‌شود. در این پژوهش به‌منظور تشخیص عیب سایش از روش سطح فشار صدا SPL بهره برده شده

^۲ Weibull distribution

^۱ Fast fourier transform

۶- منابع

- [1] X. Liang, M. J. Zuo, and Z. Feng, "Dynamic modeling of gearbox faults: A review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 98, pp. 852–876, 2018. doi: [10.1016/j.ymssp.2017.05.024](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.024).
- [2] W. Caesarendra, A. Widodo, and B. S. Yang, "Combination of probability approach and support vector machine towards machine health prognostics," *Probabilistic Eng. Mech.*, vol. 26, no. 2, pp. 165–173, 2011. doi: [10.1016/j.probengmech.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2010.09.008).
- [3] G. Dalpiaz, A. Rivola, and R. Rubini, "Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 14, no. 3, pp. 387–412, 2000. doi: [10.1006/mssp.1999.1294](https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1294).
- [4] K. Feng, W. A. Smith, R. B. Randall, H. Wu, and Z. Peng, "Vibration-based monitoring and prediction of surface profile change and pitting density in a spur gear wear process," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 165, p. 108319, 2022. doi: [10.1016/j.ymssp.2021.108319](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108319).
- [5] O. D. Mohammed and M. Rantatalo, "Gear fault models and dynamics-based modelling for gear fault detection—A review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 117, p. 104798, 2020. doi: [10.1016/j.engfailanal.2020.104798](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104798).
- [6] J. Xia, R. Huang, Y. Liao, J. Li, Z. Chen, and W. Li, "Digital twin-assisted gearbox dynamic model updating toward fault diagnosis," *Front. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 2, p. 32, 2023. doi: [10.1007/S11465-023-0748-0](https://doi.org/10.1007/S11465-023-0748-0).
- [7] Q. Chen, Y. Ma, S. Huang, and H. Zhai, "Research on gears' dynamic performance influenced by gear backlash based on fractal theory," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 313, pp. 325–332, 2014. doi: [10.1016/J.APSUSC.2014.05.210](https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2014.05.210).

بررسی شده در این پژوهش (سایش) و نیز مکانیزم شتاب دهنده روند ایجاد عیب مذکور نیاز به بررسی تداخل ارتعاش ایجاد شده ناشی از مکانیزم ایجاد بار مقاوم با داده‌های مربوط به خرابی چرخ‌دنده می‌باشد. در همین خصوص و قبل از ساخت نمونه تجربی سامانه تخمین عمر مفید باقیمانده چرخ‌دنده، با استفاده از شبیه‌سازی مکانیزم اعمال بار مقاوم و بررسی نیروهای وارد بر محور ورودی نسبت به اخذ داده‌های ارتعاشی حاصل از عملکرد مکانیزم لنگ و فنر اقدام گردید. در این پژوهش تأثیر کارکرد مکانیزم اعمال بار مقاوم بر روی خصوصیات دینامیکی کل سامانه با در نظر گرفتن نیروی حاصل از کار فنر و نیروی حاصل از آن بررسی شد. ارتعاش پوسته تحت تأثیر پارامترهای غیرخطی چرخ‌دنده مانند سایش و جنس قطعات استفاده شده، غیرخطی می‌باشد. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام شده در دو حالت اعمال بار مقاوم و حالت بدون اعمال بار با بررسی فرکانس درگیری چرخ‌دنده مشخص گردید میزان ارتعاش ایجاد شده ناشی از کار مکانیزم لنگ و فنر تأثیر معنی‌داری بر روی ارتعاش کل سامانه نخواهد داشت. درنهایت و بعد از ساخت سامانه و مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی، اعتبار داده‌های به‌دست‌آمده تأیید گردید و نیز مشخص شد که ارتعاش حاصل از مکانیزم لنگ و فنر (که به‌منظور اعمال بار مقاوم در خروجی جمع‌دهنده استفاده شده است) تداخلی با داده‌های تشخیص عیب چرخ‌دنده نخواهد داشت. پس از انجام ارزیابی مکانیزم لنگ و فنر داده‌های مربوط به زمان شروع کار تا رؤیت ویژگی‌های عیب سایش در چرخ‌دنده اخذ و نسبت به تحلیل این سیگنال‌ها در حوزه فرکانس با روش SPL اقدام گردید. به همین منظور داده‌های صوتی از سامانه در سه مرحله اخذ و پردازش گردید. در ابتدا با توجه به وجود برخی عیوب ساخت به مرور و طی ۳۰ ساعت کارکرد اولیه سامانه، کاهش فرکانس درگیری از ۶۴/۸۲ به ۴۴/۵ دسی‌بل مشاهده شد، پس از این دامنه فرکانس درگیری با افزایش مواجه و به مقدار ۶۶/۸۷ دسی‌بل رسید و همچنین ایجاد باندهای جانبی نیز در اطراف این فرکانس به وضوح قابل مشاهده شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از نتایج پژوهش و به کمک توابع آماری مانند توزیع وایبل می‌توان عمر مفید جمع‌دهنده را تخمین زد.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از مدیریت و پرسنل خدوم شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) که در مدت انجام این پژوهش کمال همکاری را داشتند، تقدیر و تشکر می‌گردد.

-
- [11] G. Litak and M. I. Friswell, "Dynamics of a gear system with faults in meshing stiffness," *Nonlinear Dyn.*, vol. 41, pp. 415–421, 2005. doi: [10.1007/S11071-005-1398-Y](https://doi.org/10.1007/S11071-005-1398-Y).
- [12] G. A. Ambaye and H. G. Lemu, "Dynamic analysis of spur gear with backlash using ADAMS," *Mater. Today: Proc.*, vol. 38, pp. 2959–2967, 2021. doi: [10.1016/j.matpr.2020.09.309](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.309).
- [13] R. K. Y. Chang, C. K. Loo, and M. V. C. Rao, "Enhanced probabilistic neural network with data imputation capabilities for machine-fault classification," *Neural Comput. Appl.*, vol. 18, pp. 791–800, 2009. doi: [10.1007/s00521-008-0215-1](https://doi.org/10.1007/s00521-008-0215-1).
- [8] A. Kahraman and R. Singh, "Non-linear dynamics of a spur gear pair," *J. Sound Vib.*, vol. 142, no. 1, pp. 49–75, 1990. doi: [10.1016/0022-460X\(90\)90582-K](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90582-K).
- [9] S. Ebrahimi and P. Eberhard, "Rigid-elastic modeling of meshing gear wheels in multibody systems," *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 16, pp. 55–71, 2006. doi: [10.1007/S11044-006-9021-7](https://doi.org/10.1007/S11044-006-9021-7).
- [10] Y. Wang, H. M. E. Cheung, and W. J. Zhang, "Finite element modelling of geared multi-body system," *Commun. Numer. Methods Eng.*, vol. 18, no. 11, pp. 765–778, 2002. doi: [10.1002/CNM.526](https://doi.org/10.1002/CNM.526).



Performance Enhancement of Photovoltaic-Thermal Panel Using Hybrid Nanofluids

Mohammad Mazidi Sharafabadi*¹, Shirin Taleb², Niko Faraji³, Seyed Mohammad Sadegh Mousavi Shad⁴

1. Associate Professor, Research Institute of Petroleum Industry(RIPI), Tehran, Iran.

2 M.Sc., Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

3. M.Sc, Urmia University, Urmia, Iran.

4. M.Sc, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, hybrid nanofluids have been used to enhance the performance of a photovoltaic-thermal (PVT) panel. Hybrid nanofluids consist of a combination of nanoparticles and a base fluid, offering superior thermal and conductive properties compared to conventional base fluids. In this research, different nanoparticles, such as titanium oxide and aluminum oxide, were dispersed in water as the base fluid at varying weight fractions of 0%, 3%, and 6%, and their effects on heat transfer and panel efficiency were investigated. The simulation results indicate that adding titanium oxide and aluminum oxide nanoparticles at a weight fraction of 3% each resulted in thermal and electrical efficiencies of 32.92% and 14.68%, respectively. When the weight fraction was adjusted to 6% for aluminum oxide and 0% for titanium oxide, the thermal and electrical efficiencies were 32.95% and 14.68%, respectively, showing negligible variation compared to the base fluid without nanoparticles. Additionally, increasing the volume fraction of one of the nanoparticles did not lead to significant changes in the results, only slightly improving system efficiency. This study can assist designers and engineers in developing and optimizing photovoltaic-thermal panel systems, contributing to the efficient utilization of solar energy resources.

Keywords

Photovoltaic-Thermal Panel
Solar Energy
Titanium Oxide
Aluminum Oxide
Heat Transfer
Bulk Thermal Conductivity
Simulation

Received: 11.04.2024

Revised: 01.19.2025

Accepted: 01.20.2025

*Corresponding Author

Mohammad Aboonajmi

Email

mohammad_477@yahoo.com

1- Introduction

Solar energy is considered the largest available energy source. The limitations of fossil fuels and environmental concerns have led researchers to explore solar energy as a suitable alternative. The clean and unlimited nature of solar energy has attracted the attention of many countries for energy supply. Using solar collectors, sunlight can be absorbed and converted into the required form of energy. However, a crucial challenge in this technology is improving the efficiency and thermal performance of devices to generate more energy. Nanotechnology can help enhance efficiency to

some extent. Nanofluids are advanced liquids containing a small amount of nanoparticles (typically less than 100 nanometers) that are uniformly and stably suspended in the liquid. The dispersion of a small quantity of solid nanoparticles in conventional fluids, such as water, significantly alters their heat transfer characteristics. Nanofluids have been utilized to enhance the thermal performance of various engineering systems and have been employed as working fluids for heat transfer in solar collectors. [1] A study conducted by Kazem et al. [2] examined the efficiency of a



PVT cooling system, where nanofluids composed of water and ethylene glycol in a 75:25 volumetric ratio, along with SWCNTs at different weight fractions of 0.1%, 0.5%, 1%, and 2%, were utilized. The researchers performed multiple experiments to evaluate the thermophysical properties of a nanofluid formed by adding 0.5% SWCNTs to the PVT system. The results from thermal imaging and ζ potential tests revealed that the nanoemulsion exhibited a high thermal conductivity increase of 103% and significant stability for over 109 days. As a result of this addition, the generated power increased by 11.7%, and the electrical efficiency improved by 25.2% compared to a standalone PV system. A photovoltaic-thermal system was tested by Alghandi [3] using a trapezoidal flow channel that integrated copper, polycrystalline silicon, and a mixture of titanium oxide and silver nanoparticles in water. Various parameters, including volume fraction, Reynolds number, and aspect ratio, were analyzed. The results indicated that increasing the Reynolds number from 100 to 1000 reduced the cell temperature by 50% and enhanced efficiency. Additionally, it was suggested that a higher inlet height could improve system performance by allowing more fluid into the system. These findings promise an improvement in the efficiency of photovoltaic-thermal systems. Another significant study was conducted by Eglave et al. [4], focusing on the design and simulation of a microchannel heat sink integrated with a heat-generating device. This research involved a parametric evaluation considering heat flux, mass flow rate, inlet temperature, and nanofluid concentration. It was determined that the heat sink effectively reduced the device's temperature. When a 0.3% volume fraction and a mass flow rate of 8 kg/s were used, the maximum heat transfer rate reached 13,693 W/m²K at an inlet temperature of 35°C. In this study, the efficiency of a photovoltaic-thermal panel was quantitatively and numerically investigated using a hybrid nanofluid of titanium oxide/aluminum oxide with water as the base fluid, while analyzing the effects of various process parameters on the thermal and electrical performance of the PVT panel. The primary objective is to enhance electrical and thermal efficiency. The use of hybrid nanofluids can

facilitate this improvement. High temperatures in photovoltaic cells reduce efficiency; however, hybrid nanofluids, with superior heat transfer properties, lower cell temperatures and enhance overall performance.

2- Research Methods

2-1 Geometric Modeling

The arrangement of the modeled tubes in the software is shown in Figure 1. It illustrates the collector tubes for the case where the number of tubes is eight

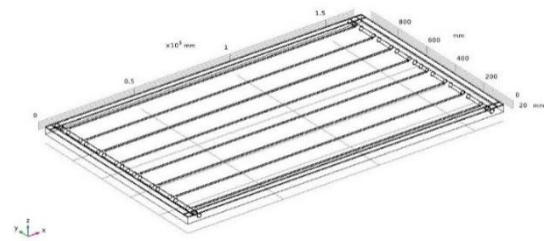


Figure 1: Schematic of the 8-Tube Geometry

2-2 Nanofluid equations and properties

In this study, the properties of aluminum oxidized and titanium oxidized nanoparticles are utilized. The properties of the nanofluid, including density, specific heat, thermal conductivity, viscosity, and volume fraction of nanoparticles, are calculated using equations provided in reference.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_b + \rho_{np}\phi \quad (1)$$

$$\frac{(C_P)_{nf}}{\rho_{nf}} = \frac{(1 - \phi)(C_P\rho)_b + (C_P\rho)_{np}\phi}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_b} = \frac{2k_b + k_p 2(k_p - k_b)\phi}{-(k_p - k_b)\phi + 2k_b + k_p} \quad (3)$$

$$\mu_{nf} = (1 - \phi)^{-2.5}\mu_b \quad (4)$$

$$L_{np\text{pcm}} = \frac{(1 - \phi)(\rho L)_{\text{pcm}}}{\rho_{np\text{pcm}}} \quad (5)$$

In the given study, the volume fraction of nanoparticles is represented by ϕ . The subscripts b,

np, and nf correspond to the base fluid, nanoparticles, and nanofluid, respectively.

2-3 Boundary conditions

This problem has been solved for the number of different pipes as well as the different temperature of the inlet fluid. In the modeled photovoltaic thermal system, we have heat transfer resulting from convection, radiation and heat transfer from the cell surface to the the deep sky. The intial fluid inlet temperature of the pannel is assumed the same as the ambient temperature. Also, the no-slip boundary condition is established for the modeling of the walls. A no-slip wall is a wall where the fluid velocity is zero compared to the wall velocity. thermal and Velocity boundary conditions are tabulated in Table 1 and Table 2, respectively.

Table 1: thermal boundary conditions

Boundary layer	Equations	Geometric location
Insulation	$-n \cdot q = 0$	pipe edges
Constant temperature	$-n \cdot q = \rho \Delta H u \cdot n$ $\Delta H = \int_{T_{in}}^T C_p dT$	pipe inlet
Convection heat flux	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = h_s(T_a - T_s)$ $-n_a \cdot q_a = \frac{(T_u - T_d)}{R_s} + \frac{1}{2} d_s Q_s$	All over except fluid inlet and outlet and glass surface
Thin layer	$R_s = \frac{d_s}{K}$ $K = \frac{d_s}{\sum \frac{d_{sj}}{kj}}$ $= \sum d_{sj}$	Panel frame
Surface to ambient radiation	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = \epsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4)$	PVT top surface to the sky
Radiative heat transfer	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = \epsilon_g G$	PVT top surface

Table 2: velocity boundary conditions

Boundary layer	Equations	Geometric location
wall	$u = 0$	All pipe walls
Constant flow rate	$Q = - \int_{d\Omega_{in}} u \cdot n ds = 0.5 \left(\frac{l}{min} \right)$	pipe inlet
Average pressure	$p = 0$	pipe outlet

3- Discussion and Results

3-1 Basic 8-tube geometry

3-1-1 Two-dimensional temperature contour on the surface of the glass panel

This section presents the two-dimensional temperature contour. Based on the temperature contour presented for the photovoltaic thermal cell in Figure 2, it is noticeable that the surface temperature of the cell at the water inlet is cooler compared to the surface temperature at the water outlet. Subsequently, as the cell collects sun radiation through its absorbent surface, the temperature of the cell surface gradually increases. Eventually, the heat received through radiation is transferred to the tubes beneath the cell surface, leading to an increase in the temperature of the fluid flowing between the tubes. Consequently, due to this heat transfer, the temperature of the cell surface gradually decreases in comparison to the temperature of the heated fluid. It is important to note that the ambient temperature is considered to be 20°C.

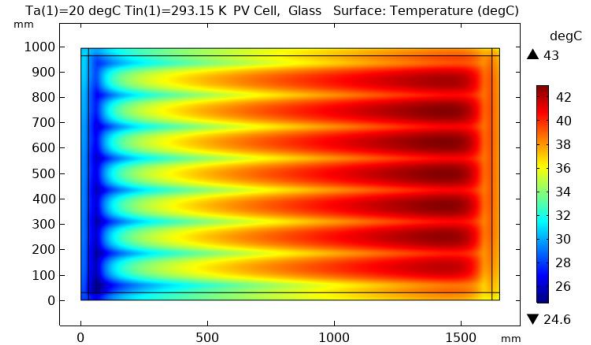


Figure 2: two-dimensional temperature contour on the glass surface of the 8-tube panel at the inlet water temperature of 20°C

3-1-2 Two-dimensional temperature contour in the middle of the tubes

In the Figure 3, it is evident that the side parts of the panel surface where the operating fluid enters have a lower temperature compared to other parts. This can be attributed to the fact that the inlet water temperature is kept as low as possible. Subsequently, as the cell surface receives radiation from the sun, the temperature of the cell surface gradually increases. This heat is then transferred to the tubes beneath the surface of the panel, causing the fluid flowing through the collector tubes to heat

up. This process continues in a cyclical manner. As observed, the temperature of the inlet water starts at 20°C. After receiving heat and circulating through the pipes, its temperature increases to above 40°C. This increase in temperature is due to the absorption of heat from the panel surface.

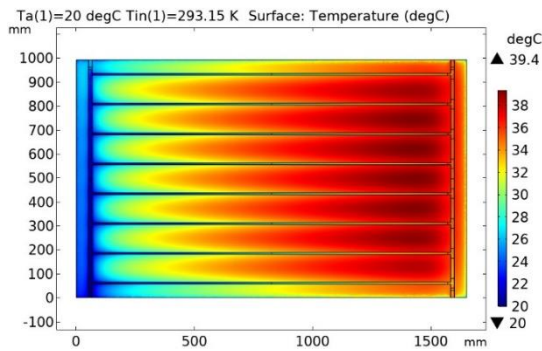


Figure 3: two-dimensional temperature contour in the middle of the tubes (8-tube panel) at the inlet water temperature of 20°C.

3-1-3 Two-dimensional velocity contour in the middle of the tubes

In the Figure 4, it is evident that the velocity in the side parts of the panel surface, where the working fluid enters, is lower compared to other parts. As the fluid circulates and its temperature increases, the velocity gradually increases. As observed, the velocity is lower in the main inlet part on the left side. The velocity is higher in the middle pipes due to the smaller diameter of the pipe. During heating, it is possible that the velocity slightly increases through the heating path in the middle tube due to the growing of the velocity boundary layer.

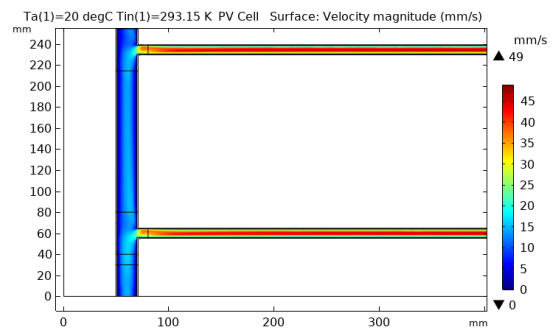
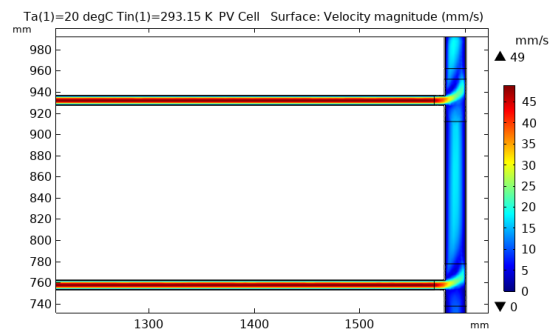
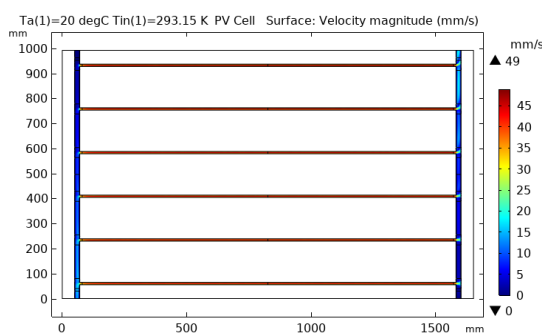


Figure 4: Two-dimensional velocity contour in the middle of the tubes (8-tube panel) at the inlet water temperature of 20°C.

4- Conclusion

In this study, the thermal performance of a photovoltaic-thermal (PVT) panel was investigated using a combination of titanium oxide and aluminum oxide nanoparticles with different weight percentages of 0%, 3%, and 6% in water as the base fluid. The results indicate that the addition of the hybrid nanofluid achieves the highest efficiency compared to the single nanofluid and even with an increase in the volumetric percentage of the selected nanofluid. Numerical results show that at ambient temperatures of 20°C and 30°C, the thermal and electrical efficiencies are (32.641 and 32.437) and (14.674 and 14.119), respectively. As the ambient temperature increases, leading to a higher absorber surface temperature, the system's thermal efficiency decreases. This trend also affects the inlet pressure of the fluid, as at ambient temperatures of 20°C and 30°C, the inlet pressure values are (26.83 and 22.33), respectively. Furthermore, analyzing the effect of nanoparticle volume fraction in the system under ideal conditions reveals that at an ambient temperature of 20°C, with a 3% weight fraction of titanium oxide and aluminum oxide nanoparticles, the thermal and electrical efficiencies reach (32.926 and 14.688), and the inlet fluid pressure is 29.809.

5- References

- [1] M. J. Muhammad *et al.*, "Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: A review," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 6–15, 2016. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.005)
- [2] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. Al-Waeli, and K. Sopian, "Investigation of a nanofluid-based photovoltaic thermal system using single-wall carbon nanotubes: An experimental study," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, pp. 10285–10303, 2021. [Online]. Available: doi :[10.1002/er.6522](https://doi.org/10.1002/er.6522)
- [3] M. Alghamdi, A. A. Memon, T. Muhammad, and M. R. Ali, "A numerical investigation of a photovoltaic thermal system contained a trapezoidal channel with transport of silver and titanium oxide using the water as base fluids," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 47, p. 103056, 2023. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.csite.2023.103056](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103056)
- [4] K. R. Aglawe, R. K. Yadav, and S. B. Thool, "Fabrication, experimentation and numerical simulation of micro channel heat sink for enhancing thermal performance of electronic devices," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, pp. 1–16, 2023. [Online]. Available: doi : [10.1007/s12008-023-01130-4](https://doi.org/10.1007/s12008-023-01130-4)



بهبود عملکرد پنل فتوولتائیک حرارتی با به کارگیری نانو سیال های ترکیبی

محمد مزیدی شرف آبادی^{۱*}، شیرین طالب^۲، نیکو فرجی^۳، سیدمحمدصادق موسوی شاد^۴

۱- دانشیار، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

چکیده

در این مقاله، برای بهبود عملکرد پنل فتوولتائیک حرارتی، از نانو سیال های ترکیبی استفاده شده است. نانو سیال های ترکیبی شامل ترکیبی از نانو ذرات و سیال عامل است که خواص حرارتی و هدایت حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه دارند. در این تحقیق، نانو ذرات مختلفی نظیر اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم با درصد های وزنی مختلف ۰٪ و ۳٪ و ۶٪ درون آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است و تأثیر آن ها بر انتقال حرارت و بهره وری پنل بررسی شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم با درصد وزنی ۳٪ و ۳٪ برای هر نانوذره بازده حرارتی و الکتریکی به ترتیب ۳۲/۹۲ و ۱۴/۶۸ با درصد وزنی ۶٪ برای اکسید آلومینیوم و ۰٪ برای اکسید تیتانیوم بازده حرارتی و الکتریکی ۳۲/۹۵ و ۱۴/۶۸ به دست آمده و تغییر آن چنانی نسبت به حالت بدون نانو سیال نداشته است و لذا با افزایش درصد حجمی یکی از نانو ذرات نیز نتایج تغییر به خصوصی نکرده است و فقط مقدار بسیار اندکی بازده سیستم افزایش یافته است. این تحقیق می تواند به طراحان و مهندسان در توسعه و بهبود سیستم های پنل فتوولتائیک حرارتی کمک کند و در استفاده بهینه از منابع انرژی خورشیدی مؤثر باشد.

کلمات کلیدی

پنل فتوولتائیک حرارتی
انرژی خورشیدی
اکسید تیتانیوم
اکسید آلومینیوم
انتقال حرارت
هدایت حرارتی توده ای
شبیه سازی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

*نویسنده مسئول

محمد مزیدی شرف آبادی

ایمیل

mohammad_477@yahoo.com

۱- مقدمه

سیال ها، به مایع های پیشرفته ای اطلاق می شود که دارای مقداری کمی از نانوذره ها (در اکثر موارد کمتر از ۱۰۰ نانومتر) است که به طور یکنواخت و پایدار در مایع معلق هستند. پراکندگی مقدار کمی از نانوذره های جامد در مایع های معمولی مانند آب میزان انتقال گرما آن ها را به طرز چشمگیری تغییر می دهد. از نانو سیال ها برای افزایش عملکرد گرمایی بسیاری از سامانه های مهندسی استفاده شده است، از نانو سیال ها به عنوان سیال عامل برای انتقال گرما در جمع کننده های خورشیدی استفاده شده است [۱]. ماهیان و همکاران [۲]، با استفاده از نانو سیال حاوی دی اکسید تیتانیوم در آب و ناخالصی های شیشه ای، میزان جذب انرژی خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی

انرژی خورشیدی بزرگ ترین منبع انرژی موجود در دسترس به شمار می رود. محدود بودن سوخت های فسیلی و ملاحظه های زیست محیطی باعث شده که پژوهشگران برای استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک جایگزین مناسب تلاش کنند، چراکه پاک و نامحدود بودن انرژی خورشیدی از جمله عامل هایی هستند که توجه بیشتر کشورها را برای تأمین انرژی به خود جلب نموده است. با استفاده از جمع کننده های خورشیدی، انرژی خورشید را می توان جذب کرد و به انرژی مورد نیاز خود تبدیل کرد، اما مسئله مهم در این فناوری، بالا بردن کارایی و عملکرد گرمایی دستگاه ها برای تولید انرژی بیشتر است. با استفاده از فناوری نانو می توان بازده مورد نظر را تا حدودی افزایش داد. نانو



که این افزایش جذب با افزایش ناچیز هزینه (تنها ۰/۰۴ دلار بر لیتر) همراه است.

در همین راستا، زمزمیان و همکاران [۸] در یک مطالعه تجربی، اثر استفاده از مخلوط اتیلن گلیکول و نانو ذرات مس به عنوان سیال عامل را بر روی بازده جمع کننده‌های خورشیدی صفحه تخت مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت وزنی نانو ذرات مس، بازده جمع کننده خورشیدی افزایش می‌یابد. این مطالعات نشان می‌دهند که نانو سیال‌ها می‌توانند به عنوان راهکاری کارآمد برای بهبود جذب انرژی خورشیدی و در نتیجه افزایش بازده سیستم‌های انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند.

آلخاندرو دل آمو و همکاران [۹] سیستم PV/T نوع هوا را با و بدون پره طراحی کرد و تأثیر دستورالعمل‌های محیطی، ابعادی و عملیاتی را بر عملکرد سیستم تحلیل کرد. نتایج حاکی از افزایش بازده حرارتی و کاهش بازده الکتریکی با کمک پوشش‌های شیشه‌ای بود. پارامترهایی مانند شدت تابش خورشیدی، نرخ جریان جرمی هوا و عمق کانال نقش مهمی در نوع هوای PV/T دارند.

سانی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۱، با انجام تحقیقی نظری، به بررسی پتانسیل استفاده از محلول‌های کربن دار مانند نانولوله‌های کربنی در جمع کننده‌های خورشیدی پرداختند. آن‌ها با استفاده از نانولوله‌های کربنی در اتیلن گلیکول به عنوان سیال عامل، نشان دادند که نانو سیال‌های کربن دار می‌توانند به عنوان ناقل حرارت مناسبی برای انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایی، به ویژه جمع کننده‌های خورشیدی، عمل کنند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که خواص فیزیکی و ساختار نانولوله‌های کربنی با افزایش قدرت انتقال حرارت مرتبط هستند. در نتیجه، این نوع سیالات می‌توانند در مقایسه با سیالات پایه در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در جمع کننده‌ها، نتایج بهتری از نظر بازده، اقتصاد و زیست‌محیطی ارائه دهند.

گوپتا و همکاران [۱۱] بازده گرمایی جمع کننده خورشیدی را با استفاده از نانو سیال آب-اکسید آلومینیم به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها با استفاده از نانوذره اکسید آلومینیم با قطر ۲۰ نانومتر و تهیه نانو سیال با چهار کسر حجمی ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰۵، عملکرد گرمایی جمع کننده خورشیدی را مورد مطالعه قرار داده‌اند که نتیجه‌های به دست آمده نشان‌دهنده افزایش در بازده گرمایی جمع کننده به ترتیب ۱/۶، ۲۲/۲۴، ۳۹/۶ و ۱۱۸/۷۵٪ نسبت به حالتی که تنها از سیال پایه استفاده می‌شود، شد.

پژوهش، یافتن بهترین ترکیب برای افزایش حداکثری جذب انرژی خورشیدی بود. ابتداء، آن‌ها اثر غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم را در نانو سیال بررسی کردند. با تغییر درصد وزنی نانو ذرات در آب (۰/۱)، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴٪، مشاهده شد که جذب انرژی خورشیدی در غلظت ۰/۲٪ وزنی به بالاترین حد خود می‌رسد. در مرحله بعد، برای افزایش بیشتر جذب انرژی، ناخالصی‌های شیشه‌ای با درصد وزنی‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ به نانو سیال حاوی ۰/۲٪ وزنی دی‌اکسید تیتانیوم اضافه شد. نتایج نشان داد که اضافه کردن ۰/۳٪ ناخالصی شیشه به نانو سیال، منجر به بالاترین میزان جذب انرژی خورشیدی می‌شود.

وانگ و همکاران [۳] به محاسبه هدایت حرارتی مؤثر نانو ذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم سوسپانسیون شده درون سیالات پایه‌ای چون آب، اتیلن گلیکول، روغن پمپ خلأ و روغن موتور پرداختند. نتایج آزمایش‌های این گروه نشان داد که حضور نانو ذرات در سیال پایه موجب افزایش هدایت حرارتی می‌شود، البته با افزایش قطر نانو ذرات هدایت حرارتی کاهش می‌یابد؛ زیرا سطح تماس سیال و نانوذره کمتر شده و تعداد برخوردهای کمتر می‌شود.

ژانگ و دنگ و همکاران [۴] مکان‌های فعال فلزی منفرد متصل به اتم‌های N را در صفحه پایه گرافن ترکیب کرد و مجموعه‌ای از کامپوزیت‌های GN₄/MN بر اساس فلزات مختلف (M=Fe, Co, Ni و Cu) ساخت که در آن GN₄/CoN به عنوان یک CE در DSSC ها به دلیل انرژی جذب مناسب و تعادل خوب بین جذب و دفع، ۸/۴۰٪ PCE را به همراه داشت، در حالی که GN₄/FeN تنها یک ۶/۶۰٪ PCE را نسبت به Pt (۷/۹۸٪) ارائه کرد.

الامین سلیمانی و همکاران [۵] برای مطالعه عملکرد حرارتی و الکتریکی سیستم PV/T نوع هوا، چهار پیکربندی مختلف مانند ماژول تک فتوولتائیک، یک-هوا-PV/T معمولی، یک PV/T تک گذر لعاب‌دار و یک PV/T دو گذر نیمه شفاف را بررسی و مقایسه کرد. میانگین روزانه بالاترین بازده کلی ۷۴٪ توسط PV/T دو گذر به دست آمد.

اوشکسرای و همکاران [۶] چهار جمع کننده خورشیدی PV/T دووجهی طراحی کرد و مطالعات تجربی را در شرایط حالت پایدار انجام داد. نتایج نشان داد که جریان موازی مسیر دوم ۶۷-۵۱ درصد بالاترین بازده انرژی کل را نشان داد.

به عنوان مثال، الجوردی و همکاران [۷] با استفاده از مدل‌سازی عددی، نشان دادند که نانو سیال گرافیت با جزء حجمی ۰/۰۰۵٪، بیش از ۵۰٪ تابش ورودی را جذب می‌کند. نکته قابل توجه این است

لیو و همکاران [۱۲] با استفاده از حل عددی و روش تجربی به بررسی تأثیر استفاده از نانو سیال گرافن بر پایه سیال یونی بر عملکرد گرمایی جمع کننده خورشیدی جذب مستقیم در دمای کاری بالا پرداختند. نتیجه‌های آن‌ها حاکی از آن بود که نانو سیال با کسر وزنی ۰/۰۰۵ از گرافن و ارتفاع ۵ سانتیمتر از جمع کننده و تحت تابش، $W/m^2 220000$ بازده گرمایی جمع کننده خورشیدی را تا ۷۰٪ افزایش می‌دهد.

علی یارداش و همکاران [۱۳] عملکرد گرمایی جمع کننده خورشیدی با لوله‌های خلأ (ETSC) را در حضور نانو سیال‌های گوناگون مورد بررسی قرار داده و با استفاده از دینامیک سیالات محاسبه‌ای تأثیر هندسه و مشخصه‌های فنی جمع کننده در عملکرد گرمایی و هیدروپنایمیکی دستگاه بهینه‌سازی نموده است. در این مطالعه از آب و نانو سیال‌های مبتنی بر سیال عامل آب به‌عنوان سیال انتقال گرما در جمع کننده خورشیدی با ۲۴ لوله گرمایی با شیب ۳۰ درجه استفاده شد. در این مطالعه از ترکیب‌های نانولوله‌های چند جداره کربنی SiO_2 ، TiO_2 ، MWCNT و مس به‌عنوان نانوذرها با نسبت‌های گوناگون حجمی در سیال عامل آب استفاده شد.

بلکاسمی و همکاران [۱۹] به‌طور عددی اثرات نانو سیالات را بر عملکرد کلکتور خورشیدی تخت بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که میانگین بهبودهای ۴/۴۴٪، ۲۷/۴٪ و ۴/۲۱٪ در بازده حرارتی را می‌توان به ترتیب با استفاده از نانو سیالات مس/آب، اکسید مس/آب و آلومینا/آب به دست آورد.

فیلیپووی سی و همکاران [۲۰] هر دو مطالعه تجربی و عددی را برای ارزیابی بازده حرارتی کلکتور خورشیدی پلیمری انجام دادند. آن‌ها دریافتند که راندمان حرارتی کلکتور پلیمری ۴۴/۷۷٪ است که در مقایسه با کلکتورهای صفحه تخت ۳۰٪ کمتر است. این راندمان کم با استفاده از صفحه جذب بزرگ قابل جبران است.

در یک مطالعه عددی، هاواش و همکاران [۲۱] از نانو سیال برای بهبود کارایی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که حداکثر بهبود در راندمان ۳۲/۲٪ برای اختلاف دمای پایین در کسر حجمی ۰/۱ درصد است. علاوه بر این، راندمان کلکتور با افزایش کسر حجمی جامد نانو ذرات آلومینا تا رسیدن به ۰/۵ درصد افزایش می‌یابد و افزایش بیشتر در کسر حجمی جامد منجر به کاهش بازده حرارتی می‌شود.

سولمون و همکاران [۲۲] بازده حرارتی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت را به‌طور تجربی با استفاده از نانو ذرات تک جزئی Al_2O_3

و CuO و نانو ذرات ترکیبی Al_2O_3-CuO در آب بررسی کردند. درصد جرمی مورد استفاده در تجزیه و تحلیل به ترتیب ۰/۰۴۸٪، ۰/۰۹۶٪، ۰/۱۴۴٪، ۰/۱۹۲٪ و ۰/۲۴٪ بود. آزمایش‌ها با نرخ جریان ۰/۰۰۸ کیلوگرم بر ثانیه برای نانو ذرات تک جزئی و ترکیبی انجام شد. متیب الغامدی و همکاران [۲۳]، یک بررسی عددی از همرفت اجباری در یک سیستم فتوولتائیک حرارتی (PV/T) را ارائه می‌دهد که هدف آن کاهش دمای ناشی از تابش خورشیدی است، عاملی که می‌تواند تولید انرژی الکتریکی را کاهش دهد. این مطالعه از دو نوع نانوذره، دی‌اکسید تیتانیوم و نقره، در ترکیب با آب به‌عنوان سیال پایه استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ می‌تواند دمای سلول را تا ۵۰٪ کاهش و راندمان سلول را تا ۴/۴٪ افزایش دهد. به‌طور مشابه، تغییر نسبت ابعاد از ۰/۴ به ۱ می‌تواند درصد دمای سلول را به دلیل دمای ورودی تا ۲۶/۲٪ کاهش و راندمان سلول را تا ۱/۶٪ افزایش دهد.

سانگیتا و همکاران [۲۴] آزمایشی برای بررسی تأثیر نانو مایعات با مقادیر متفاوت نانو ذرات ($MWCNT$ ، CuO ، Al_2O_3) در آب بر عملکرد سیستم‌های PVT انجام دادند. غلظت‌های انتخابی آن‌ها شامل ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد حجمی بود. نتایج نشان داد که استفاده از نانو امولسیون‌های تولیدشده باعث بهبود عملکرد سیستم PVT شد، زیرا کارایی سیستم‌ها در مقایسه با زمانی که فقط با آب خنک می‌شدند، افزایش یافت. داده‌ها نشان دادند که MWCNT ها خنک‌کنندگی مؤثرتری برای سیستم‌های PV/T نسبت به ذرات Al_2O_3 و CuO ارائه دادند.

یک مطالعه انجام‌شده توسط کاظم و همکاران [۲۵] کارایی یک سیستم خنک‌کننده PVT را بررسی کرد که در آن نانو مایعاتی متشکل از آب و گلیکول اتیلن به نسبت حجمی ۷۵ و ۲۵٪ به همراه SWCNT ها با نسبت‌های وزنی مختلف ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲٪ ترکیب شده بودند. دانشمندان چندین آزمایش انجام دادند تا خواص ترموفیزیکی یک نانو مایع ایجادشده از افزودن ۰/۵٪ SWCNT ها به سیستم PVT را ارزیابی کنند. نتایج تصاویر دوربین و آزمایش‌های پتانسیل نشان داد که نانو امولسیون دارای هدایت حرارتی بالای ۱۰۳٪ و پایداری قابل توجهی بیش از ۱۰۹ روز بود. به‌عنوان نتیجه این افزودن، توان تولیدشده به میزان ۱۱/۷٪ افزایش یافت و کارایی الکتریکی ۲۵/۲٪ نسبت به یک سیستم PV مجزا بهبود یافت.

یک سیستم فتوولتائیک حرارتی توسط الغامدی [۲۳] با استفاده از یک کانال جریان دوزنقه‌ای آزمایش شد که مس و سیلیکون چند

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی پنل مورد مطالعه

در این مطالعه از یک سیستم پنل فتوولتائیک حرارتی، جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. در جدول ۱، جدول ۲، جدول ۳ و جدول ۴ مشخصات هندسی، گرمایی و الکتریکی، مشخصات ترموفیزیکی لایه‌ها و همچنین ضخامت و ضرایب انتشار و جذب پنل مورد بررسی آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات گرمایی و مکانیکی [۱۴]

مقدار	کمیت	مشخصات
۹۰/۳	دمای رکود (°C)	حرارتی
۱۲	فشار آزمایشی (Bar)	
۴	شار کاری (Bar)	
۸۰	حداکثر دمای عملیاتی (°C)	
۸ x ۰/۵	ضخامت و قطر لوله داخلی (mm)	مکانیکی
۲۲ x ۰/۸	ضخامت و قطر لوله جمع کننده (mm)	
۱/۴۸	سطح جذب (m ²)	مکانیکی
۱/۶۳	سطح کل (m ²)	
۲۲	وزن (kg)	
۴۰ x ۹۹۲ x ۱۶۴۰	ابعاد (mm)	

جدول ۲: مشخصات الکتریکی [۱۴]

مقدار	کمیت	مشخصات
۲۵۰	حداکثر توان (W)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۸/۸۱	جریان اتصال کوتاه (A)	
۳۷/۶۸	ولتاژ مدارباز (V)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۸/۳۳	نرخ جریان (A)	
۳۰/۰۳	نرخ ولتاژ (V)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۱۵/۰۷	بازده مازول (%)	
۱۸۱/۹	حداکثر توان (W)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۶/۹۲	جریان اتصال کوتاه (A)	
۳۵/۱	ولتاژ مدارباز (V)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۰/۴۴	نرخ جریان (A)	
۲۸/۲	نرخ ولتاژ (V)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد

بلور و مخلوطی از نانو مواد اکسید تیتانیوم و نقره در آب را ادغام کرده بود. در این مطالعه، پارامترهای مختلفی از جمله کسر حجمی، عدد رینولدز و نسبت ابعاد بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ دمای سلول را ۵۰٪ کاهش داده و کارایی را افزایش می‌دهد. همچنین پیشنهاد شد که ارتفاع ورودی بیشتر می‌تواند عملکرد سیستم را با اجازه دادن به مایع بیشتر به داخل سیستم بهبود بخشد. این نتایج نوید بهبود کارایی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی را می‌دهند.

تحقیق قابل توجه دیگری توسط اگلوه و همکاران [۲۶] انجام شده است که بر طراحی و شبیه‌سازی یک دستگاه سینک حرارتی میکرو کانال ادغام شده با یک دستگاه تولید حرارت تمرکز داشت. این مطالعه شامل ارزیابی پارامتریک با در نظر گرفتن شار حرارتی، جریان جرمی، دمای ورودی و غلظت نانو مایعات بود. مشخص شد که سینک حرارتی به طور کارآمد دمای دستگاه را کاهش می‌دهد. هنگامی که از کسر حجمی ۰/۳٪ و نرخ جریان ۸ کیلوگرم بر ثانیه استفاده شد، حداکثر نرخ انتقال حرارت به $13.693W/m^2K$ در دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد رسید.

در تحقیقی که توسط یوسفی و همکاران [۲۸] انجام شد، سیستمی با مقاومت خارجی ارزیابی شد که شامل ماده تغییر فاز با فوم‌های مسی بود. این پیکربندی (مورد ۳) انتشار حرارتی سریع‌تری نشان داد که مقاومت حرارتی کلی را کاهش داده و شار حرارتی از طریق ماده تغییر فاز را بهبود می‌بخشد. مورد ۳ به طور مؤثری دمای طرف گرم و سرد را به ترتیب تا ۸٪ و ۷٪ کاهش داد، بدون اینکه ولتاژ خروجی تحت تأثیر قرار گیرد. این راه‌حل برای سیستم‌های خودمختار کاربردی است و بدون نیاز به خنک‌کننده و با ایمنی بهبودیافته در مواجهه با منابع حرارتی پویا امکان‌پذیر است.

در این مطالعه، کارایی یک پنل فتوولتائیک حرارتی، با استفاده از نانو سیال ترکیبی اکسید تیتانیوم/اکسید آلومینیوم بر پایه آب به‌عنوان سیال پایه و تأثیر سایر پارامترهای فرآیندی بر عملکرد حرارتی و الکتریکی پنل فتوولتائیک حرارتی به صورت کمی و عددی بررسی شده است.

هدف اصلی افزایش راندمان الکتریکی و حرارتی است. استفاده از نانو سیال‌های ترکیبی می‌تواند به این امر کمک کند. دمای بالای سلول‌های فتوولتائیک راندمان را کاهش می‌دهد، اما نانو سیال‌های ترکیبی، با خواص انتقال حرارت بهتر، دمای سلول‌ها را کاهش داده و راندمان را بهبود می‌بخشند.

جدول ۳: مشخصات ترموفیزیکی لایه‌های مختلف [۱۴]

لایه	گرمای ویژه (J/Kg.K)	چگالی (Kg/M3)	رسانایی گرمایی (W/m.K)
شیشه	۵۰۰	۳۰۰۰	۱/۸
اتیلن وینیل استات	۲۰۹۰	۹۵۰	۰/۳۱۲
سلول پنل	۷۰۰	۲۳۳۰	۱۴۹
تدلار	۱۲۵۰	۱۲۰۰	۰/۲
صفحه آلومینیوم	۸۸۷	۲۷۰۰	۲۰۶
لوله مسی	۳۸۱	۸۹۷۸	۳۸۷/۷
آب‌خنک کن	۴۱۸۲	۹۹۸/۲	۰/۶

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho 1 + \kappa] + F \quad (2)$$

در اینجا u میدان سرعت و F نیروی حجمی سیستم است که به معادله تکانه فوق افزوده شده است. پارامتر κ تانسور تنش است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\kappa = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \quad (3)$$

که در رابطه فوق μ ویسکوزیته دینامیکی سیستم است.

۳-۳- معادله انرژی

این معادله اضافی، همان معادله انرژی یا قانون اول ترمودینامیک (قانون پایستگی انرژی) است. با در نظر گرفتن یک حجم کنترل و فرض دوبعدی بودن جریان به فرم کلی معادله انرژی به شکل زیر خواهیم رسید:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + Q \quad (4)$$

C_p ظرفیت گرمایی جامد در فشار ثابت ($J/kg.k$) ضریب هدایت حرارتی جامد برحسب ($w/m.k$) است، u میدان سرعتی است که توسط گره مش متحرک تعریف می‌شود.

زمانی که بخش‌هایی از مدل در قاب ماده در حالی که حرکت هستند. همچنین Q نیز شار منبع حرارتی برحسب وات بر مترمربع می‌باشد.

۳-۴- بازده حرارتی

بازدهی حرارتی یک سیستم جمع‌کننده خورشیدی عبارت است از نسبت انرژی حرارتی مفید به تابش خورشیدی به سطح جمع‌کننده که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{GA} = \frac{\int \rho c_p n \cdot u T (d\Omega_{out} - d\Omega_{in})}{GA} \quad (5)$$

در این رابطه A مساحت سطح جاذب جمع‌کننده و G تشعشع خورشیدی است. انرژی حرارتی مفید، حاصل تفاضل انرژی ورودی و خروجی سیال می‌باشد.

۳-۵- بازده الکترونیکی

عملکرد الکتریکی پنل‌های فتوولتائیک موجود در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی توسط بازده الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۴: ضریب جذب و انتشار و ضخامت لایه‌های مختلف [۱۵]

لایه	قابلیت انتقال	قابلیت جذب	قابلیت انتشار	ضخامت
شیشه	۰/۹۱	۰/۰۰۵	۰/۹۴	۳/۲
اتیلن وینیل استات	۰/۹۳	۰/۰۰۵	-	۰/۵
قسمت فتوولتائیک	۰/۰۹	۰/۸	-	۰/۳
سطح رو به پایین	۰/۹۱	۰/۰۰۵	-	۰/۵
آینه	۰/۹۵	۰/۹۵	-	-
باکس	-	-	۰/۳۱	۰/۷
لوله مسی	-	-	-	۲

۳- معادلات حاکم

۳-۱- معادله پیوستگی

قانون پایستگی (بقا) جرم که جزو قوانین پایه‌ای و بنیادی مکانیک سیالات است به دودسته پایستگی جرم و پیوستگی جرم تقسیم‌بندی می‌شود. قابل ذکر است که پایستگی مربوط به سیستم‌های بسته و پیوستگی مربوط به سیستم‌های باز می‌باشد.

معادله پیوستگی سیستم مورد نظر به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۶].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = \sigma \quad (1)$$

که در رابطه فوق چگالی جامد ($\rho(kg/m^3)$) و t زمان است.

۳-۲- معادله بقای مومنتوم

نکته مورد توجه این‌که حالت جریان ضعیف تراکم‌پذیری انتخاب می‌شود چون چگالی ما به دما وابسته است و با دما تغییر می‌کند، معادله‌های آن در ذیل مشخص شده است [۱۷].

اضافه کردن مقدار دمای حجمی سیال در خروجی نیز ضروری است، یعنی $T_{bulk} = \int \vec{u} \cdot \vec{n} T d\Omega / \int \vec{u} \cdot \vec{n} d\Omega$ که مبین دمای تجربی در خروجی است. ($\vec{u} \cdot \vec{n}$ بردار سرعت در بردار نرمال سیال خروجی است) در نتیجه اختلاف دمای سیال برابر است با:

$$DT = T_{bulk} - T_{in} \quad (۱۲)$$

همچنین در رابطه (۱۲) مقادیر $P_0 = 250$ ، $I_0 = 1000$ و $T_0 = 298.15$ می‌باشند. که دمای ورودی سیال است.

۳-۶- بازده کلی

بازده کلی مجموع بازده الکتریکی فتوولتائیک و بازده حرارتی جمع کننده می‌باشد. بازده کلی از قانون اول ترمودینامیک حاصل می‌شود و درصدی از انرژی تبدیل شده از تابش خورشیدی را تعیین می‌کند. رابطه بازده کلی به صورت زیر است:

$$\eta_t = \eta_e + \eta_{th} \quad (۱۳)$$

۳-۷- معادلات و خواص نانو سیال

در این مطالعه از خواص مربوط به نانو ذرات آلومینیوم و تیتانیوم اکسید شده استفاده شده است. خواص نانو سیال مانند چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته و کسر حجمی نانو ذرات از معادلات زیر محاسبه می‌شوند [۲].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_b + \rho_{np}\phi \quad (۱۴)$$

$$(C_p)_{nf} = \frac{(1 - \phi)(C_p\rho)_b + (C_p\rho)_{np}\phi}{\rho_{nf}} \quad (۱۵)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_b} = \frac{2k_b + k_p 2(k_p - k_b)\phi}{-(k_p - k_b)\phi + 2k_b + k_p} \quad (۱۶)$$

$$\mu_{nf} = (1 - \phi)^{-2.5}\mu_b \quad (۱۷)$$

$$L_{npcm} = \frac{(1 - \phi)(\rho L)_{pcm}}{\rho_{npcm}} \quad (۱۸)$$

افزایش بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی ارتباط مستقیم با افزایش میزان تشعشع جذب شده توسط پنل‌های فتوولتائیک و میزان انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری دارد.

بازده الکتریکی سیستم‌های پنل فتوولتائیک نسبت بیشینه توان خروجی محاسبه شده به تابش خورشیدی دریافتی روی سطح فعال سلول‌های خورشیدی است.

$$\eta_e = \frac{VI}{GA} \quad (۶)$$

به طوری که در این رابطه I شدت تابش خورشیدی و A مساحت سطح پنل است. با تغییرات دمای پنل توان خروجی پنل تغییر می‌کند و با افزایش دمای پنل خورشیدی بازده الکتریکی آن کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات بازده سلول خورشیدی با تغییر دمای سلول را می‌توان با رابطه زیر معین کرد.

$$\eta_e = \eta_c [1 - \beta(T_{pv,avg} - 298.15)] \quad (۷)$$

که در آن ضریب دمایی بازده سلول خورشیدی است که به صورت تجربی محاسبه می‌شود و مقدار آن 0.045 گزارش شده است. در کاتالوگ پنل فتوولتائیک حرارتی مقدار $P_{mpp} = -0.37\%K$ می‌باشد؛ در واقع انرژی الکتریکی استفاده شده توسط پنل را به صورت منبع حرارتی از قسمت انتقال حرارت کسر شده است.

$$\eta_e = p_0 - \frac{Q_0}{I_0} [1 - 0.37\%(T_{pv,avg} - 298.15)]/V_{cell} \quad (۸)$$

$$q_e = \eta_e \tau_g \alpha_{pv} G(t) \quad (۹)$$

دمای سطح پنل برابر است با انتگرال دما بر روی حجم کل پنل که در آن منظور از حجم کل سلول حاصل ضرب مساحت مؤثر در ارتفاع سلول فتوولتائیک است.

$$T_{cell} = \int \frac{T}{V_{cell}} dV \quad (۱۰)$$

$$V_{cell} = A_{eff} \times h_{pv} \quad (۱۱)$$

$$k_{Static} = k_f \left[\frac{(k_{np} + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_{np})}{(k_{np} + k_f) + \phi(k_f - k_{np})} \right] \quad (22)$$

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f C_{p,f} \sqrt{\frac{kT}{\rho_{np} D_{np}}} g(\phi, T) \quad (23)$$

که در آن، $k = 1.3807 \times 10^{-23} J/K$ و β کسری از حجم مایعی است که با یک ذره حرکت می‌کند و مربوط به هدایت حرارتی توده‌ای است، مقدار IBI IS IBI را اگر IBI باشد عدد یک و اگر نباشد عدد صفر می‌گذاریم. در اینجا مدل اصلی l لوله حالت نانو ذرات نمی‌باشد بنابراین مقدار ISB را صفر می‌گذاریم. همچنین مقدار g از رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$g = (-6.04\phi + 0.4705)T + 1722.3\phi - 134.63 \quad (24)$$

۳-۱۰- شرایط مرزی

این مسئله برای تعداد لوله‌های مختلف و همچنین دمای متفاوت سیال ورودی حل شده است. در سیستم مدل‌سازی شده، انتقال حرارت حاصل از همرفت، تابش و انتقال حرارت از سطح سلول به آسمان عمیق وجود دارد. دمای ورودی سیال اولیه پنل با دمای محیط یکسان در نظر گرفته می‌شود. همچنین شرایط مرزی بدون لغزش برای مدل‌سازی دیوارها برقرار است. دیوار بدون لغزش دیواری است که در آن سرعت سیال در مقایسه با سرعت دیوار صفر است. شرایط مرزی سرعت و حرارتی به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶: شرایط مرزی سرعت

موقعیت هندسی	معادلات	لایه مرزی
تمام لوله‌های دیواره	$u = 0$	دیواره
ورودی لوله	$Q = - \int_{d\Omega_{in}} u \cdot n \, ds = 0.5 \left(\frac{l}{\min} \right)$	نرخ جریان ثابت
خروجی لوله	$p = 0$	فشار میانگین

که در آن، ϕ کسر حجمی نانو ذرات می‌باشد. همچنین زیروندهای f ، np ، nf به ترتیب به سیال پایه، نانو ذرات و نانو سیال اشاره دارند. در جدول ۵ مشخصات مربوط به نانو ذرات مشخص شده است.

جدول ۵: مشخصات ترموفیزیکی نانو ذرات [۱۸]

نانو ذرات	اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)	اکسید تیتانیوم (TiO_2)
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	۳۹۵۰	۴۱۰۰
گرمای ویژه ($\frac{J}{kg.K}$)	۷۶۵	۶۹۲
هدایت حرارتی ($\frac{W}{m.C}$)	۳۸/۱۲-۵	۸/۴
خلوص	۹۹/۹	۹۹/۹۹
قطر (nm)	۵۵	۲۸
رنگ	سفید	سفید
PH	۶	۵/۶-۵/۵

۳-۸- نرخ جریان حجمی

نرخ جریان کلی به همراه نانو سیال محاسبه شده است و با حالت بدون نانو سیال تفاوتی ندارد، تنها تفاوت آن این است که مقدار V_f در حالت نانو سیال صفر گذاشته می‌شود.

رابطه مربوط به نرخ جریان سیال و نانو ذرات به شرح ذیل می‌باشد:

$$Q_f = (1 - V_f) \times Q_{nf} \quad (19)$$

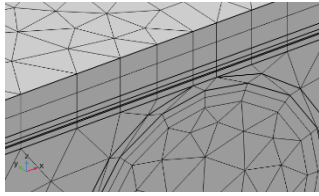
$$Q_p = V_f \times Q_{nf} \quad (20)$$

توجه شود که واحد نرخ جریان حجمی، مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. در اینجا زیروندهای f و np و p به ترتیب مربوط به سیال آب، نانو سیال و نانو ذرات می‌باشد. همچنین مقدار نرخ جریان نانو سیال (Q_{nf})، برای حالتی که فرایند ترموسیفون در نظر گرفته شود برابر 0.5 لیتر بر دقیقه می‌باشد.

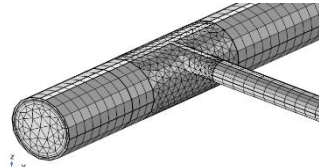
۳-۹- بررسی اثر هدایت حرارتی توده‌ای نانو سیال Brownian

در نانو سیال پارامتر هدایت حرارتی توده‌ای وجود دارد که احتمالاً ضریب انتقال حرارت رسانشی کاتوره‌ای است و به قطر نانو ذرات وابسته می‌باشد.

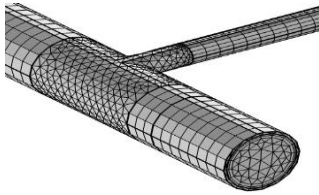
$$k_{nf} = k_{Static} + k_{Brownian} \quad (21)$$



(ب)



(ج)



(د)

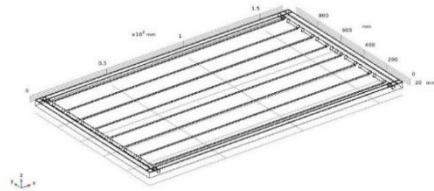
شکل ۲: مش‌بندی هندسه مورد بررسی

جدول ۷: شرایط مرزی حرارتی

موقعیت هندسی	معادلات	لایه‌مرزی
لبه‌های لوله	$-n \cdot q = 0$	عایق‌بندی
ورودی لوله	$-n \cdot q = \rho \Delta H u \cdot n$ $\Delta H = \int_{T_{in}}^T C_p dT$	دما ثابت
همه سطوح جز ورودی و خروجی سیال و سطح شیشه	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = h_s(T_a - T_s)$	جریان حرارتی همرفتی
قاب پانل	$-n_d \cdot q_d = \frac{(T_u - T_d)}{R_s} + \frac{1}{2} d_s Q_s$ $R_s = \frac{d_s}{K}$ $K = \frac{d_s}{\sum \frac{d_{sj}}{k_j}}$	لایه‌نازک
سطح بالای پنل فتوولتائیک به آسمان	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = \epsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4)$	تابش سطح به محیط
سطح بالایی پنل فتوولتائیک	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = \epsilon_g G$	انتقال حرارت تشعشی

۴- مدل‌سازی هندسی

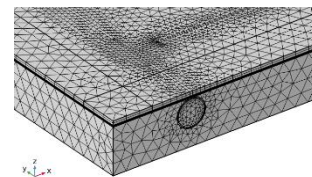
آرایش لوله‌های مدل‌سازی شده درون نرم‌افزار در شکل ۱ آورده شده است. لوله‌های جمع‌کننده برای حالتی که تعداد لوله‌ها ۸ عدد است را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک هندسه ۸ لوله‌ای

۴-۱- شبکه‌بندی

در این بخش تصاویر مربوط به شبکه‌بندی یک پنل فتوولتائیک حرارتی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است مش‌بندی در قسمت‌های انتهایی لوله و محل اتصال لوله‌ها ریزتر از سایر قسمت‌ها می‌باشد.



(الف)

۵- نتایج و بحث

۵-۱- استقلال از شبکه

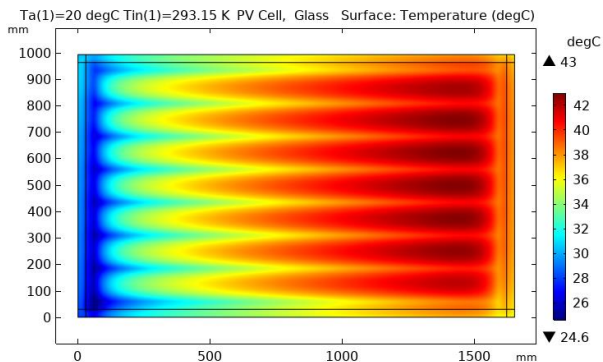
در این بخش به بررسی قابلیت استقلال از شبکه پرداخته می‌شود. استقلال نتایج حل از شبکه نیز ویژگی جدایی‌ناپذیر هر روش عددی است. در این بخش، شبکه‌بندی‌های مناسب و بهینه برای حالت‌های مختلف انتخاب می‌گردد. استقلال از شبکه سهم مهمی در صحت نتایج و همچنین صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های محاسباتی ایفا می‌کند. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، ابتدا دو میلیون و چهارصد هزار المان، سپس سه میلیون و ششصد هزار المان و در نهایت پنج میلیون و پانصد هزار المان حل شده است. هر سه المان مشخص شده مربوطه به بازده الکتریکی بازده حرارتی و بازده کلی می‌باشند. مشاهده می‌شود درصد تغییرات هریک از المان‌ها برای تمامی بازده‌ها به یکدیگر نزدیک می‌باشد؛ برای مثال در بازده کلی برای هر سه المان مقدار بازده ۵۳/۱۲٪، ۵۳/۱۲٪ و ۵۳/۰۲٪ است که عملاً اختلاف‌ناچیز می‌باشد و در نتیجه استقلال از مش نیز برقرار شده است. در اینجا بامش سه میلیون و ششصد پیش رفتیم و مش منتخب مسئله ما است.

جدول ۸: درصد تغییرات بازده حرارتی برای تعداد المان‌های مختلف

عناصر	بازده الکتریکی (%)	بازده حرارتی (%)	بازده کل (%)
۲۴۳۱۳۵۰	۱۵/۱۱۵	۳۸/۰۴۱	۵۳/۱۵۶
۳۶۵۵۵۵۶	۱۵/۱۱۴	۳۸/۰۰۷	۵۳/۱۲۱
۵۵۱۲۸۳۴	۱۵/۱۰۹	۳۷/۹۱۱	۵۳/۰۲۱

۵-۲- صحنه‌گذاری

تابش دریافت شده طی یک فرایند انتقال حرارت به لوله‌های موجود در زیر سطح سلول منتقل شده و باعث افزایش دمای سیال جاری در بین لوله‌ها می‌شود؛ بنابراین در نتیجه‌ی این انتقال حرارت دمای سطح سلول نسبت به دمای سیال گرم شده به تدریج کمتر می‌شود. باید توجه شود که دمای محیط اطراف ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳: کانتور دمای سطح شیشه با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

۶-۲- کانتور دمای دوبعدی در میانه لوله‌های جمع‌کننده

۶-۲-۱- کانتور دمای دوبعدی در میانه لوله‌ها و دمای محیط ۲۰

درجه سانتی‌گراد

برای لوله‌های درون سلول فتوولتائیک حرارتی در شکل زیر به‌وضوح در شکل ۴ مشاهده می‌شود که دمای قسمت‌های کناری سطح پنل همان‌جایی که سیال عامل وارد می‌شود سردتر از قسمت‌های دیگر است. دلیل این امر این است که دمای آب ورودی تا حد امکان پایین است. سپس دمای سطح سلول با دریافت تابش خورشید در طول مراحل به تدریج افزایش می‌یابد و این حرارت را به لوله‌های موجود در زیر سطح پنل منتقل کرده و باعث جریان یافتن سیال در لوله‌های جمع‌کننده و در نتیجه بالا رفتن دمای سیال ورودی طی این گردش می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای آب ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد است که پس از دریافت حرارت و گردش بین لوله‌ها مقدار دمای آن به بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که نسبت به سطح پنل در شکل ۳ به دلیل جذب حرارت از سطح روی پنل زودتر گرم‌تر می‌شود.

در حالت نومی‌نال توان ۸۰۰ وات را که از کاتالوگ فتوولتائیک حرارتی استخراج شده، در نظر گرفته می‌شود. دمای ورودی آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت باد ۱ متر بر ثانیه می‌باشد. مطابق با جدول ۹ مقدار توان الکتریکی در واقع همان بازده الکتریکی در کاتالوگ مربوطه ۱۵/۰۷٪ می‌باشد اما مقدار بازده الکتریکی به دست آمده از طریق نرم‌افزار ۱۵/۱٪ است؛ بنابراین به دلیل اختلاف ناچیز بین دو مقدار اصلی کاتالوگ و مقدار به دست آمده از نرم‌افزار می‌توان گفت که اعتبارسنجی آن قابل قبول است. همچنین برای بازده نیز این صحت اعتبارسنجی برقرار شده است، چراکه مقدار بازده اصلی در کاتالوگ ۵۶٪ است که این مقدار در نرم‌افزار ۵۳/۱٪ به دست آمده و اختلاف در این بازدهی کلی ناچیز و قابل قبول است.

جدول ۹: مقایسه درصد تغییرات بازدهی به دست آمده در کاتالوگ و نرم‌افزار [۱۸]

مقادیر	بازده الکتریکی (%)	بازده حرارتی (%)	بازده کل (%)
کاتالوگ	۱۵/۱۱۵	۳۸/۰۴۱	۵۶
نرم‌افزار	۱۵/۱۱۴	۳۸/۰۰۷	۵۳/۱۲۱

۶- بررسی اثر هندسه راه‌گاه‌های آب

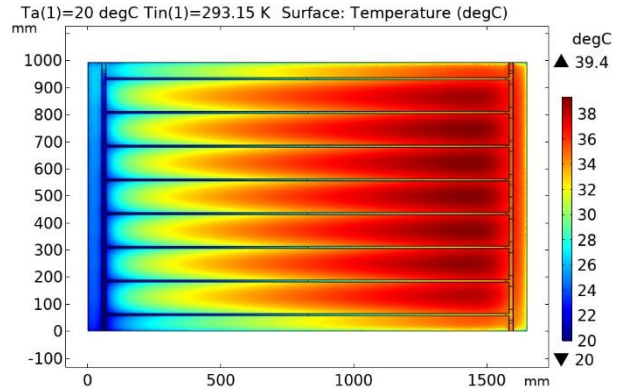
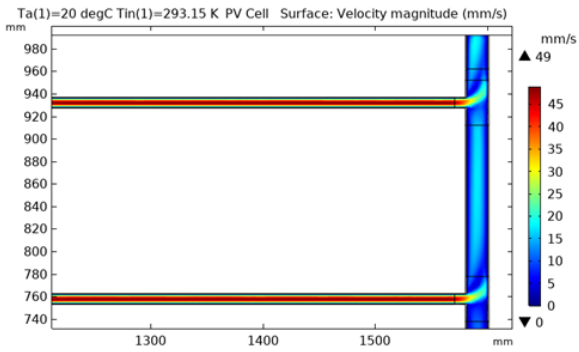
مدل اصلی ۸ لوله هست که تفاوت آن با مدل نومی‌نال این است که شار ورودی در مدل اصلی ۱۰۰۰ وات می‌باشد. این‌ها همگی طوری انتخاب شده‌اند که وزن مس به کاررفته در لوله‌های مسی یکسان باشد. برای قسمت بررسی پارامتریک دمای محیط ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ورودی آب، Ta، Ta+10 و بار دیگر Ta+20 در نظر گرفته می‌شود.

۶-۱- کانتور دمای دوبعدی در سطح شیشه پنل

۶-۱-۱- بررسی اثر تغییر دمای ورودی آب بر کانتور دمای دوبعدی

در سطح شیشه

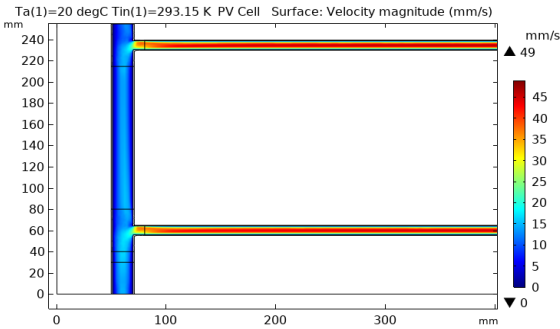
این بخش کانتور دما ثابت در حالت دوبعدی را نشان می‌دهد. مشخص است که سیال به‌واسطه مکانیزم انتقال حرارت هدایتی یا رسانش در طول محفظه به دلیل اختلاف گرادیان دما تبادل حرارت می‌کند. برای سلول فتوولتائیک حرارتی شکل ۳ به‌وضوح مشاهده می‌شود که دمای سطح سلول در ورودی آب سردتر از دمای سطح در خروجی آب است. دلیل این امر این است که دمای آب ورودی تا حد امکان پایین و خنک است. سپس دمای سطح سلول در طول مراحل به تدریج با دریافت تابش نور خورشید از طریق سطح جاذب خود افزایش می‌یابد. در نهایت



شکل ۴: کانتور دما در میانه لوله‌ها با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

۶-۳- کانتور سرعت دوبعدی در میانه لوله‌های جمع‌کننده

۶-۳-۱- کانتور سرعت دوبعدی در میانه لوله‌ها در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۵: کانتور سرعت در میانه لوله‌ها با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

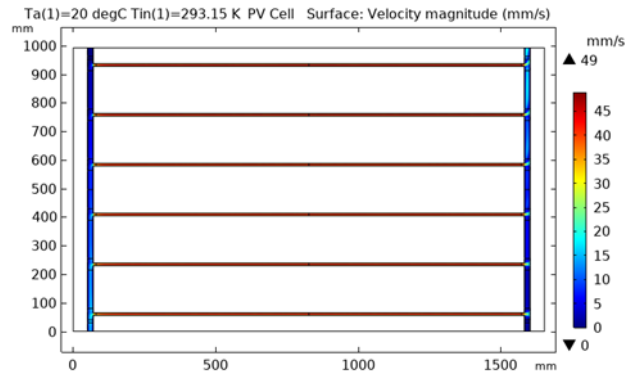
برای لوله‌های درون سلول فتوولتائیک حرارتی در شکل زیر به‌وضوح مشاهده می‌شود که سرعت در قسمت‌های کناری سطح پنل همان جایی که سیال عامل وارد می‌شود کمتر از قسمت‌های دیگر است. سپس سرعت سیال جاری بین لوله‌ها با در طول گردش با گرم شدن دمای آن به تدریج افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود سرعت در قسمت ورودی یا لوله‌ی اصلی ورودی در سمت چپ، کمتر است و دلیل آن این است که قطر لوله در آن قسمت بیشتر است. در لوله‌های میانی سرعت بیشتر به دلیل کوچک‌تر بودن قطر لوله، سرعت بیشتر است. در نهایت در حین گرمایش به دلیل کاهش لایه‌مرزی سرعت حتی ممکن است در حین مسیر گرمایش در لوله‌ی میانی، سرعت اندکی کاهش یابد که البته این مورد الزامی نیست و به موارد دیگر نیز وابسته است.

۶-۴- جمع‌بندی بررسی اثر دمای محیط و دمای ورودی آب بر نتایج عددی

در این بخش جدول ۱۰ برحسب شرایط دمایی متفاوت تنظیم شده است. در این نتایج عددی مقدار بازدهی حرارتی سیستم و همچنین دما و فشار ورودی سیال نیز مشاهده می‌گردد. از بررسی نتایج جداول ذیل مشاهده می‌شود که با بالا رفتن دمای محیط و در نتیجه آن گرم‌تر شدن سطح جاذب جمع‌کننده، مقدار بازده سیستم کاهش می‌یابد. همچنین این روند بر فشار ورودی سیال نیز تأثیر می‌گذارد چراکه هرچه دمای محیط گرم‌تر باشد، مقدار فشار ورودی نیز کمتر می‌شود.

جدول ۱۰: نتایج عددی به‌دست‌آمده سیستم فتوولتائیک حرارتی برای مدل اصلی ۸ لوله‌ای

اختلاف		دمای محیط	دمای ورودی آب	بازده حرارتی الکتریکی کل	بازده بازده سطح	دمای بازده	بازده دمای	فشار جرم	دمای ورودی مس
خروجی		(kg)	سیال	ورودی و	ورودی مس	بازده	بازده	بازده	بازده
۲۰	۲۲/۶۴۱	۱۴/۶۷۶	۴۷/۳۱۸	۲۵/۵۶۸	۱۵/۳۶۸	۲۶/۸۳	۲۰	۲۲/۳۷	۲۰
۳۰	۲۳/۶۳۹	۱۴/۳۴۹	۲۷/۹۸۸	۴۱/۳۶۵	۱۱/۱۶۴	۲۳/۳۷	۳۰	۲/۲۳۰۶	۲۰
۴۰	۱۴/۵۵۹	۱۴/۰۲۳	۲۸/۵۸۲	۴۷/۱۲۷	۶/۹۰۰۷	۲۰/۷۱۹	۴۰	۲۲/۳۳	۳۰
۳۰	۳۲/۴۳۷	۱۴/۱۱۹	۴۶/۵۵۶	۴۵/۴۳	۱۵/۳۱۸	۲۲/۳۳	۳۰	۱۹/۸۹۸	۳۰
۴۰	۲۳/۲۲۴	۱۳/۷۹۶	۳۷/۰۲	۵۱/۱۴۵	۱۱/۰۰۵	۱۹/۸۹۸	۴۰	۱۷/۹۶۴	۴۰
۵۰	۱۳/۹۳۱	۱۳/۴۷۵	۲۷/۴۰۶	۵۶/۸۲	۶/۶۲۷۷	۱۷/۹۶۴	۵۰		



۵-۶- بررسی اثر دمای محیط و دمای ورودی آب بر نتایج

عددی حاصل از افزودن نانو سیال

در این بخش جدول ۱۱ برحسب شرایط دمایی متفاوت با افزودن نانو سیال تنظیم شده است. از بررسی نتایج عددی زیر مشاهده می‌شود که با بالا رفتن دمای محیط و در نتیجه آن گرم‌تر شدن سطح جاذب جمع کننده، مقدار بازده حرارتی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین این روند بر فشار ورودی سیال نیز تأثیر می‌گذارد چراکه هرچه دمای محیط

گرم‌تر باشد، مقدار فشار ورودی نیز کمتر می‌شود. همچنین بررسی تأثیر مقدار درصد حجمی نانو ذرات در تحلیل نتایج سیستم موردنظر حائز اهمیت است.

از بررسی جدول ۱۱ مشاهده می‌شود که افزودن نانو ذرات تغییر آن‌چنانی نسبت به حالت بدون نانو سیال نداشته است و لذا با افزایش درصد حجمی یکی از نانو ذرات نیز نتایج تغییر به‌خصوص نکرده است و فقط مقدار بسیار اندکی بازده سیستم افزایش یافته است.

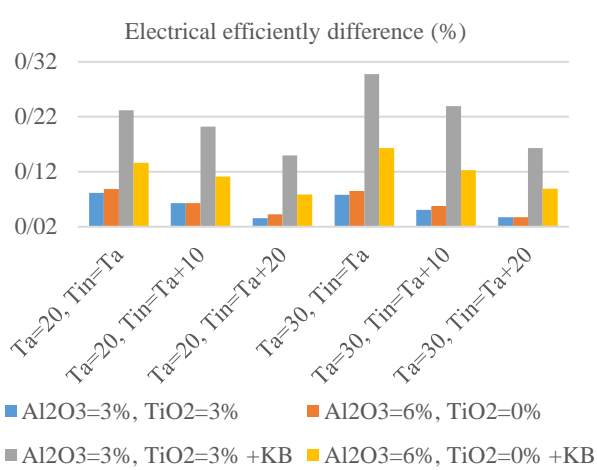
جدول ۱۱: نتایج عددی به‌دست‌آمده پنل فتوولتائیک حرارتی با افزودن نانو سیال

فشار ورودی سیال	اختلاف دمای		درصد حجمی نانو ذره				دمای محیط	دمای ورودی آب
	بالک ورودی و خروجی	دمای سلول	بازده کل	بازده حرارتی	بازده الکتریکی	TiO ₂			AL_{2}O_{3}
۲۶/۸۳	۱۵/۳۶۸	۳۵/۵۶۸	۴۷/۳۱۸	۳۲/۶۴۱	۱۴/۶۷۶	۰	۰	
۳۱/۳۱۶	۱۵/۷۹۵	۳۵/۳۵۷	۴۷/۶۱۵	۳۲/۹۲۶	۱۴/۶۸۸	۳	۳	۲۰
۳۱/۳۱۳	۱۵/۷۸۹	۳۵/۳۴۲	۴۷/۶۴۷	۳۲/۹۵۸	۱۴/۶۸۹	۰	۶	
۲۳/۳۷۷	۱۱/۱۹	۴۱/۳۷۹	۳۸/۰۴۳	۲۳/۶۹۵	۱۴/۳۴۸	۰	۰	
۲۷/۲۸۶	۱۱/۴۹۹	۴۱/۲۲۷	۳۸/۲۶	۲۳/۹۰۳	۱۴/۳۵۷	۳	۳	۳۰
۲۷/۲۸۱	۱۱/۴۹۵	۴۱/۲۱۶	۳۸/۲۸۵	۲۳/۹۲۸	۱۴/۳۵۷	۰	۶	
۲۰/۷۲۶	۶/۹۳۹۴	۴۷/۱۴۸	۲۸/۶۶۳	۱۴/۶۴۱	۱۴/۰۲۲	۰	۰	
۲۴/۱۹۵	۷/۱۳۰۳	۴۷/۰۵۴	۲۸/۸۰۱	۱۴/۷۷۳	۱۴/۰۲۷	۳	۳	۴۰
۲۴/۱۸۸	۷/۱۲۸۷	۴۷/۰۴۷	۲۸/۸۱۸	۱۴/۷۹	۱۴/۰۲۸	۰	۶	
۲۲/۳۳	۱۵/۳۱۸	۴۵/۴۳	۴۶/۵۵۶	۳۲/۴۳۷	۱۴/۱۱۹	۰	۰	
۲۶/۰۶	۱۵/۷۴۲	۴۵/۲۳	۴۶/۸۴۵	۳۲/۷۱۵	۱۴/۱۳	۳	۳	۳۰
۲۶/۰۵۵	۱۵/۷۳۵	۴۵/۲۱۵	۴۶/۸۷۷	۳۲/۷۴۶	۱۴/۱۳۱	۰	۶	
۱۹/۹۰۴	۱۱/۰۲۵	۵۱/۱۵۵	۳۷/۰۶۱	۲۳/۲۶۵	۱۳/۷۹۶	۰	۰	
۲۳/۲۳۲	۱۱/۳۳۴	۵۱/۰۱۷	۳۷/۲۸۴	۲۳/۴۸۱	۱۳/۸۰۳	۳	۳	۴۰
۲۳/۲۲۵	۱۱/۳۳	۵۱/۰۰۶	۳۷/۳۰۹	۲۳/۵۰۵	۱۳/۸۰۴	۰	۶	
۱۷/۹۷	۶/۶۷۰۷	۵۶/۸۴۶	۲۷/۴۹۵	۱۴/۰۲۱	۱۳/۴۷۴	۰	۰	
۲۰/۹۸۱	۶/۸۵۳۳	۵۶/۷۵۹	۲۷/۶۲۷	۱۴/۱۴۸	۱۳/۴۷۹	۳	۳	۵۰
۲۰/۹۷۳	۶/۸۴۵۸	۵۶/۷۴۹	۲۷/۶۳۲	۱۴/۱۵۲	۱۳/۴۷۹	۰	۶	

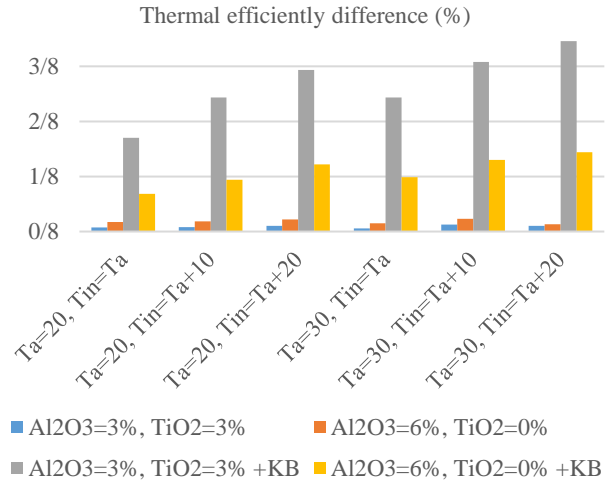
حالتی که درصد حجمی یکی از نانو سیال نادیده فرض شود و حالت ترکیبی نباشد مقدار بازده بالاتری را مشاهده کرده. از این نکته می‌توان نتیجه گرفت که نانو سیال ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به حالت تک نانو ذرات را دارد.

۶-۶- بررسی اثر هدایت حرارتی توده‌ای (Brownian)

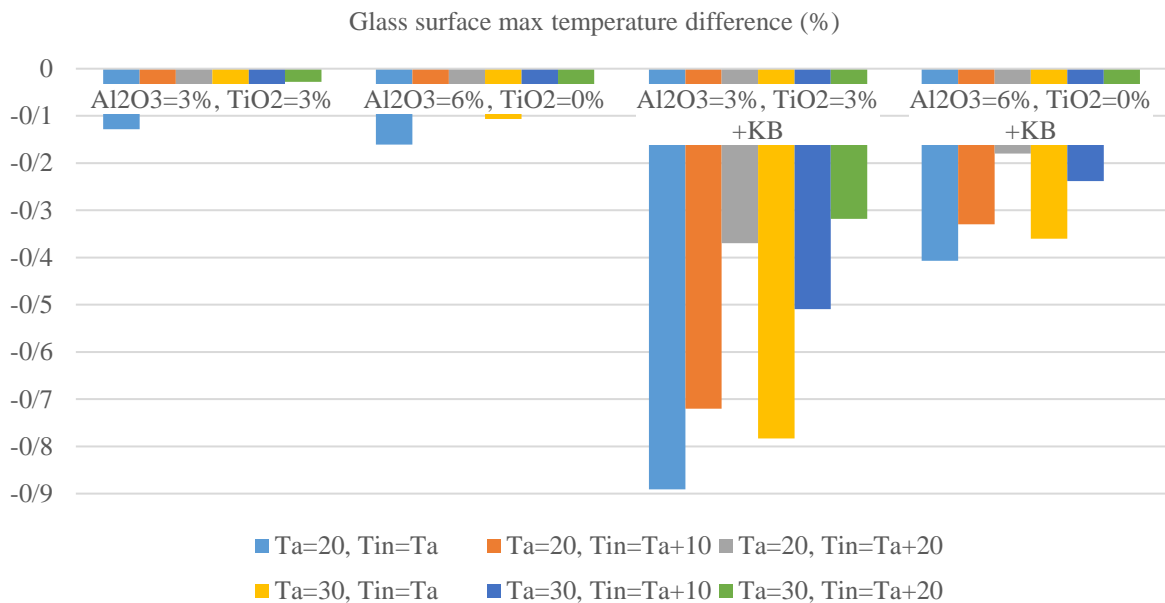
اثر رسوب‌گذاری تنها برای حالتی که نانو ذرات به درون سیال افزوده می‌شود بررسی می‌گردد. پارامتر مرتبط با این پدیده هدایت حرارتی توده‌ای می‌باشد که در معادلات مشخص شده در بخش ۳ ظاهر می‌گردد. در شکل ۶ و شکل ۷ تغییرات بازده حرارتی رسم شده است و مشاهده می‌شود هنگامی که هدایت حرارتی توده‌ای در نظر گرفته شود، بازده بالاتر و در نتیجه مدل دقیق‌تری است. همچنین توجه به این نکته ضروری است که درحالی که مقدار درصد حجمی نانو سیال یکسان در نظر گرفته شود که به اصطلاح به آن ترکیبی گفته می‌شود، نسبت به



شکل ۷: تغییرات بازده حرارتی نسبت به مدل اصلی ۸ لوله



شکل ۶: تغییرات بازده حرارتی نسبت به مدل اصلی ۸ لوله



شکل ۸: تغییرات دمای سطح پوشش شیشه‌ای پنل نسبت به مدل اصلی ۸ لوله

۶-۷- تغییرات دمای سطح پوشش شیشه‌ای

در شکل ۸ حداکثر دمای سطح پوشش شیشه‌ای جمع کننده را نسبت به تغییرات دمای محیط و سیال ورودی و همچنین مقدار درصد حجمی نانو سیال‌های مختلف مقایسه شده است. از بررسی نمودارهای حاصل مشاهده می‌شود که استفاده از نانو سیال ۰/۹٪ از حداکثر دمای شیشه را کاهش می‌دهد

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد حرارتی یک پنل فتوولتائیک حرارتی با استفاده از ترکیب نانو ذرات اکسید تیتانیوم با اکسید آلومینیوم

درصد‌های وزنی مختلف ۰٪ و ۳٪ و ۶٪ در سیال پایه آب به‌عنوان سیال عامل قرار گرفته است. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که افزودن نانو سیال در حالت ترکیبی نسبت به حالت تک نانو سیال و حتی با افزایش درصد حجمی نانو سیال موردنظر نیز به بالاترین بازده می‌رسد. از بررسی نتایج عددی مشاهده می‌شود که در دمای محیط ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد بازده حرارتی و الکتریکی به ترتیب (۳۲/۴۳۷ و ۱۴/۶۷۴ و ۱۴/۱۱۹) است، با بالا رفتن دمای محیط و در نتیجه آن گرم‌تر شدن سطح جاذب جمع کننده، مقدار بازده حرارتی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین این روند بر فشار ورودی سیال نیز تأثیر می‌گذارد چراکه در دمای محیط ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد،

photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells," *Renew. Energy*, vol. 102, pp. 279–293, 2017. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.renene.2016.10.038](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.038)

[7] S. Ladjevardi *et al.*, "Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption," *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 327–334, 2013. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.solener.2013.05.021](https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.021)

[8] A. Zamzamian *et al.*, "An experimental study on the effect of Cu-synthesized/EG nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 658–664, 2014. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.renene.2014.06.003](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.003)

[9] A. del Amo, A. Martínez-Gracia, A. A. Bayod-Rújula, and J. Antoñanzas, "An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring," *Appl. Energy*, vol. 186, pp. 140–151, 2017. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.apenergy.2016.03.060](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.060)

[10] E. Sani *et al.*, "Potential of carbon nanohorn-based suspensions for solar thermal collectors," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 11, pp. 2994–3000, 2011. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.solmat.2011.06.025](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.06.025)

[11] H. K. Gupta, G. D. Agrawal, and J. Mathur, "An experimental investigation of a low temperature Al₂O₃-H₂O nanofluid based direct absorption solar collector," *Sol. Energy*, vol. 118, pp. 390–396, 2015. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.solener.2015.05.040](https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.040)

[12] J. Liu *et al.*, "A combined numerical and experimental study on graphene/ionic liquid nanofluid based direct absorption solar collector," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 136, pp. 177–186, 2015. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.solmat.2014.12.027](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.12.027)

مقدار فشار ورودی به ترتیب (۲۶/۸۳ و ۲۲/۳۳) می‌شود. همچنین بررسی تأثیر مقدار درصد حجمی نانو ذرات در تحلیل نتایج سیستم موردنظر در شرایط ایده‌آل نشان می‌دهد که در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد با درصد وزنی ۳٪ برای نانو ذرات اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم بازده حرارتی و الکتریکی به ترتیب (۳۲/۹۲۶ و ۱۴/۶۸۸) فشار ورودی سیال ۲۹/۸۰۹ است.

۸- منابع

[1] M. J. Muhammad *et al.*, "Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: A review," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 6–15, 2016. [Online]. Available: doi :

[10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.005)

[2] O. Mahian *et al.*, "A review of the applications of nanofluids in solar energy," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 57, no. 2, pp. 582–594, 2013. [Online]. Available: doi :

[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.037](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.037)

[3] X. Wang, X. Xu, and S. U. S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 13, no. 4, pp. 474–480, 1999. [Online]. Available: doi : [10.2514/2.6486](https://doi.org/10.2514/2.6486)

[4] X. Cui *et al.*, "A graphene composite material with single cobalt active sites: A highly efficient counter electrode for dye-sensitized solar cells," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 55, no. 23, pp. 6708–6712, 2016. [Online]. Available: doi : [10.1002/anie.201601464](https://doi.org/10.1002/anie.201601464)

[5] M. E. A. Slimani *et al.*, "A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 133, pp. 458–476, 2017. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.enconman.2016.10.062](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.062)

[6] P. Ooshaksaraei, K. Sopian, S. H. Zaidi, and R. Zulkifli, "Performance of four air-based

- evaluation of thermal performances of a polymer solar collector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 127–139, 2019. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.rser.2019.05.054](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.054)
- [21] A. A. Hawwash, A. K. Abdel Rahman, S. A. Nada, and S. Ookawara, "Numerical Investigation and Experimental Verification of Performance Enhancement of Flat Plate Solar Collector Using Nanofluids," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 363–374, 2018. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.applthermaleng.2017.11.118](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.118)
- [22] S. Mesfin, V. V. Rao, and L. S. Sundar, "Analysis of thermal efficiency of solar flat plate collector working with hybrid nanofluids: An experimental study," *Materials Research Proceedings*, vol. 43, 2024.
- [23] M. Alghamdi, A. A. Memon, T. Muhammad, and M. R. Ali, "A numerical investigation of a photovoltaic thermal system contained a trapezoidal channel with transport of silver and titanium oxide using the water as base fluids," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 47, p. 103056, 2023. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.csite.2023.103056](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103056)
- [24] M. Sangeetha, S. Manigandan, M. T. Chaichan, and V. Kumar, "Progress of MWCNT, Al₂O₃, and CuO with water in enhancing the photovoltaic thermal system," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, pp. 821–832, 2020. [Online]. Available: doi :[10.1002/er.4936](https://doi.org/10.1002/er.4936)
- [25] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. Al-Waeli, and K. Sopian, "Investigation of a nanofluid-based photovoltaic thermal system using single-wall carbon nanotubes: An experimental study," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, pp. 10285–10303, 2021. [Online]. Available: doi :[10.1002/er.6522](https://doi.org/10.1002/er.6522)
- [26] K. R. Aglawe, R. K. Yadav, and S. B. Thool, "Fabrication, experimentation and numerical simulation of micro channel heat sink for enhancing
- [13] A. Yurddaş, "Optimization and thermal performance of evacuated tube solar collector with various nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 152, p. 119496, 2020. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119496](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119496)
- [14] E. Jahanshahi, A. Hosseinkhani, and S. M. H. Moahmmadi, "Manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 12, pp. 239–248, 2017. (in Persian)
- [15] Y. Zhang *et al.*, "Application of solar energy in water treatment processes: A review," *Desalination*, vol. 428, pp. 116–145, 2018. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.desal.2017.11.021](https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.021)
- [16] Z. Shojaeian and S. M. Kashefipour, "Numerical modeling of hydraulic jump in stilling basin of Nemrood reservoir dam," *Water and Soil Science*, vol. 23, no. 2, pp. 283–295, 2013. (in Persian)
- [17] A. Alipoor and P. Abbaspour, "Thermal Performance Analysis of a Swiss-roll Micro Combustion Chamber for Micro Thermophotovoltaic Applications," *Fuel and Combustion*, vol. 17, no. 1, pp. 51–71, 2024. (in Persian)
- [18] K. Sampathkumar and P. Senthilkumar, "Utilization of solar water heater in a single basin solar still—an experimental study," *Desalination*, vol. 297, pp. 8–19, 2012. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.desal.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.04.002)
- [19] Y. Belkassmi, K. Gueraoui, L. El Maimouni, N. Hassanain, and O. Tata, "Numerical investigation and optimization of a flat plate solar collector operating with Cu/CuO/Al₂O₃-water nanofluids," *Transactions of Tianjin University*, vol. 27, pp. 64–76, 2021. [Online]. Available: doi :[10.1007/s12209-021-00251-5](https://doi.org/10.1007/s12209-021-00251-5)
- [20] P. Filipovic, D. Dovic, B. Ranilovic, and I. Horvat, "Numerical and experimental approach for

[27] E. Yousefi, A. A. Nejad, and N. A. Sayyar, "A new approach for simultaneous thermal management of hot and cold sides of thermoelectric modules," *Applied Thermal Engineering*, vol. 233, p. 121156, 2023. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.applthermaleng.2023.121156](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121156)

thermal performance of electronic devices," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, pp. 1–16, 2023. [Online]. Available: doi :[10.1007/s12008-023-01130-4](https://doi.org/10.1007/s12008-023-01130-4)



Experimental Analysis of the Impact of Fuel Pressure and Filter Clogging on the Spray Rate of Automotive Fuel Injectors

Bahman Rahmatinejad^{*1}, Hossein Rahimi Asiabarak², Farzin Azimpour Shishevan¹

1. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

2. Instructor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

Abstract

This research was conducted with the aim of empirically analyzing the impact of fuel pressure and filter clogging on the injection rate of injectors. To this end, a laboratory injector testing device was designed and constructed. This device is capable of performing leakage tests and examining the shape and quantity of injector spray. The experiments were conducted at six pressures: 20, 30, 60, 80, 90, and 100 pounds per square inch. The results showed that, in general, the average spray rate of the injectors increases with an increase in pressure; for instance, raising the pressure from 20 to 30 pounds per square inch over a period of 30 seconds resulted in a 12% increase in fuel spray volume. Additionally, it was found that as the system voltage increases, the fuel spray volume also increases. For example, within a period of 10 seconds, the system at a voltage of 10 volts sprays 7 millimeters more fuel compared to the 6-volt setting. Finally, it was established that, depending on the percentage of filter clogging, the system pressure will be between 4.5 to 6.5 bar.

Keywords

Filter blockage
injector troubleshooting
experimental analysis
Pressure changes
fuel consumption

Received: 11.28.2024

Revised: 02.07.2025

Accepted: 05.09.2025

*Corresponding Author

Bahman Rahmati Nejad

Email

brahmati@nus.ac.ir

1- Introduction

This research was conducted with the aim of empirically analyzing the effect of fuel pressure and filter clogging on the injection rate of injectors. For this purpose, an injector testing device was designed and constructed in a laboratory setting. This device is capable of conducting leakage tests, examining the shape and quantity of injector spray. The experiments were performed at six pressures: 20, 30, 60, 80, 90, and 100 pounds per square inch. The results indicated that, in general, the average spray of the injectors increases with an increase in pressure. For example, over 30 seconds, the spray amount increases by 12 percent when the pressure rises from 20 to 30 pounds per square inch. It was also

found that the higher the system voltage, the greater the spray amount. For instance, when the system voltage is 10 volts, compared to a situation where the system voltage is 6 volts, 7 millimeters more fuel is sprayed over a period of 10 seconds. Finally, it was determined that, depending on the percentage of filter clogging, the system pressure would range between 4.5 to 6.5 bars.

2- Research Methods

To investigate the effect of fuel pressure and fuel filter clogging on the spray rate in injectors, an injector cleaning device was designed and manufactured. The components of the manufactured device are shown in Figure 1 in the



following order: 1- fuel rail, 2- injectors, 3- glass fuel measuring cylinders, 4- Digital timer, 5- Five-pin relay, 6- pressure gauge, 7- fuel hose entering the fuel rail, 8- fuel drain valves of the glass cylinders, 9- Arduino board, 10- Adjustable voltage AC to DC adapter.

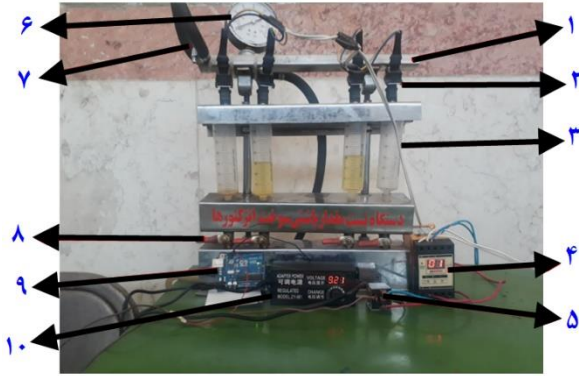


Figure 1: Overall view of the injector cleaning device components

This device operates with a 220-volt power supply and has a working pressure of zero to 16 bar. A Civil pressure gauge was used for pressure measurement. This gauge is used for industrial applications and has high accuracy. The power supply for the fuel pump and injectors is 12 volts. This device can be used to investigate and observe injector leakage; test the injection angle and itemization method of the injectors; test the uniformity of fuel spray from the injectors; perform chemical cleaning and completely remove internal deposits from blocked injectors; and observe and compare the fuel spray volume of injectors relative to each other. To switch the injectors on and off and prevent them from being

constantly open, the circuit shown in Figure 2 was designed and built. In this circuit, the test time is determined with the help of a digital timer (10, 20, 30, and 40 seconds), and the on and off time of the injectors is specified by programming on the Arduino board. Pins 85 and 86 in the 5-pin relay are related to the magnetic relay, and the Arduino board can switch the injectors' power on and off by switching the current of this relay on and off.

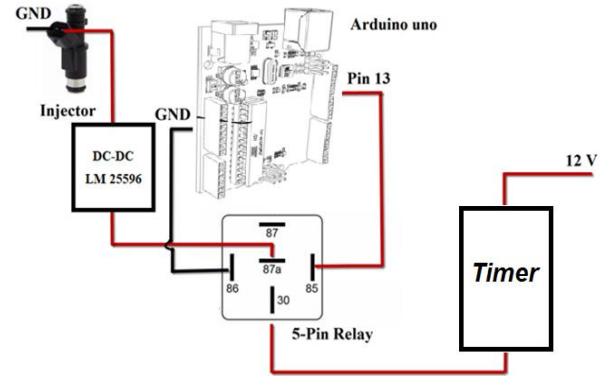


Figure 2: Injector power on/off mechanism

3- Discussion and Results

Investigation of the Effect of Increasing Pressure on Spray Quantity

Experiments were conducted at six pressures: 20, 30, 60, 80, 90, and 100 psi. Generally, the average injector spray quantity increases with increasing pressure. For example, in 30 seconds, increasing the pressure from 20 to 30 psi increases the spray quantity by 12%. Similarly, in 40 seconds, increasing the pressure from 90 to 100 psi increases the spray quantity by 6.5% (Figure 3).

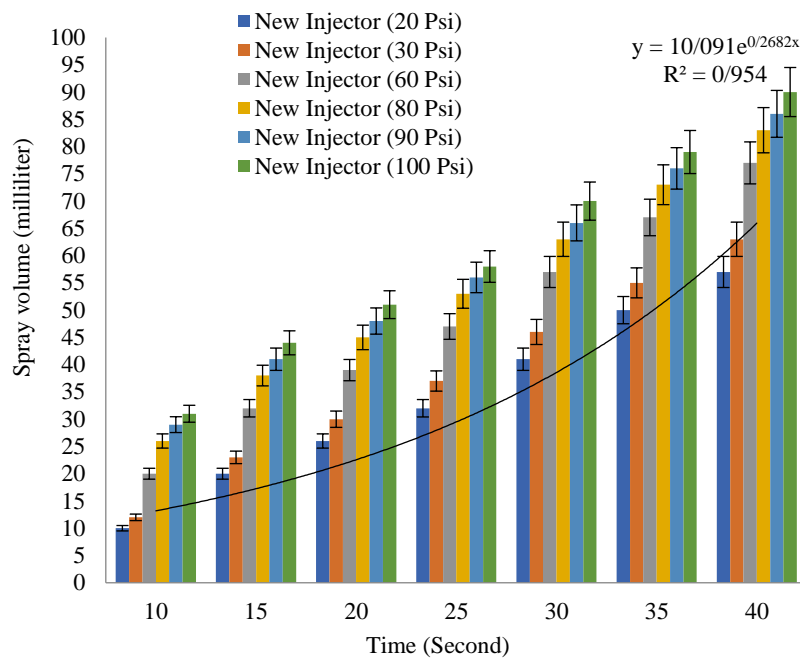


Figure 3: Effect of Pressure on Injector Spray Quantity

Effect of System Voltage on Injector Spray Rate

Spray tests were performed on the system at four different voltages and five time intervals. The average spray rates were calculated, and the results are reported in Figure 4. According to this figure, the higher the system voltage, the greater the spray quantity. For example, when the system voltage is 10 volts, 7 mm more fuel is injected in 10 seconds compared to when the system voltage is 6 volts.

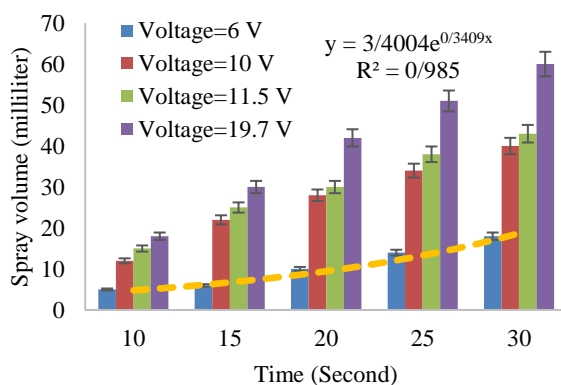


Figure 4: Effect of System Voltage on Injector Spray Rate

Investigation of Fuel Filter Clogging

Depending on the percentage of fuel filter clogging, the fuel pump pressure will be between 4.5 and 6.5 bar

4- Conclusion

To empirically analyze the impact of fuel pressure and filter clogging on the injection rate of automotive injectors, a laboratory model of an injector testing device was designed and constructed. Experiments were conducted at six pressures: 20, 30, 60, 80, 90, and 100 PSI. The results showed that, generally, the average injection rate of the injectors increases with increasing pressure. For example, in 30 seconds, increasing the pressure from 20 to 30 PSI increases the injection volume by 12%. Or, in 40 seconds, increasing the pressure from 90 to 100 PSI increases the injection volume by 6.5%. It was also found that the higher the system voltage, the greater the injection volume. For instance, when the system voltage is 10 volts, 7 mm more fuel is injected in 10 seconds compared to when the system voltage is 6 volts. Finally, it was determined that, depending on the percentage of filter clogging, the system pressure would be between 4.5 and 6.5 bar.

5- References

- [1] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Investigation

- of the effect of AL_2O_3 nanofluid in M13NI engine cooling system. *The Journal of Engine Research*, 70(1), 47–65. doi: [10.22034/ER.2023.1975318.0](https://doi.org/10.22034/ER.2023.1975318.0)
- [2] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Diagnosing dimensional defects and valve cracks using machine vision and acoustic emission. *Karafan Journal*, 20(3), 149–168. doi: [10.48301/KSSA.2023.391572.2501](https://doi.org/10.48301/KSSA.2023.391572.2501) [In Persian]
- [3] Sehili, Y., Cerdoun, M., Loubar, K., & Tarabet, L. (2024). Dual fuel engine injector temperature monitoring: An innovative thermal analysis approach. *Applied Thermal Engineering*, 249, 123370. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.123370](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123370)
- [4] Morad, M. R., & Ramezani, A. (2020). Experimental study of liquid film thickness formed by spray impingement on a solid surface. *Fuel and Combustion*, 13(2), 57–72. [In Persian]
- [5] Poormahmood, A., Ghorban Hosseini, M., Kebriaee, A., & Farshchi, M. (2016). An experimental study on the operating parameters of a simplex swirl injector. *Fuel and Combustion*, 9(1), 75–84. [In Persian]
- [6] Khodaverdian, R., Jahannama, M. R., Ramezani, A., & Kebriaee, A. (2021). Evaporation of injected oxidizer from a pressure-swirl injector in a low pressure combustion chamber. *Fuel and Combustion*, 14(1), 95–116. doi: [10.22034/JFNC.2021.250402.1248](https://doi.org/10.22034/JFNC.2021.250402.1248) [In Persian]
- [7] Rostami, E. (2021). Experimental and numerical investigation of atomization characteristics of diesel and mazut fuel injected from a pressure-swirl atomizer. *Fuel and Combustion*, 14(3), 33–58. doi: [10.22034/JFNC.2021.284326.1278](https://doi.org/10.22034/JFNC.2021.284326.1278) [In Persian]
- [8] Mueller, C. J., Nilsen, C. W., Biles, D. E., & Yraguen, B. F. (2021). Effects of fuel oxygenation and ducted fuel injection on the performance of a mixing-controlled compression-ignition optical engine with a two-orifice fuel injector. *Applications in Energy and Combustion Science*, 6, 100024. doi: [10.1016/j.jaecs.2021.100024](https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100024)
- [9] Paryanto, I., Budianta, I. A., Alifia, K. C. H., Hidayatullah, I. M., Darmawan, M. A., Judistira, ..., & Gozan, M. (2022). Modelling of fuel filter clogging of B20 fuel based on the precipitate measurement and filter blocking test. *ChemEngineering*, 6(6), 84. doi: [10.3390/chemengineering6060084](https://doi.org/10.3390/chemengineering6060084)
- [10] Akal, D., & Selvi, İ. (2023). Effects of clogged air filter on power, torque, fuel consumption and emissions of diesel engines in tractors. *Petroleum Science and Technology*, 41(24), 2419–2433. doi: [10.1080/10916466.2023.2230248](https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2230248)



تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورهای خودرو

بهمن رحمتی نژاد^{۱*}، حسین رحیمی آسیابریکی^۲، فرزین عظیم پور شیشوان^۱

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

۲- مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

این تحقیق با هدف تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورها انجام شده است. بدین منظور، یک دستگاه تست انژکتور به صورت آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. این دستگاه قابلیت انجام تست‌های نشتی، بررسی شکل و مقدار پاشش انژکتورها را دارد. آزمایش‌ها در شش فشار ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع انجام شد. نتایج نشان داد در حالت کلی متوسط پاشش انژکتورها با افزایش فشار افزایش می‌یابد؛ به عنوان نمونه، افزایش فشار از ۲۰ به ۳۰ پوند بر اینچ مربع در بازه زمانی ۳۰ ثانیه منجر به افزایش ۱۲ درصدی مقدار پاشش سوخت گردید. همچنین مشخص شد که با افزایش ولتاژ سیستم، مقدار پاشش سوخت نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در مدت زمان ۱۰ ثانیه، سیستم با ولتاژ ۱۰ ولت نسبت به حالت ۶ ولت، ۷ میلی‌متر سوخت بیشتر پاشش می‌کند. در نهایت مشخص شد با توجه به درصد گرفتگی فیلتر، فشار سیستم در محدوده بین ۴/۵ تا ۶/۵ بار خواهد بود.

کلمات کلیدی

گرفتگی فیلتر
عیب‌یابی انژکتور
تحلیل تجربی
تغییرات فشار
مصرف سوخت

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

*نویسنده مسئول

بهمن رحمتی نژاد

ایمیل

brahmati@nus.ac.ir

۱- مقدمه

تعیین قطعات در صورت لزوم از دیگر مزایای سیستم انژکتوری می‌باشد. انژکتور، یک جزء کلیدی در موتورهای احتراق داخلی است که وظیفه تزریق سوخت را بر عهده دارد. این قطعه به‌طور دقیق و کنترل‌شده سوخت را به پشت سوپاپ هوا در مانیفولد ورودی می‌رساند تا با هوای ورودی ترکیب شود و در نتیجه یک مخلوط مناسب برای احتراق تولید کند. عملکرد انژکتور معمولاً تحت نظارت واحد کنترل الکترونیکی قرار دارد که بر اساس نیاز موتور و شرایط عملکرد، زمان و مقدار تزریق سوخت را تنظیم می‌کند. با توجه به سوراخ‌های ریز طراحی‌شده بر روی انژکتورها مقدار معینی سوخت از آن‌ها عبور می‌کند. قطر این سوراخ‌ها با گذشت زمان دچار تغییر شده و مقدار سوخت تحویل داده‌شده به موتور تغییر یافته و موتور نامیزان کار می‌کند. احتراق مخلوط سوخت و هوا در موتورهای احتراق داخلی، تولید قدرت می‌کند [۲]. یکی از عواملی که باعث بروز مشکل

موتورهای احتراق داخلی امروزه کاربردهای فراوانی دارند. در این سیستم، تولید توان با بازده بالا بستگی به عملکرد صحیح در تمام قسمت‌های آن دارد [۱]. خودروهای انژکتوری، سوخت را به‌طور دقیق و در زمان مناسب به موتور منتقل می‌کنند. این فناوری بهبود کارایی موتور، کاهش مصرف سوخت و کاهش سطح آلاینده‌ها را به همراه دارد. از دهه‌ها پیش، صنایع خودروسازی به توسعه سیستم‌های انژکتوری پرداخته‌اند تا عملکرد موتورهای احتراق داخلی را بهینه کنند. امروزه بیشتر خودروهای جدید به سیستم‌های انژکتوری مجهز هستند. خودروهای انژکتوری به علت کنترل الکترونیکی اعمال‌شده روی سیستم سوخت‌رسانی و متعاقب آن عکس‌العمل سریع‌تر اجزاء دارای راندمان و شتاب بالاتری می‌باشند. حذف قطعاتی مانند کاربراتور و استفاده از واحد کنترل الکترونیکی، انژکتور، ریل سوخت و ... با عمر مفید بیشتر، کارایی بالاتر و همچنین سهولت عیب‌یابی و

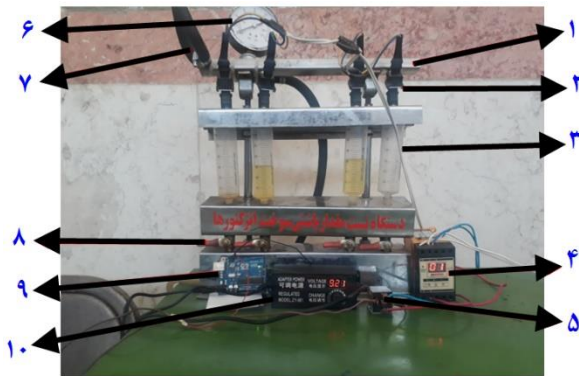


نمودند. انژکتور مورد استفاده در این پژوهش از نوع پیچشی تک پایه با ساختار ساده بوده و سیال عامل مورد استفاده آب می باشد. کلیه آزمایشها در شرایط استاندارد اتمسفریک انجام پذیرفته است. تصویربرداری از میدان پاشش به روش سایه‌نگاری صورت گرفته است. نتایج آزمایشها نشان می دهد که در رینولدز ۳۰۰۰۰ رژیم پاشش انژکتور از رژیم قطره‌چکانی به رژیم اتمیزاسیون تغییر یافته و با افزایش بیشتر رینولدز تا حد ۳۷۰۰۰ رژیم کاملاً توسعه یافته پاشش (که مخروط پاشش کامل می شود) حاکم می شود. از طرفی، با افزایش رینولدز، زاویه پاشش انژکتور ابتدا افزایش یافته و با افزایش بیشتر رینولدز، تقریباً ثابت می شود. خداوردیان و همکاران [۶] در سال ۱۴۰۰ به بررسی تبخیر اکسیدکننده پاشش شده از انژکتور فشاری-پیچشی در محفظه احتراق در شرایط فشار پایین پرداخته و نشان دادند هر چند نقش تبخیر آبی در تغییر دما و فشار قطرات به عنوان فاز گسسته و نیز گاز محیطی به عنوان فاز پیوسته مشهود است، ولی هم‌زمان با آن می توان میل این دو فاز به شرایط پایدار و ایجاد حالت پایا را مشاهده کرد. رستمی [۷] در سال ۱۴۰۰ به بررسی تجربی و عددی مشخصات قطره سازی سوخت‌های دیزل و مازوت تزریق شده از یک انژکتور فشاری-پیچشی پرداخته و نشان دادند طول شکست و قطر قطرات با افزایش دما و فشار سوخت روندی نزولی را طی کرده و با توسعه کامل جریان، تقریباً به سمت مقدار صفر میل می کنند. توزیع قطر اندازه قطرات با افزایش گرانروی سیال و توزیع سرعت قطرات با کاهش گرانروی سیال صاف تر و یکنواخت تر می شود. مولر و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱ اثرات اکسیژن‌رسانی به سوخت تزریق شده در یک موتور احتراق تراکمی با انژکتور دو روزه را بررسی نمودند آن‌ها به منظور مقایسه احتراق دیزل معمولی و تزریق سوخت با هوا از یک موتور تک‌سیلندر استفاده کردند. نتایج نشان داد ویژگی‌های عملیاتی، انتشار هیدروکربن و مونوکسید کربن و در نتیجه راندمان احتراق بین دو مورد اشاره شده مشابه است. پارینتو و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۲ مدل‌سازی مسدود شدن فیلتر سوخت با سوخت B20 بر اساس اندازه‌گیری رسوب و آزمون مسدود شدن فیلتر را انجام دادند. این سوخت دارای ترکیب ۲۰٪ بیودیزل و ۸۰٪ گازوئیل است که در خیلی از خودروهای تجاری مانند کامیون‌ها، کامیونت‌ها و وانت‌ها استفاده می شود. آن‌ها نشان دادند مقدار رسوب بر زمان مسدود شدن فیلتر سوخت تأثیر می گذارد. نتایج نشان داد که هرچه آلودگی‌های موجود در سوخت بیشتر باشند، زمان کمتری برای رسیدن به افت فشار به

در سیستم سوخت‌رسانی و در نتیجه انژکتور می شود، کیفیت نامناسب سوخت و وجود ذرات ناخالصی است. این ذرات به مرور زمان و پس از مدتی در بدنه اجزا موجود در سیستم سوخت‌رسانی و به ویژه انژکتور نفوذ می کنند. این فرآیند در شرایط مختلف کاری موتور رخ می دهد. با افزایش مواد زائد و ناخالصی روی اجزای انژکتور، به تدریج مشخصه‌های عملکردی این قطعه تغییر می کند. به عنوان مثال، ابعاد داخلی سوزن و سوراخ تغییر کرده و ممکن است دبی خروجی آن نیز دچار تغییر شود. همچنین ممکن است نحوه پاشش (زاویه پاشش) نیز تحت تأثیر قرار گیرد. این عوامل موجب اختلال در عملکرد صحیح موتور می شوند و حتی ممکن است تغییر نحوه پاشش باعث آسیب به سایر قطعات نیز بشود.

محققین متعددی در مورد انژکتور، تحقیق نموده‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می شود. یوسف سهیلی و همکاران [۳] در سال ۲۰۲۴ به مدل‌سازی عددی دمای انژکتور یک موتور دوگانه‌سوز پرداختند. آن‌ها نشان دادند نظارت بر دمای انژکتور در موتورهای دوگانه‌سوز برای بهبود عملکرد و کاهش مشکلات احتمالی اهمیت دارد. در این تحقیق سوخت اصلی موتور گازوئیل و سوخت ثانویه گاز طبیعی بود. از نرم‌افزار المان محدود انسیس فلونت برای شبیه‌سازی توزیع حرارت درون انژکتور و اجزای مرتبط تحت شرایط عملیاتی مختلف استفاده شد. برای مدل‌سازی تعاملات حرارتی بین سوخت تزریقی، گازهای داغ و اجزای موتور از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. نتایج نشان داد در بار کامل زمانی که از سوخت دیزل استفاده می شود نوک انژکتور نسبت به حالتی که از گاز طبیعی استفاده می شود ۲۵۵ درجه کلوین گرم تر است. مراد و رمضانی [۴] در سال ۱۳۹۹ به مطالعه تجربی ضخامت فیلم مایع حاصل از برخورد اسپری با یک سطح جامد پرداخته و نشان دادند در دبی‌های حجمی بالای افشانه یک لایه مایع بر روی سطح جامد تشکیل می شود. در صورتی که ضخامت لایه مایع زیاد باشد، در کاربردهای احتراقی، می تواند منجر به احتراق ناقص سوخت در محفظه احتراق شود. ضخامت لایه مایع به پارامترهای زیادی، نظیر دبی حجمی سیال، فاصله نازل تا سطح و مود شکست افشانه، بستگی دارد. اندازه ضخامت متوسط لایه مایع با تغییر پارامترهایی نظیر دبی حجمی سیال مایع و گاز و فاصله نازل تا سطح تغییر می کند و این ضخامت در بازه بین ۴۰ تا ۲۲۰ میکرومتر در شرایط مختلف متغیر است. پورمحمد و همکاران [۵] در سال ۱۳۹۵ پارامترهای عملکردی یک انژکتور پیچشی، به عنوان تابعی از اعداد رینولدز و وبر، را مطالعه

سوخت ورودی به ریل سوخت، ۸- شیرهای تخلیه سوخت استوانه‌های شیشه‌ای، ۹- برد آردوینو، ۱۰- آداپتور جریان AC به DC با ولتاژ قابل تنظیم می‌باشد.



شکل ۱: نمای کلی اجزای دستگاه شستشوی انژکتور

این دستگاه با ولتاژ تغذیه ۲۲۰ ولت کار می‌کند و محدوده فشار کاری آن از صفر تا ۱۶ بار می‌باشد که در آن از گیج فشار سیوال^۱ استفاده شده است. این گیج جهت مصارف صنعتی با دقت بالا برای اندازه‌گیری فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه با تغذیه ۱۲ ولت برای پمپ بنزین و انژکتورها طراحی گردیده و قابلیت انجام آزمایش‌های مختلفی از جمله بررسی و مشاهده نشتی انژکتورها، تست زاویه تزریق و نحوه پودرسازی انژکتورها، تست حالت یکنواختی پاشش سوخت انژکتورها، شستشوی شیمیایی و رفع کامل رسوبات داخلی انژکتورهای مسدود و مشاهده و مقایسه حجم پاشش سوخت بین انژکتورهای مختلف را دارا می‌باشد. به منظور قطع و وصل جریان انژکتورها و جلوگیری از باز بودن مداوم آن‌ها، مدار شکل ۲ طراحی و ساخته شد. در این مدار مدت زمان آزمایش از طریق تایمر دیجیتالی در بازه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ثانیه قابل تنظیم بوده و کنترل قطع و وصل انژکتورها توسط برنامه‌نویسی برد آردوینو انجام می‌پذیرد. پایه‌های ۸۵ و ۸۶ در رله پنج‌پایه مربوط به رله مغناطیسی بوده و برد آردوینو با قطع و وصل جریان این رله می‌تواند جریان برق انژکتورها را قطع و وصل نماید.

بردهای آردوینو، مجموعه‌ای از پلتفرم‌های سخت‌افزاری متن‌باز هستند که به‌ویژه برای اهداف آموزشی و توسعه پروژه‌های

سطح ۳۰ کیلوپاسکال نیاز است. آکال و سلوی [۱۰] در سال ۲۰۲۳ اثر فیلتر هوای مسدود شده بر قدرت، گشتاور، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها در موتورهای دیزلی تراکتورها را بررسی نمودند. در این مطالعه، افت فشار در سیستم ورودی زمانی که فیلتر هوای جدید ۱- میلی‌بار، سپس ۲۱- میلی‌بار، ۴۰- میلی‌بار بسته به آلودگی و ۶۵- میلی‌بار در حالت کاملاً مسدود شده، مورد بررسی قرار گرفت. درحالی‌که افت فشار در سیستم ورودی ۱- میلی‌بار بود، حداکثر قدرت تولیدشده در موتور در ابتدا ۶۴/۲ کیلووات و حداکثر گشتاور ۳۸۶ نیوتن‌متر بود. وقتی افت فشار به ۶۵- میلی‌بار رسید، حداکثر قدرت موتور به ۵۸/۱ کیلووات و حداکثر گشتاور به ۳۶۰ نیوتن‌متر کاهش یافت. دزیوباک و کارچفسکی [۱۱] در سال ۲۰۲۲ پژوهشی تجربی درباره تأثیر افت فشار فیلتر هوا بر عملکرد موتور احتراق داخلی انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که در موتورهای احتراق جرقه‌ای، هر یک کیلوپاسکال افزایش در افت فشار فیلتر هوا موجب کاهش ۱ تا ۱/۵ درصدی میانگین قدرت موتور و افزایش مصرف سوخت ویژه به میزان حدود ۰/۷ می‌گردد. برای موتورهای احتراق تراکمی، مقادیر به ترتیب ۰/۴ تا ۰/۶ درصد کاهش در قدرت و ۰/۳ تا ۰/۵ درصد افزایش در مصرف سوخت ویژه است.

در مطالعات پیشین، بیشتر توجه‌ها به جنبه‌های مکانیکی و طراحی انژکتورها معطوف شده است و تأثیر هندسه سوراخ‌های نازل بر فرآیندهای تزریق، اختلاط و احتراق، عمدتاً از دو رویکرد تجربی و عددی استفاده می‌شود [۱۷-۱۲]؛ اما پژوهش حاضر به‌طور خاص به بررسی تجربی و عملی دو عامل مهم، یعنی فشار سوخت و وضعیت فیلتر سوخت پرداخته و تلاش دارد تا درک بهتری از تأثیرات متقابل این دو عامل بر نرخ پاشش انژکتورها فراهم کند. با توجه به اینکه سوخت‌پاشی بهینه یکی از عوامل اصلی در بهبود کارایی سیستم‌های احتراق داخلی و کاهش آلاینده‌ها است، درک دقیق از چگونگی تأثیر این دو عامل می‌تواند به ارتقاء عملکرد موتورهای احتراق داخلی و بهینه‌سازی مصرف سوخت منجر شود.

۲- مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر فشار و گرفتگی فیلتر بنزین بر میزان پاشش انژکتورها، دستگاه شستشوی انژکتور طراحی و ساخت شده است. اجزای دستگاه ساخته‌شده مطابق شکل ۱ به ترتیب شامل ۱- ریل سوخت، ۲- انژکتورها، ۳- استوانه‌های شیشه‌ای اندازه‌گیری سوخت، ۴- تایمر دیجیتالی، ۵- رله پنج‌پایه، ۶- گیج فشار، ۷- شیلنگ

¹ Cewal

زمان ۴۰ ثانیه، افزایش فشار از ۹۰ به ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع منجر به رشد ۵/۶ درصدی در مقدار پاشش سوخت شد.



(ب)

(الف)



(د)

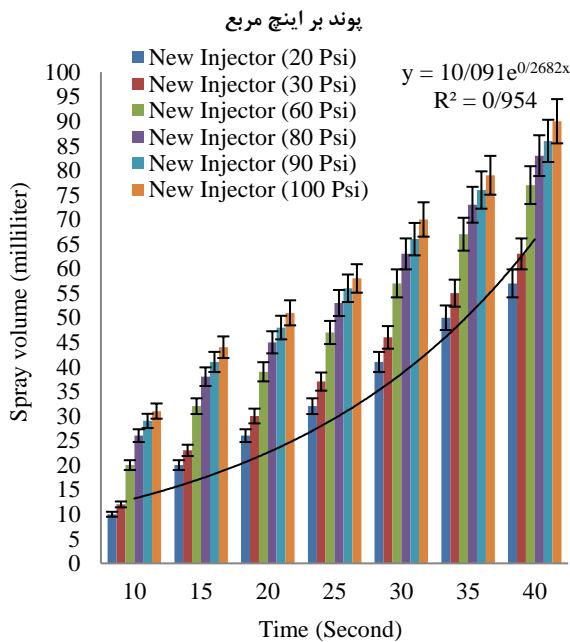
(ج)



(و)

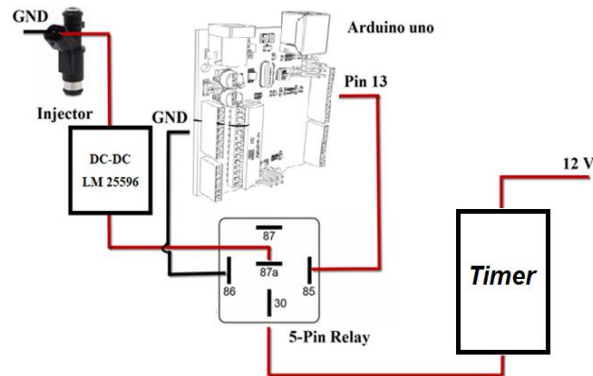
(ه)

شکل ۳: فشار کاری دستگاه (الف) ۲۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰، (د) ۸۰، (ه) ۹۰ و (و) ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع



شکل ۴: تأثیر فشار بر مقدار پاشش انژکتورها

الکترونیکی طراحی شده‌اند. این بردها به کاربران امکان می‌دهند تا با استفاده از زبان برنامه‌نویسی ساده‌ای مانند Arduino C++، برنامه‌هایی را توسعه دهند که می‌توانند با حسگرها، موتورها و دستگاه‌های دیگر ارتباط برقرار کنند. با ارائه مجموعه‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌های دیجیتال و آنالوگ، آردوینو نه تنها برای پروژه‌های ساده بلکه در کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۲: مکانیزم قطع و وصل جریان برق انژکتورها

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر فشار بر میزان پاشش انژکتورها

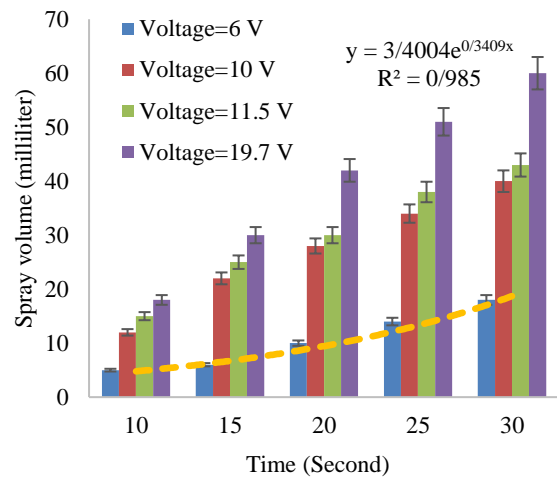
پیش از انجام آزمایش اصلی، لازم است تست نشتی سوزن انژکتورها در فشار ۵ بار انجام گیرد. برای این منظور، برق پمپ بنزین را وصل کرده در حالی که برق انژکتورها قطع باشد. در این حالت نشتی احتمالی انژکتورها به صورت چشمی کنترل می‌شود. در صورت وجود نشتی، بایستی اورینگ سوزن انژکتور مربوطه تعویض شود. پس از اطمینان از عدم نشتی، با مسدود کردن نسبی مسیر برگشت سوخت، می‌توان فشار ریل سوخت را افزایش داد و آزمایش بررسی تأثیر فشار بر میزان پاشش را با چهار انژکتور نو انجام داد. در این حالت فعال شدن رگولاتور انتهای ریل سوخت تأثیری بر کنترل فشار ندارد و می‌توان فشار ریل سوخت را افزایش یا کاهش داد.

شکل ۳ آزمایش‌ها را که در شش فشار ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع انجام شد نمایش می‌دهد.

به‌طور کلی همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش فشار، متوسط پاشش انژکتورها افزایش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، در بازه زمانی ۳۰ ثانیه، افزایش فشار از ۲۰ به ۳۰ پوند بر اینچ مربع موجب افزایش ۱۲ درصدی مقدار پاشش گردید. همچنین در مدت

۲-۳- بررسی تأثیر ولتاژ بر میزان پاشش انژکتورها

به منظور تثبیت ولتاژ از مبدل جریان مستقیم DC-DC LM25596 مطابق شکل ۲ استفاده شد. ولتاژ ورودی این مبدل ۳ تا ۳۰ ولت و ولتاژ خروجی آن ۱/۵ تا ۳۰ ولت است و حداکثر جریان خروجی ۳ آمپر می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده در چهار سطح ولتاژ مختلف و پنج بازه زمانی نشان داد که تغییرات ولتاژ سیستم تأثیر معناداری بر عملکرد پاشش انژکتورها دارد و با افزایش ولتاژ، میزان پاشش به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. همانطور که شکل ۵ مشاهده می‌شود، در مدت زمان ۱۰ ثانیه، اختلاف پاشش بین ولتاژهای ۱۰ و ۶ ولت به میزان ۷ میلی‌متر سوخت بوده است که این نتیجه به وضوح رابطه مستقیم بین ولتاژ و میزان پاشش را تأیید می‌کند.



شکل ۵: تأثیر مقدار ولتاژ سیستم بر مقدار پاشش انژکتورها

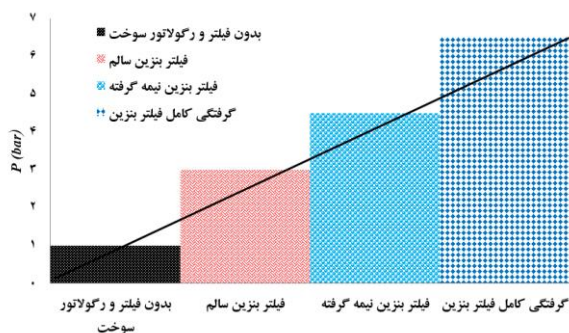
۳-۳- بررسی گرفتگی فیلتر

وجود ذرات معلق، گرد و غبار در سوخت، استفاده از سوخت‌های نامرغوب و غیراستاندارد، زنگ‌زدگی و رسوبات در مخزن سوخت و همچنین استفاده طولانی‌مدت از فیلتر سوخت می‌تواند باعث گرفتگی فیلتر بنزین شود. کیفی و گرفتگی فیلتر بنزین تأثیرات منفی متعددی بر عملکرد خودرو دارد که شامل کاهش بازده موتور، کثیف شدن انژکتورها، بد روشن شدن موتور، کاهش عمر مفید پمپ بنزین و سنسور اکسیژن و در بعضی موارد سوختن سوپاپ موتور می‌شود. از نشانه‌های بارز گرفتگی فیلتر بنزین می‌توان به بد روشن شدن اتومبیل خصوصاً در حالت استارت سرد و کاهش راندمان موتور اشاره کرد. معمولاً در این شرایط قدرت موتور مقدار قابل توجهی کاهش یافته و دور موتور به کندی بالا می‌رود. کاهش قدرت موتور در

سربالایی‌ها و هنگام استفاده از کولر اتومبیل کاملاً محسوس است. در بسیاری از موارد، کثیفی و خرابی فیلتر بنزین به‌عنوان عامل اصلی آلودگی و گرفتگی انژکتورها شناخته می‌شود که نتیجه آن کاهش شدید راندمان موتور و افزایش قابل توجه مصرف سوخت می‌باشد.

برای انجام آزمایش، جریان مثبت و منفی مستقیماً به پمپ بنزین اعمال می‌شود. با فعال شدن پمپ بنزین، سوخت از باک کشیده شده و تحت فشار قرار می‌گیرد. این سوخت تحت فشار ابتدا از گیج فشار عبور کرده، سپس از فیلتر سوخت گذشته و در نهایت به ریل سوخت هدایت می‌شود. در شرایطی که برق انژکتورها قطع باشد و پاششی انجام نشود، سوخت پس از عبور از رگولاتور که معمولاً برای فشار ۲/۵ تا ۳ بار تنظیم شده است، از طریق مسیر برگشت به مخزن سوخت بازگردانده می‌شود. در صورتی که رگولاتور ریل سوخت فیلتر از مسیر سوخت‌رسانی حذف گردد و فشار خروجی با راه‌اندازی پمپ مورد بررسی قرار گیرد، مشاهده خواهد شد که فشار خروجی تقریباً صفر می‌باشد، چرا که هیچ مقاومتی در برابر جریان خروجی وجود ندارد.

در این مرحله از آزمایش، ریل سوخت به همراه رگولاتور و یک فیلتر بنزین نو در مدار قرار داده شد. با روشن کردن پمپ، فشارسنج عددی بین ۴ تا ۴/۵ بار را نشان داد. سپس تعدادی فیلتر کارکرده مورد آزمایش قرار گرفتند که در این حالت، با توجه به درصد گرفتگی فیلترها، فشار اندازه‌گیری شده در محدوده ۴/۵ تا ۶/۵ بار قرار داشت. برای بررسی حداکثر میزان گرفتگی، خروجی فیلتر مسدود شد و با روشن شدن پمپ، فشارسنج عددی حدود ۷ بار را ثبت کرد. این نتایج به صورت ترسیمی در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶: بررسی گرفتگی فیلتر بنزین با استفاده از فشار پمپ

با توجه به شکل ۶ مشخص گردید که اندازه‌گیری فشار خروجی پمپ (ورودی فیلتر) می‌تواند به‌عنوان روشی جهت تشخیص گرفتگی فیلتر مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین سامانه تشخیص گرفتگی فیلتر مطابق شکل ۷ معرفی می‌گردد.

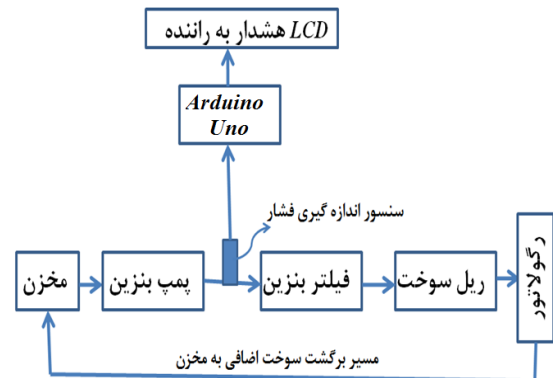
انژکتور تأثیر می‌گذارد، می‌تواند در طراحی فیلترهای بهتری که نیاز به تعویض کمتری دارند، کمک کند.

۴- نتیجه‌گیری

انژکتورهای کثیف می‌توانند منجر به احتراق ناقص سوخت شوند که این مسئله باعث افزایش انتشار آلودگی‌هایی مانند هیدروکربن‌ها، مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن می‌شود. زمانی که انژکتورها به دلیل آلودگی‌ها به درستی عمل نمی‌کنند، موتور ممکن است برای حفظ همان سطح عملکرد به سوخت بیشتری نیاز داشته باشد که این موضوع به افزایش مصرف سوخت منجر می‌شود. یکی از عواملی که باعث افزایش آلایندگی‌ها و مصرف سوخت و کاهش قدرت موتور می‌شود، رسوب آلودگی‌ها در انژکتور خودرو است. این عامل باعث افزایش اندازه ذرات سوخت تزریقی در محفظه سیلندر و در نتیجه عدم احتراق کامل می‌شود. به منظور تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورهای خودرو مدل آزمایشگاهی از یک دستگاه تست انژکتور طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در شش فشار ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع انجام گرفت. نتایج نشان داد در حالت کلی متوسط پاشش انژکتورها با افزایش فشار افزایش می‌یابد. به طور مثال در بازه زمانی ۳۰ ثانیه با افزایش فشار از ۲۰ به ۳۰ پوند بر اینچ مربع، مقدار پاشش ۱۲ درصد و در بازه زمانی ۴۰ ثانیه با افزایش فشار از ۹۰ به ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع، مقدار پاشش ۵/۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد هرچه قدر ولتاژ سیستم زیاد باشد مقدار پاشش نیز بیشتر خواهد بود، به گونه‌ای که افزایش ولتاژ از ۶ به ۱۰ ولت در مدت زمان ۱۰ ثانیه باعث افزایش ۷ میلی‌متری سوخت پاشش شده می‌شود. همچنین بررسی‌ها حاکی از آن است که با توجه به درصد گرفتگی فیلتر، فشار سیستم عددی بین ۴/۵ تا ۶/۵ بار خواهد بود که این موضوع اهمیت توجه به وضعیت فیلتر را در عملکرد بهینه سیستم سوخت‌رسانی نشان می‌دهد.

۵- منابع

- [1] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Investigation of the effect of AL_2O_3 nanofluid in M13NI engine cooling system. *The Journal of Engine Research*, 70(1), 47–65. doi: [10.22034/ER.2023.1975318.0](https://doi.org/10.22034/ER.2023.1975318.0) (In Persian)
- [2] Rahmatinejad, B., Rahimi Asiabaraki, H., & Azimpour Shishevan, F. (2023). Diagnosing dimensional defects and valve cracks using machine



شکل ۷: شماتیک سامانه تشخیص گرفتگی فیلتر

در این سامانه از برد آردوینو جهت پردازش اطلاعات استفاده شده که می‌تواند اطلاعات فشار خروجی پمپ را مورد ارزیابی قرار دهد. ابتدا محدوده فشارها به آردوینو معرفی می‌شود. یک فشارسنج الکترونیکی به صورت دائمی فشار خروجی پمپ را اندازه‌گیری می‌نماید. زمانی که فشار خروجی پمپ بیشتر از ۴/۵ بار شود از طریق صفحه‌ی نمایشگر موجود، اخطار نیمه گرفته شدن فیلتر به راننده داده می‌شود. بین ۴/۵ تا ۶/۵ بار اختلاف ۲ بار است که می‌توان آن را به ۴ قسمت تقسیم نمود و مطابق جدول ۱ درصد گرفتگی را به راننده اعلام کرد تا در اسرع وقت نسبت به تعویض فیلتر اقدام نماید.

جدول ۱: درصد گرفتگی فیلتر بر اساس فشار خروجی پمپ

محدوده فشار خروجی پمپ	درصد گرفتگی فیلتر بنزین
بین ۴/۵ تا ۵ بار	۲۵ درصد
بین ۵ تا ۵/۵ بار	۵۰ درصد
بین ۵/۵ تا ۶ بار	۷۵ درصد
بین ۶ تا ۶/۵ بار	۱۰۰ درصد

نتایج تحلیل تجربی تأثیر فشار سوخت و گرفتگی فیلتر بر نرخ پاشش انژکتورهای خودرو می‌تواند در صنعت خودرو به کار رود. این نتایج می‌توانند به مهندسان و طراحان کمک کنند تا به بهینه‌سازی عملکرد انژکتورها و سیستم‌های سوخت‌رسانی بپردازند. با درک تأثیرات فشار سوخت و وضعیت فیلتر بر نرخ پاشش، می‌توان سیستم‌های سوخت‌رسانی را به گونه‌ای طراحی کرد که مصرف سوخت کمتر و کارایی بیشتری داشته باشد. بهینه‌سازی پاشش سوخت می‌تواند منجر به کاهش آلایندگی‌های تولید شده توسط موتور شود که به بهبود کیفیت هوا کمک خواهد کرد. با کنترل بهتر نرخ پاشش، می‌توان عملکرد موتور را در دورهای مختلف و شرایط مختلف جاده بهینه نمود. دانستن اینکه چگونه گرفتگی فیلتر بر عملکرد

- of diesel engines in tractors. *Petroleum Science and Technology*, 41(24), 2419–2433. doi: [10.1080/10916466.2023.2230248](https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2230248)
- [11] Dziubak, T., & Karczewski, M. (2022). Experimental study of the effect of air filter pressure drop on internal combustion engine performance. *Energies*, 15(9), 3285. doi: [10.3390/en15093285](https://doi.org/10.3390/en15093285)
- [12] Payri, R., Bracho, G., Marti-Aldaravi, P., & Viera, A. (2017). Near field visualization of diesel spray for different nozzle inclination angles in non-vaporizing conditions. *Atomization and Sprays*, 27(3).
- [13] Herfatmanesh, M. R., Lu, P., Attar, M. A., & Zhao, H. (2013). Experimental investigation into the effects of two-stage injection on fuel injection quantity, combustion and emissions in a high-speed optical common rail diesel engine. *Fuel*, 109, 137–147. doi: [10.1016/j.fuel.2013.01.013](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.013)
- [14] Wang, Z., Xu, H., Jiang, C., & Wyszynski, M. L. (2016). Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection. *Fuel*, 174, 140–152. doi: [10.1016/j.fuel.2016.01.083](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.083)
- [15] Payri, R., Salvador Rubio, F. J., Bracho León, G. C., & Viera Sotillo, A. A. (2017, July). Vapor phase penetration measurements with both single and double-pass Schlieren for the same injection event. In *ILASS Europe: 28th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (pp. 747–754). Editorial Universitat Politècnica de València. doi: [10.4995/ILASS2017.2017.4884](https://doi.org/10.4995/ILASS2017.2017.4884)
- [16] Xue, F., Luo, F., Cui, H., Moro, A., & Zhou, L. (2017). Numerical analyses of transient flow characteristics within each nozzle hole of an asymmetric diesel injector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 18–27. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.027](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.027)
- [17] Salvador, F. J., Jaramillo, D., Romero, J. V., & Roselló, M. D. (2017). Using a homogeneous equilibrium model for the study of the inner nozzle flow and cavitation pattern in convergent–divergent nozzles of diesel injectors. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 309, 630–641. doi: [10.1016/j.cam.2016.04.010](https://doi.org/10.1016/j.cam.2016.04.010)
- vision and acoustic emission. *Karafan Journal*, 20(3), 149–168. doi: [10.48301/KSSA.2023.391572.2501](https://doi.org/10.48301/KSSA.2023.391572.2501) (In Persian)
- [3] Sehili, Y., Cerdoun, M., Loubar, K., & Tarabet, L. (2024). Dual fuel engine injector temperature monitoring: An innovative thermal analysis approach. *Applied Thermal Engineering*, 249, 123370. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.123370](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123370)
- [4] Morad, M. R., & Ramezani, A. (2020). Experimental study of liquid film thickness formed by spray impingement on a solid surface. *Fuel and Combustion*, 13(2), 57–72. (In Persian)
- [5] Poormahmood, A., Ghorban Hosseini, M., Kebriaee, A., & Farshchi, M. (2016). An experimental study on the operating parameters of a simplex swirl injector. *Fuel and Combustion*, 9(1), 75–84. (In Persian)
- [6] Khodaverdian, R., Jahannama, M. R., Ramezani, A., & Kebriaee, A. (2021). Evaporation of injected oxidizer from a pressure–swirl injector in a low pressure combustion chamber. *Fuel and Combustion*, 14(1), 95–116. doi: [10.22034/JFNC.2021.250402.1248](https://doi.org/10.22034/JFNC.2021.250402.1248) (In Persian)
- [7] Rostami, E. (2021). Experimental and numerical investigation of atomization characteristics of diesel and mazut fuel injected from a pressure-swirl atomizer. *Fuel and Combustion*, 14(3), 33–58. doi: [10.22034/JFNC.2021.284326.1278](https://doi.org/10.22034/JFNC.2021.284326.1278) (In Persian)
- [8] Mueller, C. J., Nilsen, C. W., Biles, D. E., & Yraguen, B. F. (2021). Effects of fuel oxygenation and ducted fuel injection on the performance of a mixing-controlled compression-ignition optical engine with a two-orifice fuel injector. *Applications in Energy and Combustion Science*, 6, 100024. doi: [10.1016/j.jaecs.2021.100024](https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100024)
- [9] Paryanto, I., Budianta, I. A., Alifia, K. C. H., Hidayatullah, I. M., Darmawan, M. A., Judistira, ..., & Gozan, M. (2022). Modelling of fuel filter clogging of B20 fuel based on the precipitate measurement and filter blocking test. *ChemEngineering*, 6(6), 84. doi: [10.3390/chemengineering6060084](https://doi.org/10.3390/chemengineering6060084)
- [10] Akal, D., & Selvi, İ. (2023). Effects of clogged air filter on power, torque, fuel consumption and emissions



Numerical Analysis of the Effect of Rake Angle on Hydrodynamic and Hydroacoustic Performance of DTMB Marine Propeller

Mohammad Hossein Ghaedsharaf^{*1}, Ehsan Mehrabi Gohari², Mohammad Ali Ranjbar³

1. Ph.D Student, Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills, Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khatam al-Anbia Air Defense University, Tehran, Iran.

Abstract

The noise generated by marine propellers is one of the significant challenges in marine science and acoustics, affecting the performance of submarines and potentially leading to their detection and identification. One of the factors influencing the level of radiated noise is the geometric parameter of rake angle, which this article numerically analyzes regarding its impact on the hydrodynamic and hydroacoustic performance of the DTMB propeller. To this end, in addition to the baseline geometry with a rake angle of zero, four geometries with rake angles of -10° , -5° , $+5^\circ$, and $+10^\circ$ were designed. To validate the simulation, the results were compared with experimental data, and a grid independence analysis was performed. The simulation was conducted using the commercial Computational Fluid Dynamics software Siemens-Star CCM+, employing the $k-\omega$ SST turbulence model and the Ffowcs Williams-Hawkings (FWH) equations as primary tools for analyzing the acoustic behavior resulting from propeller movements. The results indicate that the rake angle simultaneously increases the thrust coefficient and torque coefficient of the propeller while decreasing its open-water efficiency, except at a rake angle of -10° , where its open-water efficiency was comparable to that of the baseline geometry without rake. Among the cases studied, the lowest sound pressure level (SPL) across most frequency ranges corresponded to a rake angle of -5° . Therefore, from a hydrodynamic performance perspective, a rake angle of -10° exhibited similar performance to the baseline geometry, while in terms of SPL, a rake angle of -5° was identified as the optimal condition examined.

Keywords

Marine propellers
Noise
Acoustics
DTMB propeller
rake angle

Received: 12.18.2024

Revised: 02.26.2025

Accepted: 03.09.2025

* Corresponding Author

Mohammad Hossein Ghaedsharaf

Email

mqaed1100@gmail.com

1- Introduction

This abstract summarizes a study on marine propeller design, exploring how different skew angles impact performance. The research aims to balance efficiency and noise reduction, which are crucial for marine applications

2- .Research Methods

The study used computational fluid dynamics (CFD) with the $k-\omega$ SST turbulence model and experimental validation. It analyzed propellers with

skew angles of -10° , -5° , 0° , $+5^\circ$, and $+10^\circ$, examining their hydrodynamic and acoustic characteristics

3- Findings

The results indicate that a -10° skew angle maintains efficiency at 66.41%, matching the baseline (0°), due to balanced thrust and torque increases. Other angles, like $+10^\circ$ at 62.25%, show reduced efficiency. For noise, -5° skew reduces sound



pressure levels by 2-3 dB compared to the baseline, while +10° increases noise due to flow disturbances.

4- Conclusion

This study highlights that skew angle adjustments can significantly influence propeller performance, offering a trade-off between efficiency and noise. It suggests tailoring designs to operational needs, with recommendations for further research to optimize real-world applications.

5- Detailed Analysis and Observations

This section provides a comprehensive examination of the study on marine propeller performance, focusing on the impact of skew angle on efficiency and noise levels. The analysis is based on the provided document, which appears to be a technical report or research paper, and aims to fulfill the request for a detailed abstract spanning the content of a 3-page article, with results explicitly mentioned at the end.

6- Background and Purpose

The study centers on optimizing marine propeller design, a critical aspect of naval architecture and marine engineering. The primary objective is to enhance hydrodynamic efficiency while reducing acoustic noise, which is vital for both fuel efficiency and environmental considerations, such as minimizing underwater noise pollution affecting marine life. The focus on skew angle, referred to as "kji" in the document, underscores its role as a geometric parameter influencing propeller performance. This aligns with broader industry trends toward quieter and more efficient propulsion systems, particularly in commercial shipping and naval vessels.

7- Methodology

The research methodology is robust, employing advanced computational tools and experimental validation. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted using the $k-\omega$ SST turbulence model, known for its accuracy in

capturing near-wall flow behaviors and turbulence effects. The study analyzed propellers with five distinct skew angles: -10°, -5°, 0° (baseline), +5°, and +10°. These configurations were chosen to cover a range of negative and positive skews, allowing for a comprehensive assessment of their impact. The simulation setup included detailed geometric modeling, with specific attention to mesh generation for grid independence and convergence criteria. Boundary conditions were defined to mimic real-world operating conditions, such as inflow velocity and pressure outlets. Experimental validation was also mentioned, likely involving physical testing in a cavitation tunnel or similar facility, to correlate numerical results with empirical data. This dual approach enhances the reliability of the findings, addressing potential limitations of purely numerical methods.

8- Key Findings and Results

The results section is pivotal, providing quantitative insights into how skew angle affects performance metrics. The document highlights the following:

- **Efficiency Analysis:** Efficiency, measured as open-water efficiency (η), was found to be most preserved at -10° skew, maintaining 66.41%, identical to the 0° baseline. This is attributed to a significant increase in thrust coefficient (KT) that offsets the torque coefficient (KQ) increase, as noted in Table 4 of the document. For other angles, efficiency decreases: +5° at 63.25%, -5° at 64.47%, and +10° at 62.25%. These reductions are linked to increased drag and less optimal flow alignment, leading to higher energy losses.
- **Noise Analysis:** Acoustic performance, measured by sound pressure levels (SPL), shows a clear gradient based on skew angle. The -5° skew angle is identified as the quietest, reducing noise by approximately 2-3 dB compared to the baseline across frequency ranges below 200 Hz and above, as seen in Figure 9. This is due to more uniform pressure distribution and reduced turbulence. Conversely, the +10° skew angle generates the highest noise, with significant pressure fluctuations and flow disturbances, indicating

greater acoustic energy release. The 0° and -10° configurations produce intermediate noise levels, with -10° being noisier than -5° but less than $+10^\circ$.

These findings suggest a trade-off: -10° skew prioritizes efficiency, while -5° prioritizes noise reduction. This trade-off is crucial for design decisions, depending on whether the application requires fuel efficiency (e.g., commercial shipping) or acoustic stealth (e.g., naval submarines).

9- Discussion and Implications

The discussion section likely elaborates on these results, emphasizing the practical implications. For instance, the -10° skew's ability to maintain efficiency at baseline levels could be advantageous for long-haul vessels where fuel costs are a major concern. Conversely, the -5° skew's noise reduction could be critical for environmentally sensitive areas

or military operations requiring low acoustic signatures. The document also mentions visualizations, such as pressure contours and velocity fields (Figures 6, 7, 8, 9), which likely illustrate these effects, providing visual evidence for the numerical data. The study concludes by suggesting further research to refine these parameters for real-world applications. This could involve testing under varying operational conditions, such as different speeds, depths, or sea states, to ensure robustness. It also hints at potential extensions, such as integrating these findings into broader propulsion system designs or exploring other geometric parameters like blade number or pitch.

10- Comparative Analysis

To organize the findings, the following table summarizes the efficiency and noise levels for each skew angle, based on the provided data:

Table 1: Comparative analysis of hydrodynamic parameters at various skew angles

Skew Angle	Efficiency (%)	Noise Level (Relative to Baseline)
-10°	66.41	Intermediate (noisier than -5° , less than $+10^\circ$)
-5°	64.47	Lowest (-2 to -3 dB)
0° (Baseline)	66.41	Baseline
$+5^\circ$	63.25	Higher than -5° , less than $+10^\circ$
$+10^\circ$	62.25	Highest (significant increase)

This table highlights the trade-offs, with -10° excelling in efficiency and -5° in noise reduction, providing a clear basis for design choices.

11- Conclusion and Recommendations

In conclusion, the study demonstrates that skew angle is a critical design parameter for marine propellers, influencing both hydrodynamic efficiency and acoustic performance. The results, presented at the end of this abstract, show that -10° skew maintains efficiency at 66.41% while -5° reduces noise by 2-3 dB, offering designers flexibility to prioritize based on operational needs. The recommendation for further research underscores the ongoing need to refine these

findings for practical implementation, ensuring that marine propulsion systems meet both efficiency and environmental standards.

12- References

- [1] V. Bertram, *Practical Ship Hydrodynamics*, Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [2] J. S. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 3rd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2012.
- [3] K. Richard and M. L. Munjal, "Noise radiation from noncavitating marine propellers – A state of the art report," 1980.

- [4] R. Parchen, "Noise production of ships propellers and waterjet installations at non-cavitating conditions," in *Proc. 34th WEGEMT School: Developments in the Design of Propulsors and Propulsion Systems*, 2000.
- [5] M. A. Chakab Faezi and P. Ghadimi, "Investigation of the effects of increasing blade number and use of duct on noise reduction," *Iranian Society of Acoustical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 16–23, 2014. (in Persian)
- [6] B. Mousavi, A. Rahrovi, and S. Kheradmand, "Numerical simulation of tonal and broadband noise," *Marine and Environmental Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 347–351.
- [7] K. Fujiyama and Y. Nakashima, "Numerical Prediction of Acoustic Noise Level Induced by Cavitation on Ship Propeller at Behind-Hull Condition," in *Proc. 5th Int. Symp. Marine Propulsion*.
- [8] M. Cianferra, A. Petronio, and V. Armenio, "Numerical prediction of ship propeller noise through acoustic analogy," in *Proc. 6th Int. Symp. Marine Propulsors*, 2019.
- [9] S. Sezen, A. Dogrul, and S. Bal, "Investigation of Marine Propeller Noise for Steady and Transient Flow," in *Proc. Yildiz Technical Univ. Istanbul, Turkey*, pp. 149–156, Jun. 2022.
- [10] E. Güngör, "Hydroacoustical Calculations on a Generic Underwater Vehicle Using Lighthill-Curle Formulations," in *Proc. 6th Int. Symp. Marine Propulsors*, 2019.
- [11] M. Chen et al. "Investigation into the hydrodynamic noise characteristics of electric ducted propeller," *J. Mar. Sci. Eng.* vol. 10, no. 3, p. 378, 2022. [Online]. Available: doi: [10.3390/jmse10030378](https://doi.org/10.3390/jmse10030378)
- [12] F. H. Lafeber et al. "Prediction of Underwater Radiated Noise from Propeller Cavitation During Concept Design," in *Proc. 7th Int. Symp. Marine Propulsors*, 2022.
- [13] T. A. Smith et al. "Propeller cavitation on small craft: Underwater noise measurements and visualisation from full-scale trials," *Ocean Eng.* vol. 317, p. 120024, 2025. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.oceaneng.2024.120024](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120024)
- [14] Z. Cheng et al. "Cavitating wake dynamics and hydroacoustics performance of marine propeller with a nozzle," *Phys. Fluids*, vol. 37, no. 1, 2025. [Online]. Available: doi: [10.1063/5.0188470](https://doi.org/10.1063/5.0188470)
- [15] Propulsor Committee, "Workshop Organized by 20th ITTC Propulsor," Seoul, Korea, 23 Aug. 1992.
- [16] M. Yadegari, "An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, no. 10, p. 1019, 2021. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01829-7](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01829-7)
- [17] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* vol. 42, pp. 1–15, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1007/s40430-020-02717-z](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02717-z)
- [18] H. Haghghatjoo, M. Yadegari, and A. B. Khoshnevis, "Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 137, no. 9, p. 1042, 2022. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-022-03143-w](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03143-w)
- [19] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, p. 1–19, 2021. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01195-4](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01195-4)
- [20] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 6, p. 534, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-020-00555-2](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00555-2)
- [21] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 7, p. 548, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-020-00583-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00583-y)

[22] Z. Mansouri, M. Yadegari, and A. B. Khoshnevis, "Numerical investigation of the effects of installing four trip wires with different diameters on the mean and fluctuation velocities and characteristics of the wake around the circular cylinder," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* vol. 45, no. 9, p. 459, 2023. [Online]. Available: doi: [10.1007/s40430-023-04539-1](https://doi.org/10.1007/s40430-023-04539-1)

[23] M. Sadeghi, M. Yadegari, and A. B. Khoshnevis, "Numerical investigation of the flow characteristics around two sequential cylinders with

circular and square cross-sections," *J. Mar. Sci. Technol.* pp. 1–18, 2024. [Online]. Available: doi: [10.1007/s00773-024-01087-8](https://doi.org/10.1007/s00773-024-01087-8)

[24] S. D. Jessup, "An experimental investigation of viscous aspects of propeller blade flow," Ph.D. dissertation, Catholic Univ. of America, 1989.

[25] P. J. Roache, "Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics," *Annu. Rev. Fluid Mech.* vol. 29, pp. 123–160, 1997. [Online]. Available: doi: [10.1146/annurev.fluid.29.1.123](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.123)



شبیه‌سازی عددی تأثیر زاویه کجی بر عملکرد هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پروانه

دریایی DTMB

محمدحسین قاندرشرف^{۱*}، احسان مهربابی گوهری^۲، محمدعلی رنجبر^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی، مجتمع مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ص)، تهران، ایران.

کلمات کلیدی

پروانه‌های دریایی

نویز

آکوستیک

پروانه DTMB

زاویه کجی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

*نویسنده مسئول

محمدحسین قاندرشرف

ایمیل

mqaed1100@gmail.com

چکیده

نویز تولیدشده توسط پروانه‌های دریایی یکی از چالش‌های مهم در علوم دریایی و آکوستیک است که بر عملکرد زیرسطحی‌ها تأثیر می‌گذارد و می‌تواند منجر به شناسایی و کشف آن‌ها شود. یکی از عواملی که بر میزان نویز انتشاری مؤثر است پارامتر هندسی زاویه کجی است که این مقاله به تحلیل عددی آب آزاد تأثیر آن بر عملکرد هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پروانه DTMB می‌پردازد. بدین منظور علاوه بر هندسه پایه با زاویه کجی صفر، ۴ هندسه با زوایای کجی -10° ، -5° ، $+5^\circ$ ، $+10^\circ$ طراحی گردید. به‌منظور صحت سنجی شبیه‌سازی انجام‌شده نتایج با نتایج تجربی موردقیاس قرار گرفت همچنین آنالیز استقلال حل از شبکه انجام شد. شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار تجاری دینامیک سیالات محاسباتی Siemens-Star CCM+ و با بهره‌گیری از مدل توربولانسی $k-\omega$ SST و معادلات فاکس ویلیامز-هاو کینگز (به‌اختصار FWH) به‌عنوان ابزار اصلی برای تحلیل رفتار صوتی ناشی از حرکات پروانه انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که زاویه کجی باعث افزایش ضریب تراست و ضریب گشتاور پروانه به‌طور هم‌زمان و کاهش راندمان آب آزاد پروانه می‌شود به‌جز در زاویه کجی -10° که مقدار راندمان آب آزاد آن تفاوتی با هندسه پایه بدون زاویه کجی نداشت. در بین حالات موردبررسی کمترین سطح فشار صوت در اغلب بازه‌های فرکانسی مربوط به زاویه کجی -5° بود. لذا از منظر عملکرد هیدرودینامیکی زاویه کجی -10° عملکردی مشابه هندسه پایه دارد و از منظر میزان سطح فشار صوت زاویه کجی -5° بهینه‌ترین موردبررسی بود.

۱- مقدمه

تحقیقات اخیر نشان داده که نویز پروانه‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد از جمله مشخصات هندسی پروانه، شرایط کاری و ویژگی‌های هیدرودینامیکی [۱]. گردابه‌های نوک تیغه پروانه یک اثر جانبی اجتناب‌ناپذیر از تولید نیروی لیفت یک ایرفویل با طول محدود هستند. یک ایرفویل به‌گونه‌ای طراحی شده است که اولاً فشار نسبتاً بالایی در جلو (سمت فشار) و فشار پایین‌تری در عقب (سمت مکش) داشته باشد. ثانیاً سیالی که از بالای ایرفویل عبور می‌کند زمانی که از لبه فرار خارج می‌شود به سمت پایین‌دست و دنباله هدایت شود (مشابه بالا رفتن بال پرنده به سمت بالا براساس قانون سوم نیوتن). این دو ویژگی ایرفویل باهم ترکیب می‌شوند تا سیال اطراف نوک تیغه را چرخش

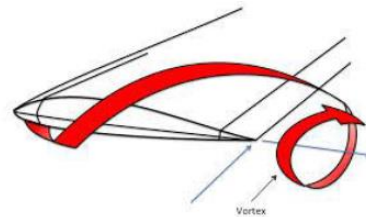
نویز تولیدشده توسط پروانه‌های دریایی یکی از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین مسائل در علوم دریایی و آکوستیک است. این نویز نه تنها بر عملکرد زیرسطحی‌ها تأثیر می‌گذارد بلکه می‌تواند منجر به کشف و شناسایی آن‌ها شود. پروانه‌ها به‌عنوان یکی از اجزای اصلی سیستم‌های رانش شناورها در حین حرکت در آب تغییرات فشار را ایجاد کرده و امواج صوتی را منتشر می‌کنند که این امواج ممکن است در محدوده شنوایی انسان یا فقط برای برخی از جانوران دریایی قابل‌شنیدن باشد [۱]. با توجه به اهمیت کاهش نویز پروانه‌ها در طراحی کشتی‌های نظامی و تجاری تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی هندسه پروانه و شرایط کاری آن‌ها در حال انجام است.



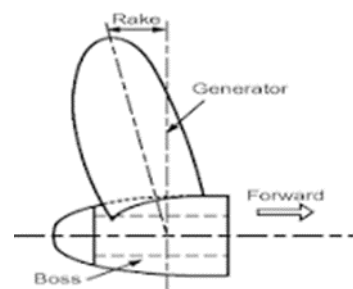
دماغه باشد با علامت مثبت و اگر به سمت عقب باشد با علامت منفی مشخص می‌شود.

اندازه‌گیری و تحلیل نویز پروانه‌ها به دو روش تجربی و عددی انجام می‌شود. روش‌های عددی به محققان این امکان را می‌دهند که با استفاده از شبیه‌سازی‌های پیشرفته میدان جریان اطراف پروانه را مدل‌سازی کنند و سپس با استفاده از معادلات آکوستیکی، سطح نویز تولیدشده را محاسبه نمایند. در این راستا معادلات FWH^2 به‌عنوان یکی از رایج‌ترین ابزارها برای محاسبه نویز پروانه‌ها شناخته می‌شوند. این معادلات به تحلیل رفتار صوتی ناشی از حرکات پروانه کمک کرده و نتایج قابل‌اعتمادی را ارائه می‌دهند. نویز گاهی اوقات به‌عنوان نوعی از صدای مزاحم و نامطلوب شناخته می‌شود ولی از نگاه آکوستیکی صدا و نویز یک پدیده مشابه هستند که از نوسان فشار (افزایش یا کاهش) نسبت به فشار اتمسفر متوسط اطراف جسم پدید می‌آیند. صدا یا نویز نتیجه تغییرات یا نوسانات فشار در محیط الاستیک رسانه (مثل هوا، آب و جامد) است که به‌وسیله دیواره لرزان یا جریان آشفته به وجود می‌آیند. کارایی یک زیرسطحی کاملاً به میزان و چگونگی طیف نویز آن وابسته است. انواع نویز در پروانه‌های دریایی را برحسب نحوه تولید می‌توان بدین‌صورت طبقه‌بندی کرد: الف. نویز ضخامت: جابجایی آب توسط پروفیل مقطع تیغه پروانه آب را در مسیر چرخش پروانه جابجا می‌کند. ب. نویز بارگذاری: در حین چرخش پروانه اختلاف فشار بین سطوح مکش و فشار پروانه وجود دارد. پ. چرخش تیغه‌ها در میدان متغیر دنباله پشت شناور نوساناتی در حجم حباب‌ها ایجاد می‌کند. ت. فروپاشی یک حباب کائیتاسیون یا گردابه. کائیتاسیون علت حالات پ و ت است. الف و ب می‌توانند هم در حالت کائیتاسیون و هم در حالت غیرکائیتاسیون رخ دهند [۳]. مکانیزم‌های تولید نویز برای یک پروانه که در رژیم غیرکائیتاسیون عمل می‌کند شامل نویز باند پهن (به دلیل ناپایداری لایه‌مرزی آرام یا خرد شدن گردابه، آشفتگی ورودی و آشفتگی سطحی) و نویزهای تونال (به دلیل مؤلفه‌های پایدار و نوسانی نیروی رانش و گشتاور و اثرات ضخامت) است. بنابراین تغییر شکل و اضمحلال گردابه‌ها می‌تواند بر نویز پروانه تأثیر بگذارد. در پروانه‌های دریایی نویز حاصل از نویز ضخامت از نوع تک‌قطبی است. این نویز در حالت کائیتاسیونی و غیرکائیتاسیونی وجود دارد. کائیتاسیون نیز از نوع منبع تک‌قطبی است که با نوسانات در سیال منجر به تولید نویز می‌شود. نویز بارگذاری تحت عنوان یک منبع دوقطبی شناخته می‌شود. منابع دوقطبی در دو حالت

دهند. سیال فشار بالای پایین تیغه به سمت بالا نشت کرده و بر روی نوک تیغه حرکت می‌کند و سپس به همراه بقیه سیال به سمت پایین هدایت می‌شود و گردابه نوک تیغه را ایجاد می‌کند. کم کردن اختلاف فشار بین سیال بالا و پایین تیغه بر اساس تعریف، نیروی لیفت را کاهش می‌دهد زیرا این اختلاف فشار است که نیروی لیفت را تولید می‌کند. به طریق مشابه کاهش پایین روی سیال از پشت تیغه نیز نیروی لیفت را کاهش می‌دهد زیرا نیروی ایجادکننده پایین روی، نیروی لیفت را بر روی تیغه تولید می‌کند. بنابراین ایرفویل‌های متعارف عموماً گردابه‌های نوک را تولید خواهند کرد. یک روش برای کاهش این گردابه‌ها این است که حرکت سیال به سمت بالا و بر روی نوک تیغه سخت‌تر شود. این اصل زمینه‌تئوری بالچه‌ها است که در بسیاری از هواپیماها دیده می‌شود. ایده‌ی زاویه کجی^۱ نوک ابتدا بر روی بال هواپیما اعمال شد (Clarence 1962 & Cone). این کجی مانع از حرکت هوای زیر بال به سمت بالای آن شد و بدین ترتیب شدت چرخش گردابه کاهش یافت که باعث کاهش درگ شد (شکل ۱).



شکل ۱: بالا آمدن جریان عبوری از سمت فشار ایرفویل بال هواپیما و ایجاد گردابه نوک [۲]



شکل ۲: نمایش زاویه کجی پروانه [۲]

بر این اساس اصلاحاتی با ایجاد زاویه کجی در نوک پره برخی پیشران‌های دریایی ایجاد شد. زاویه کجی در پروانه عبارت است از انحراف یا شیب پره‌ها به سمت عقب یا جلوی دماغه. در دید از بغل به پروانه نیز به‌صورت فاصله از خط عمود یا زاویه آن تعریف می‌شود. در شکل ۲ این پارامتر نشان داده شده است. اگر زاویه به سمت جلو و

² Ffowcs williams-hawkings

¹ Rake angle

توسعه کشتی ارزیابی کرده است. یکی از نتایج فوجیاما این است که نتایج روش FWH تقریباً برابر با تجزیه و تحلیل مستقیم توزیع فشار بود. بنابراین این روش، روش مناسبی به‌ویژه برای پیش‌بینی‌های میدان دور نویزهای کاویتاسیونی است. مارتا سیانفریا [۸] در سال ۲۰۱۹ مطالعاتی بر روی پیش‌بینی عددی نویز پروانه کشتی از طریق قیاس صوتی انجام داده است. این کار یک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی از میدان نویز ایجادشده توسط یک پروانه دریایی در شرایط آب آزاد است. پروانه در نظر گرفته‌شده یک پروانه معیار است که نتایج عددی و تجربی آن در مقالات متفاوت ارائه شده است. میدان آکوستیک توسط معادله FWH استخراج شده است که از اصطلاحات سطح و حجم تشکیل شده است که مکانیسم‌های مختلف تولید نویز را نشان می‌دهد. با جداسازی سهم هر عبارت نشان داده می‌شود که گردهای جداشده از شفت منبع قابل توجهی از نویز فرکانس‌های پایین را تشکیل می‌دهد. ارتور لیدتک و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۹ بر روی مدل‌سازی آکوستیک پروانه در معرض جریان غیریکنواخت مقاله‌ای ارائه داده‌اند. در این مقاله بیان می‌شود که درک نویز تابش شده از پروانه‌های دریایی از نقطه نظر کاهش آلودگی صوتی و اجتناب از کشف مورد توجه است. در مرحله طراحی می‌توان با استفاده از ابزارهایی مانند معادلات FWH به این امر دست‌یافت. با این حال این موارد هنوز به‌طور گسترده مورد پذیرش قرار نگرفته‌اند و به‌طور کامل برای پیکربندی‌های واقعی در زمینه دریایی آزمایش نشده‌اند. کاری که در این مقاله انجام گرفته است یک مطالعه سیستماتیک از استفاده از روش FWH همراه با یک حل‌کننده RANS برای پروانه INSEAN E779A در میدان دنباله در شرایط کاویتاسیونی و غیرکاویتاسیونی می‌باشد. گنگور [۱۰] در سال ۲۰۱۹ مطالعه را بر روی محاسبات هیدروآکوستیک برای یک وسیله زیرآبی با استفاده از فرمولاسیون لایتهیل انجام داده است. در این مقاله محاسبات هیدروآکوستیک بر روی یک وسیله زیرآبی و سیستم رانش آن با استفاده از حل‌کننده‌های عددی انجام شده است. سطح فشار صوت^۴، جهت‌گیری صدا، طیف صوتی و الگوهای صوتی با کمک روش حجم محدود و روش لایتهیل بررسی شده‌اند. به‌منظور اعتبارسنجی این روش‌های محاسبه، نتایج با نمونه‌های آزمایشی مقایسه می‌شوند که در آن داده‌های فشار با استفاده از مبدل‌های فشار و هیدروفون‌ها به‌دست‌آمده‌اند. برای تعیین نوع حل‌کننده مناسب، روش گسسته‌سازی، اندازه مش و معادلات حاکم، اعتبارسنجی‌ها در دو مرحله محاسبات هیدروآکوستیک و آکوستیک انجام شده‌اند. در این

کاویتاسیونی و غیرکاویتاسیونی می‌تواند وجود داشته باشند. در حالت غیرکاویتاسیونی مهم‌ترین منبع تولید نویز پروانه نویز بارگذاری است. نوع دیگر نویز پروانه نویز ناشی از توربولانس و تنش برشی در سیال است که در واقع به‌صورت ۲ عدد دوقطبی که در مجاور یکدیگر قرار گرفته‌اند عمل می‌نماید و به چهار قطبی معروف است [۴]. همان‌گونه که شرح داده شد اعمال زاویه کجی در هندسه پروانه‌ها می‌تواند باعث جلوگیری از بالاروی جریان از تیغه پروانه و عبور آن از سمت فشار پروانه و ایجاد گردابه نوک پروانه گردیده و جهت بهبود پارامترهای هیدروآکوستیک پروانه‌ها کاربرد داشته و رایج است. از این رو در این پژوهش تأثیر اعمال این مشخصه هندسی بر خصوصیات هیدروآکوستیکی و هیدروآکوستیک پروانه DTMB^۳ به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است.

۲- سابقه برخی تحقیقات و مطالعات انجام گرفته

قدیمی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۴ نویز یک پروانه پنج پره سری B درون یک داکت را با استفاده از حل معادلات RANS به روش دینامیک سیالات محاسباتی و به‌کارگیری معادلات FWH به دست آوردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از داکت علاوه بر اصلاح جریان حول پروانه از وقوع کاویتاسیون و نوسانات تراست جلوگیری می‌کند که باعث کاهش نویز می‌شود. موسوی و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۴ به بررسی عددی هیدروآکوستیکی و آکوستیکی پروانه DTMB 4119 با استفاده از حل معادلات RANS در نرم‌افزار OPEN FOAM پرداختند. توزیع فشار آکوستیکی و نویز در میدان اطراف پروانه از طریق معادلات FWH تعیین شده است. نتایج عددی به‌دست‌آمده اعم از نویز پروانه مذکور در ضرایب پیشروی متفاوت با نتایج سول و همکاران در سال ۲۰۰۵ مقایسه و صحت‌سنجی شده است. نتایج نشان‌دهنده حداکثر تراز شدت صورت در فرکانس‌های گذر پروانه در ضرایب پیشروی مختلف است. فوجیاما [۷] در سال ۲۰۱۷ بر روی عنوان پیش‌بینی عددی سطح نویز صوتی ناشی از کاویتاسیون در پروانه کشتی در شرایط پشت بدنه مقاله‌ای ارائه داده است. در این مقاله آنالیز جریان کاویتاسیون ناپایدار انجام گرفته و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نویز ناشی از کاویتاسیون استخراج شده است. همچنین نتایج ناشی از روش‌های پیش‌بینی نویز ناشی از کاویتاسیون را در مقایسه با نتایج تجربی بررسی کرده است. در نهایت پتانسیل روش دینامیک سیالات محاسباتی را برای ابزارهای طراحی

^۴ SPL: sound pressure level

^۳ David taylor model basin

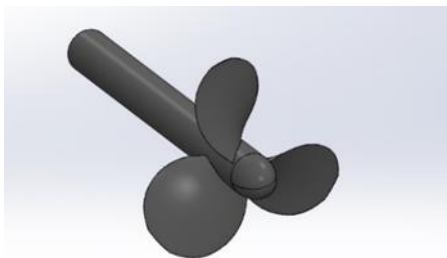
DES و معادله FWH برای هیدروآکوستیک ارائه دادند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که انتشار نویز به سمت میدان دوردست عمدتاً تحت تأثیر اثرات غیرخطی صوتی مرتبط با دینامیک دنباله است. ثابت شده است که وضعیت انتشار به میدان دوردست بسیار زودتر در شرایط دریافت نسبت به شرایط جریان محوری حاصل می‌شود و حضور جریان جانبی باعث افزایش نویز پروانه می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده، نگارندگان این مقاله مؤید این است که مقایسه عددی تأثیر زاویه کجی هم از منظر هیدرودینامیکی و هم منظر هیدروآکوستیکی به صورت هم‌زمان در پژوهشی انجام‌نشده و با توجه به گستردگی استفاده از زاویه کجی در هندسه پروانه‌ها نتایج این پژوهش می‌تواند مورد استفاده سایر پژوهشگران و علاقه‌مندان قرار گیرد.

۳- هندسه مورد استفاده

هندسه پایه مورد استفاده در شبیه‌سازی یک پروانه دریایی ۳ پره DTMB 4119 است که در ایالات متحده طراحی شده و چندین سال است که به‌طور گسترده مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفته است. پارامترهای اصلی این پروانه در جدول ۱ و هندسه پروانه در شکل ۳ نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر زاویه کجی علاوه بر هندسه پایه که فاقد زاویه کجی است ۴ هندسه دیگر با زوایای کجی 10° ، 5° ، 0° ، $+5^\circ$ ، $+10^\circ$ طراحی و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند.

جدول ۱: مشخصات هندسی پروانه DTMB 4119 [15]

مشخصه	اندازه
قطر (سانتی‌متر)	30.48
تعداد تیغه‌ها	3
زاویه اسکيو در نوک پره (درجه)	0
زاویه کجی اعمالی در نوک پره (درجه)	$r/R=0.8$ در $-10, -5, 0, +5, +10$



شکل ۳: شمای هندسه پایه پروانه DTMB 4119

۴- روش شبیه‌سازی عددی

۴-۱- معادلات حاکم اصلی

در این پژوهش سیال عامل به‌صورت تراکم ناپذیر و همگن، نیوتنی و ناپایا در نظر گرفته شده است. از نیروهای بدنه و شتاب جاذبه و انتقال

مطالعه پروانه ۴۳۸۲ تحت یک جریان همگن با نرخ‌های چرخش و سرعت‌های ورودی متفاوت قرار گرفته و مدل LES برای حل کمیت‌های آشفتگی در معادلات پیاده‌سازی شده است. نتایج تراست و گشتاور با محدوده خطای کم به‌خوبی مطابقت دارند. منگ فی چن و همکاران [۱۱] در ۲۰۲۲ مشخصه‌های نویز هیدروآکوستیکی پروانه داکت‌دار الکتريکی را هم به‌صورت عددی و هم از طریق شبیه‌سازی عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی بررسی نمودند. نویز پروانه در تمام شرایط کاری ویژگی‌های ۲ قطبی را نشان می‌دهد. سطح کل فشار صوتی نویز هیدرودینامیکی در شرایط بهینه کارایی (سرعت ناوبری ۱/۵۴ متر بر ثانیه) کمترین مقدار را دارد. در سرعت‌های ناوبری بالا، ویژگی‌های فرکانس پایین زیر فرکانس عبور تیغه افزایش‌یافته و دامنه بزرگ‌تر می‌شود. این نشان می‌دهد که مؤلفه نویز آشفته با افزایش سرعت پیش‌روندگی اهمیت بیشتری پیدا کرده و با آن متناسب است. هندریک و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۲ بر روی پیش‌بینی نویز تابشی زیر آب از کاویتاسیون پروانه در طول طراحی مفهومی مطالعاتی انجام دادند. مدل‌های محاسباتی نیمه تجربی برای پیش‌بینی کاویتاسیون در نقطه طراحی پروانه‌ها در شرایط آب آزاد منتشر شده است، اما مدل‌هایی که نویز زیرآبی پروانه‌ها در شرایط آب آزاد و در شرایط خارج از طراحی را پیش‌بینی کنند وجود ندارد. پروژه اتحادیه اروپا NAVIS 1 دو نوع کشتی را در نظر گرفت که زمان زیادی را در شرایط غیر طراحی به کار می‌گذرانند و بنابراین احتمالاً چندین شکل مختلف کاویتاسیون پروانه را تجربه می‌کنند. در این مطالعه هندریک و همکاران مدل‌های نیمه تجربی جدیدی را مورد بحث قرار می‌دهند که همراه با یک روش المان مرزی برای پیش‌بینی نویز از این اشکال کاویتاسیون استفاده می‌شوند. تی ای اسمیت و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۵ با بررسی داده‌های دو آزمایش تا نشان دادند که چگونه کاویتاسیون بر روی قایق‌های کوچک توسعه می‌یابد و چگونه این موضوع به سطوح نویز کمک می‌کند. فیلم‌های دوربین با اندازه‌گیری‌های هیدروفون ترکیب‌شده تا سرعت شروع کاویتاسیون تعیین شود و این نشان می‌دهد که کاویتاسیون گردابه‌ای نوک تیغه می‌تواند در سرعت ۵ نات ظاهر شود. ظهور کاویتاسیون با افزایش شدید سطح نویز انتشاری از زیر سطح آب همراه است همچنین نویز با فرکانس بالا ناشی از کاویتاسیون ابری به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از کاویتاسیون گردابه نوک تیغه، با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. زی چنگ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۵ تحلیلی از نویز تولیدشده توسط یک پروانه دریایی در جریان مایل را با استفاده از مدل توربولانسی

سطوح صاف به‌خوبی کالبره شده است و به دلیل این مزایا در این پژوهش از این مدل توربولانسی استفاده شده است [۲۳-۱۹].

۴-۳- حل گر هیدروآکوستیکی

رابطه پایه آکوستیک رابطه لایتهیل است که دربرگیرنده منابع شار جرم، نرخ نیروی اعمالی و تنش برشی در سیال است. رابطه لایتهیل با فرض خطی بودن رابطه تنش- کرنش، ثابت بودن سرعت صوت در سیال و صرف‌نظر کردن از تغییرات مکانی کمیت‌های سیال (فشار، چگالی و دما) به دلیل کوچک بودن آن‌ها به رابطه معادل فشار آکوستیکی تبدیل می‌شود:

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c^2} \ddot{p}' = \dot{q}' + \nabla \cdot f' + \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (۳)$$

هر یک از ترم‌های تانسور تنش لایتهیل نشان‌دهنده یکی از منابع تولید صوت است. ترم اول \dot{q}' بیان‌کننده تزریق جریان جرمی و یا حجمی غیر پایا به داخل سیال می‌باشد که به‌عنوان منبع نویز تک‌قطبی عمل می‌کند. برای منابع تک‌قطبی می‌توان به نوسانات حباب‌های موجود در سیال و کاویتاسیون اشاره کرد. انتشار صوت از تک‌قطبی‌ها در همه جهات یکسان است. ترم دوم $\nabla \cdot f'$ دیورژانس نیروی ناپایای اعمالی به سیال است که در بعضی از شرایط مرزی به سیال برمی‌گردد و به‌عنوان منبع نویز دوقطبی عمل می‌کند. منابع دوقطبی به‌صورت حرکت انتقالی ساده در سیال تغییر مکان می‌دهند. ترم سوم دربردارنده تنش توربولانس در داخل خود سیال است که توسط لایتهیل به دست آمد. وی نشان داد که این نوع منبع دارای خاصیت چهار قطبی است. چهار قطبی‌ها علاوه بر حرکت انتقالی حرکت چرخشی نیز دارند. معادله لایتهیل اگرچه مقدار فشار آکوستیکی را به‌طور دقیق برحسب مشخصه‌های جریان و سیال بیان می‌کند اما حل این معادله جز در موارد خاص قابل‌دسترس نیست. محققانی که در زمینه آکوستیک فعالیت می‌کرده‌اند همواره سعی در حل کامل این معادله داشته‌اند. یکی از حل‌های ساده تحلیلی که برای معادله لایتهیل ارائه شده است، حل انتگرالی آن است. این روش حل نخستین بار توسط فاکس ویلیامز و دیوید هاوکینگز پیشنهاد شد و برای به دست آوردن فشار آکوستیکی در میدان دور قابل استفاده است. آنالوژی صوتی FWH برای پیش‌بینی نویز ناشی از جریان‌های آشفته استفاده می‌شود. معادله FWH شامل منابع سطحی (منابع تک‌قطبی یا ضخامت و منابع دوقطبی یا بارگذاری) و منابع چهارقطبی است. معادله FWH به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

حرارت چشم‌پوشی شده است. برای یک سیال تراکم‌ناپذیر و تک‌فاز، معادلات حاکم برای URANS را می‌توان به‌صورت بقای جرم و مومنتوم به شکل تانسوری زیر نوشت:

عنوان مقاله باید حداکثر شامل ۱۵ کلمه بوده و تمامی ویژگی‌های تحقیق انجام‌شده را نیز مشخص کند. در عنوان مقاله باید از ذکر مخفف کلمات اجتناب شود [۳].

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) + S_M \quad (۲)$$

ρ ، $j=1,2,3$ ، $i=1,2,3$ گالی سیال است و x_j اجزای مختصات دکارتی هستند. برای مختصات ثابت S_M برابر با صفر، U_j و U_i مؤلفه سرعت مطلق را نشان می‌دهد. برای مختصات مرجع دوار نسبی، S_M مجموع مؤلفه کوریولیس ($2\omega \times U$) و مؤلفه نیروهای گریز از مرکز ($\omega \times (r \times \omega)$) و U_i و U_j مؤلفه سرعت نسبی است. μ ویسکوزیته دینامیک، P و U به ترتیب نشان‌دهنده فشار و سرعت متوسط گیری شده به‌صورت زمانی هستند و $\rho \overline{u_i u_j}$ نیز تنش‌های رینولدز را نشان می‌دهد.

۴-۲- مدل توربولانسی

مدل‌های توربولانسی با معرفی یک ویسکوزیته توربولانسی μ به محاسبه تنش‌های رینولدز می‌پردازند. در این پژوهش از مدل توربولانسی $k-\omega$ SST استفاده شده است. در بین مدل‌های دو معادله‌ای، مدل $k-\omega$ نسبت به مدل $k-\varepsilon$ مزایای متعددی دارد. برجسته‌ترین مزیت آن در انتگرال‌گیری از این مدل بدون مؤلفه‌های اضافی در زیرلایه ویسکوز می‌باشد. این مسئله منجر به غیرحساس شدن رفتار y^+ و سرراست شدن آن شده است. به‌علاوه مدل $k-\omega$ SST در پیش‌بینی جدایش و گردان فشار ناخواسته، بهتر عمل می‌کند [۱۸-۱۶]. از جمله معایب معادله $k-\omega$ Standard، حساسیت شدید حل به مقدار جریان آزاد k و ω در بیرون لایه برشی است. به این دلیل استفاده از مدل $k-\omega$ Standard توصیه نمی‌شود. مدل‌های $k-\omega$ BSL و $k-\omega$ SST، با ترکیب مؤلفه‌های معادلات ω و ε برای اجتناب از حساسیت به جریان آزاد در مدل $k-\omega$ Standard طراحی شده‌اند. همچنین مدل $k-\omega$ SST جهت محاسبه دقیق جدایش از

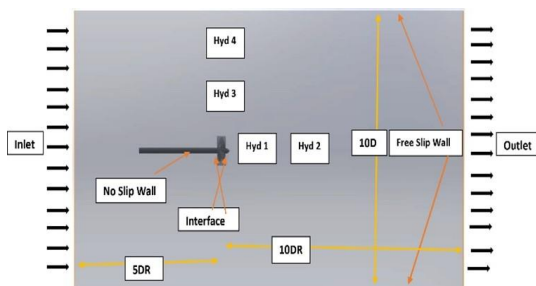
۵- پارامترهای عملکردی

برای بررسی عملکرد هیدرودینامیکی سیستم‌های رانش دریایی ضرایب بی‌بعدی به شرح زیر تعریف شده‌اند: [۲]

$$J = \frac{V_A}{nD} K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \eta_o = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (10)$$

۵-۱- گره محاسباتی و تنظیمات شبیه‌سازی عددی:

کل حوزه محاسباتی به دو زیر دامنه تقسیم می‌شود، دامنه دوار و دامنه ثابت خارجی. دامنه خارجی دارای بخش مشابه تونل کاویتاسیون و طول 15D است. پروانه در فاصله 5D از ورودی قرار می‌گیرد. همه زیر دامنه‌ها دارای مش بی‌سازمان و چندوجهی هستند. در نزدیکی دیواره‌ها ارتفاع لایه‌های اول از زیر لایه‌های لایه‌مرزی با مقدار y^+ در محدوده ۵ تا ۳۰ محاسبه می‌شود که مناسب حل‌کننده URANS با مدل آشفتگی SST k- ω می‌باشد. جریان یکنواخت بالادست با مقدار سرعت V مربوط به ضریب پیشروی J و شدت اغتشاش ۱٪ روی مرز ورودی تنظیم شده است. یک شرط مرز خروجی فشار به خروجی با فشار ثابت P_{out} در نظر گرفته می‌شود. دیوار میدان دوردست به‌عنوان دیوار با تنش برشی صفر تنظیم شده است. تمام شبیه‌سازی‌های هیدروآکوستیکی به‌صورت ناپایا توسط Siemens-Star CCM+ انجام می‌شود. سیال عامل آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. گام زمانی نیز از رابطه $\Delta t = 1/360n$ که n سرعت دورانی برحسب دور بر دقیقه است محاسبه شده است. سرعت دورانی 10 دور بر دقیقه ثابت و ضریب پیشروی 0.833 در نظر گرفته شده است. سرعت صوت در آب ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. فشار مرجع برای سطح فشار صوت برابر با ۱ میکرو پاسکال است. کیفیت یک از زیر دامنه‌های محاسباتی بیش از ۰/۵ است. گیرنده‌ها (هیدروفن‌ها) در چهار نقطه بالا و پشت پروانه در محورهای X و Z تنظیم شده‌اند. شماتیک دامنه حل، شرایط مرزی و موقعیت گیرنده‌ها شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: دامنه حل، شرایط مرزی و موقعیت گیرنده‌ها

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 \bar{T}_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} [P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i}] + \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 v_i \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i}] \quad (4)$$

که در آن p' سطح فشار منبع در میدان دور است و c سرعت صوت در میدان دور است \bar{T}_{ij} تانسور تنش لایتهیل است. سایر عبارات در سمت راست معادله به ترتیب منابع چهارقطبی، تک‌قطبی و دوقطبی هستند:

$$\rho u_i u_j + \delta_{ij} (p - \rho c^2) + \tau_{ij} = \bar{T}_{ij} \quad (5)$$

ترم‌های این رابطه به ترتیب شامل نوسانات سرعت آشفته (تنش‌های رینولدز)، ترم وابسته به تغییرات در فشار و چگالی و ترم وابسته به تانسور تنش برشی هستند. از آنجاکه منطقه منبع به‌طور صوتی فشرده است و ناظر در میدان دور قرار دارد، از FWH غیرقابل نفوذ استفاده می‌شود. فرمولاسیون Farassat 1A به‌عنوان یک روش توصیه‌شده برای پروانه‌های دریایی استفاده شده است. میدان فشار در فرمولاسیون Farassat با صرف‌نظر کردن از منابع چهار قطبی در رابطه فشار آکوستیکی کل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p'(\bar{x}, t) = p'_T(\bar{x}, t) + p'_L(\bar{x}, t) \quad (6)$$

که در آن p' فشار صوتی، p'_L و p'_T میدان فشار صوتی ناشی از ضخامت (تک‌قطبی) و بارگذاری (دوقطبی) هستند. مؤلفه‌های نویز ضخامت و بارگذاری توسط معادله‌های ۷ و ۸ تعریف می‌شوند:

$$4\pi p'_T(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho \dot{v}_n}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho v_n (r \dot{M}_i \hat{r}_i + c M_r - c M^2)}{r^2 (1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (7)$$

$$4\pi p'_L(x, t) = + \int_{f=0} \left[\frac{p(\cos \theta - M_i n_i)}{r^2 (1-M_r)^2} + \frac{(M_r - M^2) \rho \cos \theta}{r^2 (1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (8)$$

با تعیین فشار آکوستیکی، تراز شدت صوت بر اساس معادله ۹ تعیین می‌گردد.

$$SPL = 20 \log(P/p_{ref}) \quad (9)$$

P فشار آکوستیکی، p_{ref} فشار آکوستیکی مرجع و سطح فشار صوت تراز شدت صوت در فرکانس مشخص است. با استفاده از این فرمولاسیون می‌توان نویز حاصل از حرکت یک پروانه درون آب را به‌صورت عددی محاسبه کرد.

۶- صحت سنجی شبیه‌سازی عددی

به‌منظور صحت سنجی روش شبیه‌سازی عددی هندسه پایه پروانه DTMB4119 انتخاب گردیده است. به‌منظور تولید شبکه و شبیه‌سازی میدان جریان سیال اطراف پروانه از یک دامنه حل استوانه‌ای استفاده شد. مرز ورودی جریان در فاصله 5D از پروانه در جریان بالادست، مرز خروجی جریان در فاصله 10D از پروانه در جریان پایین‌دست و قطر مرز جانبی استوانه 5D در نظر گرفته شده که D قطر پروانه است. برای بحث و بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی، جریان به‌صورت سه‌بعدی، کاملاً متلاطم، تراکم‌ناپذیر و برای شرایط بدون کاویتاسیون ثابت در نظر گرفته می‌شود. مدل k- ω SST به‌عنوان مدل آشفتگی انتخاب شده است. میدان فشار با استفاده از الگوریتم ساده که مبتنی بر کوپل فشار - سرعت است حل شده است. سطوح ورودی و خروجی به ترتیب به‌عنوان شرط مرزی ورودی سرعت و شرط مرزی خروجی فشار تعریف شده‌اند. پس از ایجاد هندسه مدل، شبکه‌بندی و تعیین شرایط مرزی و فیزیکی حل مسئله با ۱۰۰۰ تکرار شروع می‌شود. در جدول ۲ نتایج ضرایب تراست و گشتاور در مقایسه با داده‌های تجربی [۲۴] در ضرایب پیشروی مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد ماکزیمم خطا در ضریب تراست ۱۰/۵ درصد و در ضریب گشتاور ۹/۸ درصد می‌باشد که محدوده قابل قبولی می‌باشد.

جدول ۲: نتایج حل عددی ضریب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف در مقایسه با داده‌های تجربی [۲۴]

J	K_T	K_Q	درصد میزان خطا K_T	درصد میزان خطا K_Q
۰/۵	۰/۲۸۳۰	۰/۰۴۸۳	۰/۷۴	۴/۴۶
۰/۷	۰/۱۹۶۰	۰/۰۳۶۷	۵/۳	۱/۱۳
۰/۸۳۳	۰/۱۳۹۲	۰/۰۲۷۱	۱۰/۰۱	۳/۲۰
۰/۹	۰/۱۱۰۰	۰/۰۲۴۸	۹/۶۰	۲/۱۷
۱/۱	۰/۰۳۳۱	۰/۰۱۰۱	۱۰/۵۴	۹/۸۲

۷- آنالیز استقلال حل از تعداد گره محاسباتی:

در همه شبیه‌سازی‌های عددی لازم است تا از عدم وابستگی نتایج به تعداد و نوع گره‌های محاسباتی تولیدشده اطمینان حاصل نمود. در این زمینه از روش شاخص همگرایی شبکه برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه استفاده می‌شود. این روش نخستین بار توسط رچ [۲۵] به‌منظور ارزیابی خطای گسسته‌سازی و عدم قطعیت‌های

عددی ارائه شد. برای استفاده از این روش حداقل به ۳ شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف نیاز است. این ۳ شبکه با اسامی S1, S2, S3 با تعداد المان‌های N1, N2, N3 از ریزترین (۱) تا درشت‌ترین (۳) شبکه نام‌گذاری می‌شوند. فاکتور ریز کردن شبکه (r) به‌صورت معادله (۱۱) تعریف می‌شود.

$$r_{21} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^{1/3} \quad (11)$$

در صورتی که $r > \sqrt{3}$ باشد خطای برون‌یابی کاهش می‌یابد [۲۵]. طبق روش رچ، نسبت همگرایی به‌صورت معادله (۱۲) تعریف می‌شود. η_1 ، η_2 و η_3 راندمان آب آزاد برای سه حالت هستند:

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_3 - \eta_2} \quad (12)$$

در این معادله ε_{ij} بیانگر اختلاف نتایج به‌دست‌آمده از حل با شبکه i است. برای نسبت همگرایی سه حالت زیر متصور است:

- R > 1 واگرایی شبکه
- R < 0 همگرایی نوسانی
- 0 < R < 1 همگرایی یکنواخت شبکه

هنگامی که حل انجام‌شده با شبکه‌های موردبررسی در وضعیت همگرایی باشد، برون‌یابی ریچاردسون برای تخمین شدت همگرایی استفاده می‌شود. مرتبه دقت این الگوریتم طبق معادله (۱۳) محاسبه می‌شود که همان ضریب ریز شدن شبکه است که پیش‌از این تعریف شد.

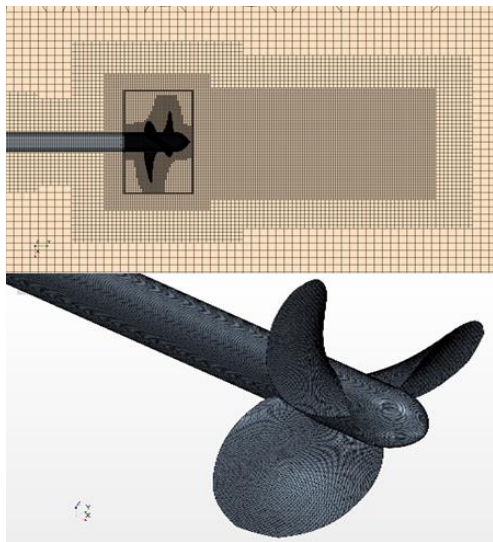
$$p = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right)}{\ln(r)} = \frac{\ln\left(\frac{\eta_3 - \eta_2}{\eta_2 - \eta_1}\right)}{\ln(r)} \quad (13)$$

در نهایت، شاخص همگرایی شبکه با استفاده از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود. در این معادله ضریب FS ضریب اطمینان همگرایی بوده و مقدار آن برابر با FS=1.25 پیشنهاد شده است [۲۵]. همچنین در این معادله نماد $|\varepsilon_{ij}|$ خطای نسبی تقریبی است.

$$GCI_{fine} = F_s \frac{|\varepsilon_{12}|}{r^p - 1} = \frac{F_s}{(r^p - 1)} \left| \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \right| \quad (14)$$

$$GCI_{coarse} = F_s r^p \frac{|\varepsilon_{23}|}{r^p - 1} = \frac{F_s r^p}{(r^p - 1)} \left| \frac{\eta_2 - \eta_3}{\eta_2} \right|$$

همچنین GCI_{fine} و GCI_{coarse} به ترتیب عبارتند از 0.410 و 0.412 که مقادیر کوچک و مطلوبی هستند و همچنین نسبت همگرایی R برابر $1/0.7$ که مقداری نزدیک به عدد ۱ و نشان‌دهنده همگرایی شبکه است. لذا مقدار $\Delta s_2 = 0.050$ جهت شبکه‌بندی در کلیه حالات انتخاب گردید. نمونه‌ای از شبکه‌بندی انجام‌شده در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵: شمای هندسه شبکه‌بندی شده

۸- بحث و نتایج:

آنچه از نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود کاهش راندمان آب آزاد به علت وجود زاویه کجی است به جز حالت 10° که تفاوتی با میزان حالت بدون زاویه کجی ندارد. دلیل کاهش راندمان آب آزاد افزایش ضریب گشتاور است. لازم به ذکر است که در حالت زاویه کجی 10° به علت افزایش قابل توجه ضریب تراست، افزایش ضریب گشتاور بر راندمان آب آزاد بی‌تأثیر بوده است. نتایج در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج پارامترهای هیدرودینامیکی در حالات مختلف زاویه کجی

پارامتر/حالت	K_T	K_Q	η_0
0°	0.118	0.0236	66.41
-5°	0.123	0.0259	64.47
$+5^\circ$	0.114	0.0242	63.25
-10°	0.137	0.0274	66.41
$+10^\circ$	0.117	0.0248	62.25

بررسی کانتورهای فشار ۵ حالت مورد بررسی نشان می‌دهد در سمت مکش و فشار حالت 10° - بیشترین اختلاف فشار وجود دارد. اختلاف فشار بیشتر موجب افزایش ضریب تراست و نهایتاً افزایش

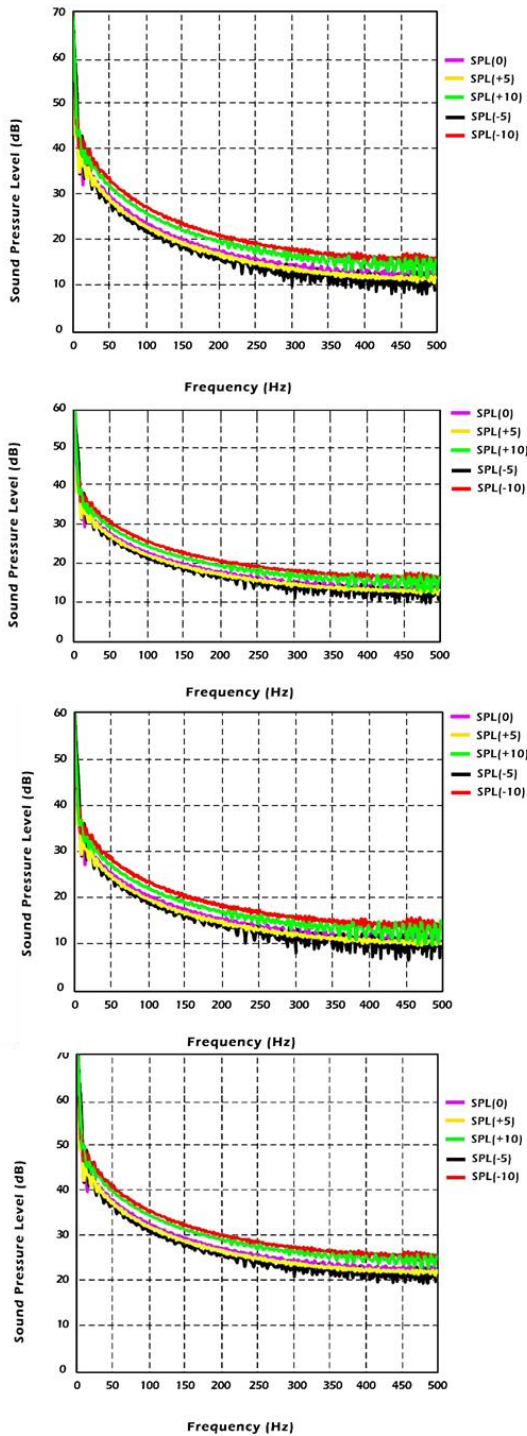
GCI_{fine} شاخص همگرایی برای شبکه ریز، GCI_{coarse} شاخص همگرایی برای شبکه درشت، η راندمان، τ ضریب ریز شدن شبکه، F_s ضریب اطمینان همگرایی و P مرتبه دقت است. شاخص همگرایی شبکه نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده چه میزان از مقدار دقیق فاصله دارد. به بیان دیگر این روش تغییرات نتایج را با ریزتر شدن شبکه نشان می‌دهد. مقادیر کوچک این کمیت نشان می‌دهد که ریزتر شدن بیشتر شبکه دیگر تأثیری بر بهبود نتایج نخواهد داشت. شبکه‌های محاسباتی با کاهش و افزایش ارتفاع شبکه‌های لایه اول (Layer Height First) بازسازی می‌شوند. جهت آنالیز استقلال حل از شبکه و بر اساس y^+ برابر ۳۰ ضخامت اولین لایه 0.65 میلی‌متر به عنوان شبکه درشت، مقدار 0.50 به عنوان شبکه متوسط و بر اساس y^+ برابر ۵ مقدار 0.35 به عنوان شبکه ریز انتخاب می‌شود. شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیکی در دو مقدار ضریب پیشروی 0.833 و 0.9 برای شبکه‌های ریز، متوسط و درشت انجام شد که نتیجه در جدول ۳ قابل مشاهده است. تعداد لایه‌ها برای مش لایه مرزی ۱۰ عدد انتخاب شده است.

جدول ۳: نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای ضریب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف

ضریب پیشروی	First Layer Height	تعداد سلول (میلیون)	K_T	K_Q
J=0.8 33	$\Delta s_1 = 0.065$	$N_1 = 5.8$	$K_{T1} = 0.1571$	$K_{Q1} = 0.0321$
	$\Delta s_2 = 0.050$	$N_2 = 9.4$	$K_{T2} = 0.1550$	$K_{Q2} = 0.0309$
	$\Delta s_3 = 0.035$	$N_3 = 12.5$	$K_{T3} = 0.1542$	$K_{Q3} = 0.0301$
J=0.9	$\Delta s_1 = 0.065$	$N_1 = 5.8$	$K_{T1} = 0.1263$	$K_{Q1} = 0.0278$
	$\Delta s_2 = 0.050$	$N_2 = 9.4$	$K_{T2} = 0.1242$	$K_{Q2} = 0.0267$
	$\Delta s_3 = 0.035$	$N_3 = 12.5$	$K_{T3} = 0.1237$	$K_{Q3} = 0.0262$

پس از مش زدن توسط نرم‌افزار، مش هدف سطح برای حالت $\Delta s_1 = 0.065$ برابر 0.00085 میلی‌متر، حالت $\Delta s_2 = 0.050$ برابر 0.00061 میلی‌متر و حالت $\Delta s_3 = 0.035$ برابر 0.00029 میلی‌متر حاصل شد. جهت جلوگیری از پخش شبکه ۲ حجم دیگر در اطراف هندسه ایجاد شد تا از افزایش ناگهانی اندازه شبکه از سمت هندسه به خارج جلوگیری شود. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است خطاهای ضرایب رانش و گشتاور بین سه نوع شبکه بسیار کم است و صحت استقلال شبکه تأیید شده است. علاوه بر این، شاخص همگرایی شبکه (GCI) نیز محاسبه شده است. راندمان سه شبکه تعریف شده در $J=0.93$ به ترتیب عبارت است از $73/3130$ ، $73/3192$ و $73/3248$

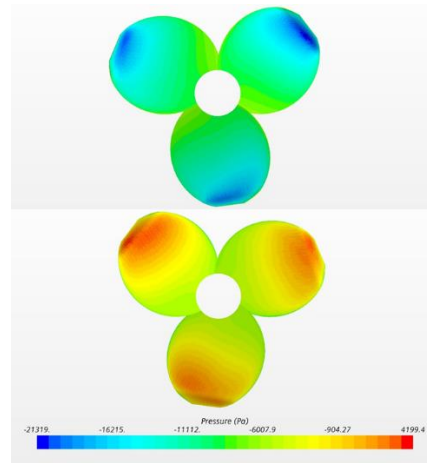
آمده است. نتایج آنالیز هیدروآکوستیکی نشان می‌دهد که میزان کجی



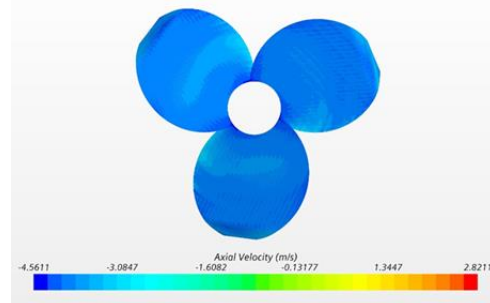
شکل ۸: سطح فشار صوت برحسب فرکانس به ترتیب از بالا به پایین برای هیدروفن‌های ۱، ۲، ۳ و ۴

۱۰°- در اغلب فرکانس‌ها بیشترین سطح فشار صوت را دارد که با توجه به وجود اختلاف فشار بیشتر بین سمت مکش و سمت فشار پروانه بدیهی به نظر می‌رسد (شکل ۶). بزرگ‌ترین نوسانات سطح فشار صوت نسبت به فرکانس را زاویه کجی ۱۰°+ دارد که علت آن به توزیع

راندمان آب آزاد در این حالت شده است (شکل ۶) به نحوی که علیرغم افزایش ضریب گشتاور نسبت به هندسه پایه بازهم راندمان آب آزاد مشابه حالت هندسه پایه باقی مانده است. توزیع سرعت اطراف پروانه در زاویه کجی ۵°- در شکل ۷ نشان داده شده است. نوک تیغه جریانی با سرعت بالا به سمت عقب تولید می‌کند. درعین حال جریانی روبه‌جلو با سرعت محوری کمتر نیز تولید می‌شود. این دو جریان معکوس جریانی عمودی را اطراف نوک تیغه تحریک می‌کنند که گردابه‌های نوک تیغه را ایجاد می‌کند. تغییرات در فشارها و سرعت‌ها اطراف تیغه به دلیل وجود زاویه کجی منجر به تغییر در عملکرد پروانه شده است. جریان اطراف تیغه نوسانات فشاری ایجاد می‌کند که به‌عنوان منبع نویز عمل می‌کنند که در نتیجه منجر به تغییر در سطح فشار صوت خواهد شد.



شکل ۶: کانتور توزیع فشار به ترتیب از بالا به پایین برای سمت مکش و سمت فشار پروانه حالت ۱۰°-



شکل ۷: کانتور توزیع سرعت خطی اطراف پروانه در زاویه کجی ۵°-

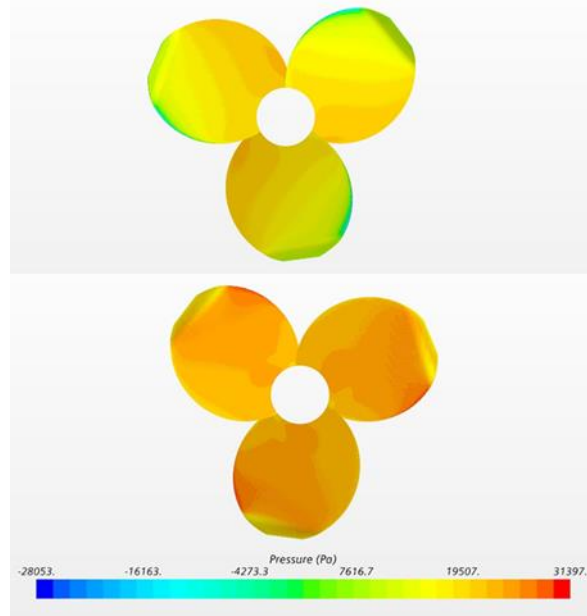
در نمودار شکل ۸ سطح فشار صوت برحسب فرکانس در ضریب پیشروی ۰/۸۳۳ برای ۵ حالت مورد بررسی و ۴ هیدروفن جانمایی شده

می‌تواند باعث جلوگیری از بالاروی جریان از نوک تیغه پروانه و عبور آن از سمت فشار پروانه و ایجاد گردابه نوک پروانه شده و باعث بهبود پارامترهای هیدرودینامیکی پروانه گردد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که زاویه کجی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ضریب تراست، ضریب گشتاور، راندمان و سطح نویز انتشاری پروانه داشته باشد و به‌طور خاص:

- زاویه کجی باعث افزایش ضریب تراست و ضریب گشتاور پروانه به‌طور هم‌زمان و کاهش راندمان آب آزاد پروانه می‌شود به‌جز در زاویه کجی 10° - که مقدار راندمان آب آزاد آن تفاوتی با هندسه پایه‌ی بدون زاویه کجی نداشت که علت آن اختلاف فشار بیشتر بین سمت مکش و فشار پروانه و افزایش قابل توجه ضریب تراست است به‌نحوی که علیرغم افزایش ضریب گشتاور نسبت به هندسه پایه بازم راندمان آب آزاد مشابه حالت هندسه پایه باقی مانده است. بنابراین از منظر هیدرودینامیکی زاویه کجی 10° - عملکردی مشابه هندسه پایه دارد.
- زاویه کجی 10° - در اغلب فرکانس‌ها بیشترین سطح فشار صوت را دارد که علت آن اختلاف فشار بیشتر بین سمت مکش و فشار پروانه می‌باشد. همچنین کمترین سطح فشار صوت در اغلب بازه‌های فرکانسی نیز مربوط به زاویه کجی 5° - است که در این حالت اختلاف فشار سمت مکش و فشار نسبت به بقیه حالات در مقدار کمینه قرار دارد. بر این بنیاد از منظر میزان سطح فشار صوت زاویه کجی 5° - بهینه‌ترین حالت بوده که بسته به بازه فرکانسی سطح فشار صوت آن حدود $2-3\text{dB}$ از هندسه پایه کمتر است.
- به علت توزیع غیریکنواخت فشار و تغییرات شدید مقدار آن در سمت مکش و فشار بزرگ‌ترین نوسانات سطح فشار صوت نسبت به فرکانس را زاویه کجی 10° + دارد. سطح فشار صوت زوایای کجی 5° +، 0° و 10° + در فرکانس‌های بزرگ‌تر از ۱۰ هرتز مابین بیشترین و کمترین (10° و 5° -) قرار می‌گیرد.

این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی‌های پیشرفته و مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی به درک بهتری از مکانیزم‌های تولید نویز در پروانه‌های دریایی کمک می‌کند. همچنین تأثیرات پارامتر هندسی

غیریکنواخت فشار و تغییرات شدید مقدار آن در سمت مکش و فشار بازمی‌گردد. کمترین سطح فشار صوت در اغلب بازه‌های فرکانسی نیز مربوط به زاویه کجی 5° - است که به علت توزیع یکنواخت‌تر فشار و تغییرات جزئی‌تر مقادیر آن در سمت مکش و فشار می‌باشد. سطح فشار صوت زوایای کجی 5° +، 0° و 10° + در فرکانس‌های بزرگ‌تر از ۱۰ هرتز مابین بیشترین و کمترین (10° و 5° -) قرار گرفته است. بررسی کانتور توزیع فشار حالت 5° - نیز نشان می‌دهد که توزیع فشار در سمت مکش و فشار این حالت یکنواخت‌تر و اختلاف فشار دو طرف نیز نسبت به سایر حالات کمتر است که باعث کاهش سطح فشار صوت در این حالت گردیده است (شکل ۹). فشار بالای نوک تیغه و اطراف سمت فشار پروانه حداکثر است. ناحیه بین $0.8 \sim 0.9 r/R$ در سمت مکش تیغه دارای حداقل فشار است. در نتیجه می‌توان گفت که از منظر هیدروآکوستیکی زاویه کجی 5° - بهینه‌ترین حالت در بین زوایای موردبررسی است. در بازه فرکانسی کمتر از ۲۰۰ هرتز حدود 2dB و در فرکانس‌های بالاتر حدود 3dB نسبت به هندسه پایه کاهش سطح فشار صوت از خود نشان می‌دهد.



شکل ۹: کانتور توزیع فشار به ترتیب از بالا به پایین برای سمت مکش و سمت فشار پروانه حالت 5° -

۹- نتیجه‌گیری

این پژوهش به تحلیل عددی آب آزاد تأثیر زاویه کجی بر عملکرد هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پروانه دریایی DTMB با بهره‌گیری از مدل توربولانسی $k-\omega$ SST و معادلات فاکس ویلیامز-هاوکنگز (FWH) پرداخته است. زاویه کجی در هندسه پروانه‌ها

[6] B. Mousavi, A. Rahrovi, and S. Kheradmand, "Numerical simulation of tonal and broadband noise," *Marine and Environmental Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 347–351.

[7] K. Fujiyama and Y. Nakashima, "Numerical Prediction of Acoustic Noise Level Induced by Cavitation on Ship Propeller at Behind-Hull Condition," in *Proc. 5th Int. Symp. Marine Propulsion*.

[8] M. Cianferra, A. Petronio, and V. Armenio, "Numerical prediction of ship propeller noise through acoustic analogy," in *Proc. 6th Int. Symp. Marine Propulsors*, 2019.

[9] S. Sezen, A. Dogrul, and S. Bal, "Investigation of Marine Propeller Noise for Steady and Transient Flow," in *Proc. Yildiz Technical Univ.*, Istanbul, Turkey, pp. 149–156, Jun. 2022.

[10] E. Güngör, "Hydroacoustical Calculations on a Generic Underwater Vehicle Using Lighthill-Curle Formulations," in *Proc. 6th Int. Symp. Marine Propulsors*, 2019.

[11] M. Chen et al., "Investigation into the hydrodynamic noise characteristics of electric ducted propeller," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 3, p. 378, 2022. [Online]. Available: doi: [10.3390/jmse10030378](https://doi.org/10.3390/jmse10030378)

[12] F. H. Lafeber et al., "Prediction of Underwater Radiated Noise from Propeller Cavitation During Concept Design," in *Proc. 7th Int. Symp. Marine Propulsors*, 2022.

[13] T. A. Smith et al., "Propeller cavitation on small craft: Underwater noise measurements and visualisation from full-scale trials," *Ocean Eng.*, vol. 317, p. 120024, 2025. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.oceaneng.2024.120024](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120024)

[14] Z. Cheng et al., "Cavitating wake dynamics and hydroacoustics performance of marine propeller with a nozzle," *Phys. Fluids*, vol. 37, no. 1, 2025. [Online]. Available: doi: [10.1063/5.0188470](https://doi.org/10.1063/5.0188470)

[15] Propulsor Committee, "Workshop Organized by 20th ITTC Propulsor," Seoul, Korea, 23 Aug. 1992.

[16] M. Yadegari, "An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy

زاویه کجی بر میزان نویز انتشاری پروانه DTMB مورد بررسی قرار گرفت که می‌تواند در طراحی پروانه‌های جدید و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف مفید واقع شود. در نهایت این پژوهش بر اهمیت توجه به پارامترهای هندسی مانند زاویه کجی در طراحی پروانه‌ها تأکید دارد و پیشنهاد می‌کند که تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی هندسه پروانه‌ها و شرایط کاری آن‌ها انجام شود تا بتوان به کاهش نویز و افزایش کارایی در سیستم‌های دریایی دست‌یافت.

۱۰- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
SPL	سطح فشار صوت، db
y^+	ارتفاع بی بعد در لایه مرزی
P	فشار
J	ضریب پیشروی
K_T	ضریب تراست
K_Q	ضریب گشتاور
D	قطر پیشران، متر
V_A	سرعت پیشروی پروانه، متر بر ثانیه
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
LES	شبیه‌سازی به روش گردابه‌های بزرگ
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3

۱۱- منابع

[1] V. Bertram, *Practical Ship Hydrodynamics*, Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2012.

[2] J. S. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 3rd ed., Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2012.

[3] K. Richard and M. L. Munjal, "Noise radiation from noncavitating marine propellers – A state of the art report," 1980.

[4] R. Parchen, "Noise production of ships propellers and waterjet installations at non-cavitating conditions," in *Proc. 34th WEGEMT School: Developments in the Design of Propulsors and Propulsion Systems*, 2000.

[5] M. A. Chakab Faezi and P. Ghadimi, "Investigation of the effects of increasing blade number and use of duct on noise reduction," *Iranian Society of Acoustical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 16–23, 2014. (in Persian)

- [21] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 7, p. 548, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-020-00583-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00583-y)
- [22] Z. Mansouri, M. Yadegari, and A. B. Khoshnevis, "Numerical investigation of the effects of installing four trip wires with different diameters on the mean and fluctuation velocities and characteristics of the wake around the circular cylinder," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 45, no. 9, p. 459, 2023. [Online]. Available: doi: [10.1007/s40430-023-04539-1](https://doi.org/10.1007/s40430-023-04539-1)
- [23] M. Sadeghi, M. Yadegari, and A. B. Khoshnevis, "Numerical investigation of the flow characteristics around two sequential cylinders with circular and square cross-sections," *J. Mar. Sci. Technol.*, pp. 1–18, 2024. [Online]. Available: doi: [10.1007/s00773-024-01087-8](https://doi.org/10.1007/s00773-024-01087-8)
- [24] S. D. Jessup, "An experimental investigation of viscous aspects of propeller blade flow," Ph.D. dissertation, Catholic Univ. of America, 1989.
- [25] P. J. Roache, "Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 29, pp. 123–160, 1997. [Online]. Available: doi: [10.1146/annurev.fluid.29.1.123](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.123)
- generation analysis and multi-objective genetic algorithm," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, no. 10, p. 1019, 2021. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01829-7](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01829-7)
- [17] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, pp. 1–15, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1007/s40430-020-02717-z](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02717-z)
- [18] H. Haghghatjoo, M. Yadegari, and A. B. Khoshnevis, "Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 137, no. 9, p. 1042, 2022. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-022-03143-w](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03143-w)
- [19] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, p. 1–19, 2021. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01195-4](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01195-4)
- [20] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 6, p. 534, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1140/epjp/s13360-020-00555-2](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00555-2)



Determination of Orthotropic Elastic Properties and Study of Size Effect of Single-Layer and Double-Layer Graphene Nanoplates Using Atomic Finite Element Method

Akbar Jafari^{1*}, Karim Aliakbari¹, Mina Amiri², Saeed Rouhi³

1. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
2. M. Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.
3. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, LAN. C., Islamic Azad University, Langarud, Iran.

This study examines the effect of size on the elastic properties of single-layer and double-layer armchair-type graphene nanoplates. To maintain the discrete nature of the nanoplates, they were modeled using equivalent spatial frame structures, with the finite element method employed to predict their elastic properties. The results were then validated by comparison with previous studies. Based on the findings, the mechanical properties of the double-layer nanoplates exhibited a slight difference in size dependence compared to the single-layer sheets. It was also observed that, for both single-layer and double-layer nanoplates, the elastic properties at smaller sizes were direction-dependent. However, as the size increased, the properties transitioned toward orthotropy, and with further enlargement, the dependence diminished, eventually approaching isotropy. Specifically, the results showed that for small nanoplates (30 Å), the Young's moduli in two directions differed by about 6%. At a larger size (100 Å), this difference decreased to around 2%, and at 300 Å, it dropped to approximately 0.7%. Additionally, Poisson's ratios in the two orthogonal directions for single-layer square nanoplates at smaller sizes (10 Å) exhibited a notable difference of 19%. As the size increased to (100 Å), this difference reduced to about 8%, and at 300 Å, it significantly decreased to about 1.5%. These findings suggest that the convergence to isotropy occurs more rapidly for the Young's modulus compared to Poisson's ratio.

Keywords

Graphene nanoplate
Layers
Elastic properties
Atomic finite element model

Received: 12.23.2024

Revised: 02.18.2025

Accepted: 03.16.2025

*Corresponding Author

Akbar Jafari

Email

a_jafari@nus.ac.ir

1- Introduction

Carbon-based nanomaterials have become highly popular for use in nanomechanical devices and nanocomposites due to their remarkable mechanical, electrical, and thermal properties [1]. Nanotechnology is defined as the ability to fabricate, control, enhance, and utilize materials at the nanoscale. The most distinctive characteristic of this field is the dependence of nanomaterial properties on size, physical shape, and the nature of interatomic bonds. This capability has become even more significant with advancements in atomic-level fabrication and geometry manipulation, which

continue to evolve. Due to their exceptional chemical, mechanical, thermal, and electrical properties, these materials have promising applications in microelectromechanical systems (MEMS), nanoelectromechanical systems (NEMS), optics, and polymer composite reinforcement [2].

Computational methods in nanomechanics are pursued through atomic-scale approaches, molecular mechanics, finite element method (FEM), and continuum modeling, each with its own advantages and limitations.



Theoretical methods have been extensively developed to estimate the elastic properties of nanostructures, including Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio. The present study investigates the effect of size on the elastic properties of single-layer and double-layer armchair graphene nanoplates. To preserve the discrete nature of the nanosheets, they were modeled using equivalent space-frame structures. Subsequently, an effective and efficient atomistic finite element method (AFEM) was developed to determine the elastic properties and mechanical behavior of single-layer and double-layer graphene sheets. To validate the methodology, the numerical results for elastic properties were compared with previous studies. This study focuses on the size-dependent elastic properties of both single-layer and double-layer sheets, an aspect that has been less explored in prior research, particularly for double-layer structures.

2- Theory and Simulation

In this study, the structure of armchair carbon nanosheets was examined. As schematically shown in Fig. 1, the nanosheet was modeled as a spatial structure based on the molecular structural mechanics approach. Fig. 1 also illustrates part of the hexagonal lattice, where beam elements were used in the finite element model to represent single carbon-carbon covalent bonds. Similar to conventional finite element models, nodes were employed to connect beam elements, forming the graphene structure. In this approach, the nodes represent carbon atoms and are defined based on their atomic coordinates. A modified interatomic potential was used to describe the atomic interactions in graphene. This potential is well-suited for modeling the behavior of carbon-carbon covalent bonds and has been widely applied by researchers in studying the fracture behavior of carbon nanotubes in both purely atomistic and atomistic-based continuum simulations.

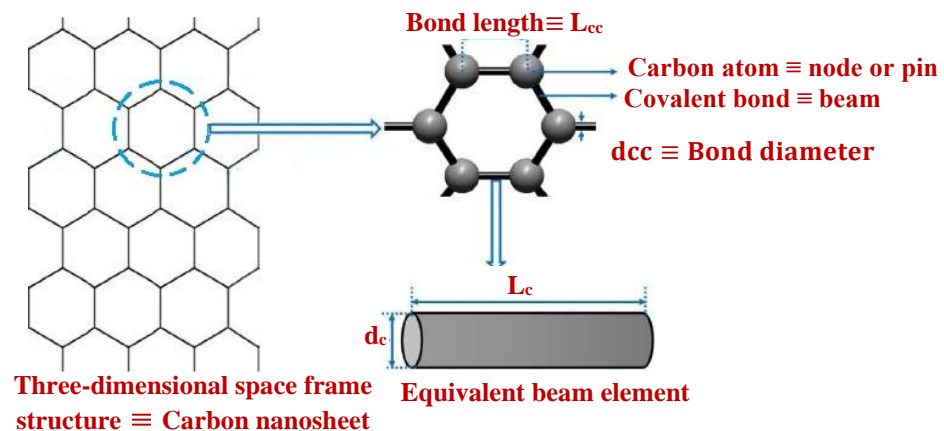


Figure 1: Schematic of the Molecular Structural Mechanics Approach

In any structure, including carbon nanotubes and graphene, which are entirely composed of carbon-carbon covalent bonds, the molecular potential energies arising from bond interactions are significantly greater than non-bonded (long-range) interactions such as van der Waals forces [3]. Therefore, the total molecular potential energy during the deformation of a single-walled (layered) carbon nanostructure is equivalent to the energy contributions from various types of bond

deformations—namely, the sum of the energies associated with bond stretching/compression, bond angle variations, and bond twisting. Similarly, in the deformation of a spatial frame structure, the total strain energy is the sum of the strain energies resulting from beam elongation, beam bending, and beam torsion. In the molecular structural mechanics approach, the deformation of a carbon nanosheet is analogous to the deformation of a spatial frame structure. Thus, the total molecular potential energy

is equal to the total strain energy, which is expressed by Eq. (1).

$$U_{\text{total}} = U_r + U_\theta + U_\tau = U_A + U_B + U_T \quad (1)$$

Here, U_{total} represents the total molecular energy of a deformed bond in a single-layer carbon nanosheet or the total strain energy of a deformed beam structure. The terms U_r , U_θ , and U_τ correspond to the energy contributions from bond stretching, bond angle variations, and bond twisting, respectively. Similarly, U_A , U_B , and U_T denote the strain energy components resulting from beam elongation, beam bending, and beam torsion, respectively.

A code was developed to generate geometric data in MATLAB. The data were then imported into ANSYS for finite element analysis. To construct the model, atomic positions representing carbon atoms were first defined, followed by the creation of connecting lines representing covalent bonds. The process began by defining a unit cell, which was then repeated along the x – and y – directions to form a complete 2D nanosheet. Covalent bonds were modeled using the three-dimensional elastic BEAM4 element, where each node possesses three translational degrees of freedom (x , y , z) and three rotational degrees of freedom about the same axes. In addition to beam elements, interlayer springs were included in the model to account for van der Waals interactions between graphene layers. These interactions were considered only for atom pairs within a cutoff radius σ (where σ is the Lennard-Jones parameter) [4]. Finally, after defining the interlayer springs, their stiffness was assigned based on the equivalent elastic energy of the chemical bonds.

3- Results and discussion

Fig. 2a shows the variations of the Young's modulus of the graphene sheet in the x and y

directions. It is observed that at small sizes, these properties are significantly influenced by the loading direction, leading to noticeable differences. However, as the size increases, this direction-dependence weakens, and ultimately, the two curves converge to a certain value. In other words, as the size of the graphene sheet increases, its elastic property tends towards an isotropic behavior. Based on the graphs, it can be said that at the nanometric dimensions, the armchair graphene sheet is anisotropic, with its flexibility in the x direction being greater than in the y direction, though this difference is not significant. Physically, it can be explained that at small sizes, the statistical distribution of the elements in each direction differs noticeably relative to the total elements, but as the size increases, the total number of elements increases, and the difference in the number of elements in the two directions relative to the total decreases. Thus, the directional properties gradually disappear.

For double-layer graphene sheets, the variations in their elastic properties with respect to size are plotted in Fig. 2b. As observed, the trend in the changes of properties is similar to that of the single-layer sheets, with only slight differences between these values and those corresponding to the single-layer sheets. This minor difference arises from the weak van der Waals interactions between the two layers, which are less operative compared to the strong covalent bonds and do not contribute significantly to the results. In fact, it can be said that when the in-plane behavior is considered, the presence of two sheets side by side does not differ much from a single sheet, provided that the load is also proportionally adjusted. In other words, each sheet carries an equivalent load to that of a single sheet from the previous case. Therefore, explanations regarding the physical interpretation of these plots are omitted, and the same explanations for the single-layer sheet can be applied.

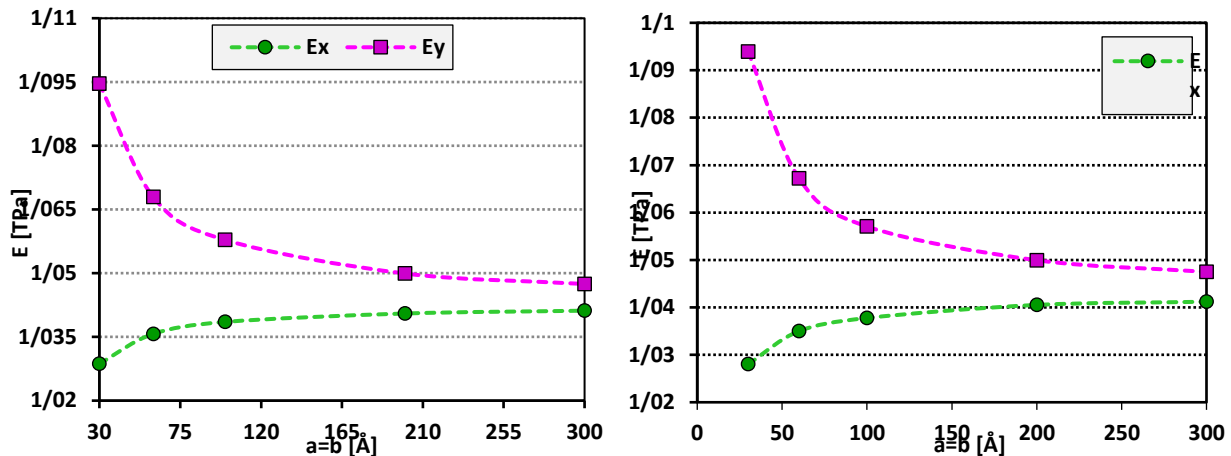


Figure 2: Young's modulus of the nanosheet as a function of its size; a) single layer and b) double layer

4- Conclusion

In this study, square single-layer and double-layer graphene sheets with different sizes ranging from 30 to 300 Å were studied to determine their elastic properties. The following conclusions were drawn:

- 1- It was observed that for very small sheet sizes, the values of properties in the x and y directions were strongly influenced by the loading direction, showing significant differences. However, as the size increased, this direction dependence declined, and eventually, both curves converged to a specific value. In fact, as the size increased, the behavior gradually tended towards orthotropy and eventually isotropy.
- 2- According to numerical results, for small nanosheet sizes (30 Å), the Young's moduli in the two directions differ by about 6%. For larger sizes (100 Å), this difference decreases to about 2%, and as the nanosheet size increases to 300 Å, the difference reduces further to approximately 0.7%.
- 3- Based on the results, Poisson's ratios in the two orthogonal directions for single-layer square nanosheets at small sizes (10 Å) show a

significant difference of about 19%. As the size increases to 100 Å, the difference reduces to about 8%, and finally, as the nanosheet size reaches 300 Å, the difference becomes much smaller, around 1.5%. The numerical comparison confirms that the convergence towards isotropy occurs faster for the Young's modulus than for Poisson's ratio.

5- References

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, pp. 56–58, 1991. [Online]. doi: [10.1038/354056a0](https://doi.org/10.1038/354056a0)
- [2] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and A. Jorio, "Unusual properties and structure of carbon nanotubes," *Annual Review of Materials Research*, vol. 34, pp. 247–278, 2004. [Online]. doi: [10.1146/annurev.matsci.34.040203.112300](https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.34.040203.112300)
- [3] C. Li, T.-W. Chou, A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes, *Int. J. Solids Struct.* 40 (2003) 2487–2499.
- [4] S. K. Georgantzinos and N. K. Anifantis, "Vibration analysis of multi-walled carbon nanotubes using a spring–mass based finite element model," *Computational Materials Science*, vol. 47, pp. 168–177, 2009.



تعیین خواص الاستیک ارتوتروپیک و مطالعه اثر اندازه نانوصفحات گرافنی یک لایه و دو لایه با استفاده از روش اجزاء محدود اتمی

اکبر جعفری^{۱*}، کریم علی اکبری^۱، مینا امیری^۲، سعید روحی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد لنگرود، دانشگاه آزاد اسلامی، لنگرود، ایران.

کلمات کلیدی

نانوصفحه گرافن

لایه‌ها

خواص الاستیک

مدل المان محدود اتمی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

*نویسنده مسئول

اکبر جعفری

ایمیل

a_jafari@nus.ac.ir

چکیده

در مطالعه حاضر، اثر اندازه روی خواص الاستیک نانوصفحات گرافنی نوع آرمیچری یک لایه و دو لایه بررسی شد. به منظور حفظ ماهیت گسسته نانوصفحات، با ساختارهای قاب فضایی معادل سازی شد و سپس روش المان محدود برای پیش‌بینی خواص الاستیک استفاده گردید. برای تایید نتایج، مقادیر عددی با تحقیقات دیگران مقایسه گردید. براساس نتایج، تابعیت وابستگی خواص مکانیکی صفحات دو لایه به اندازه آنها، اختلاف جزئی نسبت به تابعیت در صفحات یک لایه دارد. همچنین مشخص شد که در هر دو نوع تک لایه و دو لایه، خواص الاستیک در اندازه‌های کوچک نانوصفحه، وابسته به جهت بوده هر چند با افزایش اندازه به سمت ارتوتروپی رفته و با افزایش بیشتر اندازه نانوصفحه، این وابستگی کمتر شده و در نهایت به سمت ایزوتروپی میل می‌کند. در همین رابطه، نتایج نشان داد که در نانوصفحه کوچک (30 \AA)، مدول‌های یانگ در دو راستا دارای اختلاف حدود 6% ؛ در اندازه بزرگتر (100 \AA) این اختلاف به حدود 2% رسیده و با بزرگتر شدن نانوصفحه به 300 \AA این اختلاف به حدود 0.7% کاهش یافته است. بعلاوه، ضرایب پواسون در دو راستای متعامد، در نانوصفحات مربعی یک لایه در ابعاد کوچک (10 \AA)، دارای اختلاف قابل توجه حدود 19% است؛ با رسیدن به اندازه (100 \AA) اختلاف به حدود 8% رسیده و در نهایت با رسیدن اندازه نانوصفحه به 300 \AA ، اختلاف خیلی کمتر شده و به حدود 1.5% رسیده است. این نتایج عددی نشان می‌دهد که همگرایی به ایزوتروپی در مدول یانگ سریع‌تر از نسبت پواسون رخ داده است.

۱- مقدمه

الکترونیک برجسته کاربردهای بالقوه‌ای در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، نانوالکترومکانیکی، اپتیک و تقویت کامپوزیت‌های پلیمری دارند [۴-۲]. یکی از مواد کلیدی در زمینه نانو ساختارها، صفحات تک لایه گرافیت هستند که به گرافن معروف شده‌اند و امروزه فناوری تولید آنها به اندازه کافی پیشرفت کرده است. با توجه به تولید موفقیت‌آمیز صفحات گرافنی و کاربردهای گسترده آنها در زمینه‌های مختلف، تحقیقات و تلاش‌های تجربی زیادی به کشف خواص حرارتی، شیمیایی، مکانیکی و الکترونیکی غیر معمول آنها و بررسی رفتار مکانیکی آنها اختصاص یافته است [۵،۶].

نانومواد کربنی به دلیل خواص مکانیکی، الکترونیکی و حرارتی قابل توجهی که دارد، به نانومواد محبوب در ساخت دستگاه‌های نانومکانیکی و نانوکامپوزیت‌ها تبدیل شده است [۱]. فناوری نانو به صورت توانایی در ساخت، کنترل، تقویت ماده و بکارگیری مواد در ابعاد نانومتری شناخته می‌شود. متمایزترین مشخصه این قلمرو وابستگی خواص نانومواد به اندازه، شکل فیزیکی و چگونگی پیوندهای بین اتمی آنها است. این قابلیت از آنجا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که امروزه توانایی ساخت و تغییر هندسه در حد اتمی فراهم شده و فناوری آن در حال توسعه است. این مواد به جهت خواص شیمیایی، مکانیکی، حرارتی و



رفتار ارتعاشی صفحات گرافنی ناقص استفاده کردند و دریافتند که فرکانس‌های طبیعی این صفحات با حضور نواقص در ساختار اتمی کاهش می‌یابد [۱۱].

واقعیت این است که شبیه‌سازی‌های اتمی و مبتنی بر محیط پیوسته به ترتیب برای افزایش و کاهش مقیاس با محدودیت مواجه هستند، لذا به عنوان رویکردی دیگر، روش‌های محاسبه چندمقیاسی برای مطالعه سیستم‌های نسبتاً بزرگ ولی با ساختار نانو توسعه یافته‌اند. نمونه‌ای از این روش‌ها ترکیب مکانیک مولکولی و المان محدود کلاسیک است و تحت عنوان المان محدود با پایه مقیاس اتمی نیز مطرح شده‌اند. این روش‌ها قابلیت در نظر گرفتن ماهیت گسسته اتم‌ها، لحاظ میدان نیرویی اطراف آن‌ها و پدیده‌های رخ داده در مقیاس اتمی را دارند و سرعت محاسباتی قابل توجهی برای سیستم‌های فاقد انرژی جنبشی و سیستم‌هایی که خواصشان به دما حساس نیست دارند [۱۲]. علاوه بر این با استفاده از این روش‌ها می‌توان نیروی کمانشی، فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی نانو ساختارها را با استفاده از ماتریس‌های سختی و جرم محاسبه کرد. از طرف دیگر، معمولاً نسبت به روش دینامیک مولکولی هزینه محاسباتی کمتری دارند.

روش اجزاء محدود اتمی (AFEM) برای نخستین بار توسط لیو و همکاران [۱۳] معرفی شد. در مطالعه دیگری روش مذکور را برای بررسی رفتار مکانیکی نانولوله‌های کربنی تک جداره پیشنهاد کردند [۱۴]. ملکوتی و منتظری با توجه به ماهیت گسسته صفحات گرافنی تک لایه، AFEM جدیدی بر اساس پتانسیل ترسف- برنر ارائه نمودند [۱۵]. بدین منظور، رفتار مکانیکی گرافن تحت بارگذاری کششی با استفاده از AFEM بررسی و مدول یانگ 0.813 ترا پاسکال و مقاومت نهایی $130/92$ گیگا پاسکال را برای صفحه گرافنی کامل بدست آوردند.

سیستم‌های اتمی از جمله نانو ساختارهای کربنی بسیار به ساختارهای خرپا یا قاب فضایی شباهت دارند. امروزه محققان با استناد به این شباهت، با پیشینه مکانیک جامدات، سیستم‌های اتمی را به عنوان ساختارهای قاب فضایی در نظر می‌گیرند و سپس FEM را برای پیش‌بینی خواص و رفتار مکانیکی آنها استفاده می‌کنند. ایده اصلی این روش جایگزینی نیروی بین اتمی با المان‌های تیر الاستیک سه‌بعدی و اتم‌های کربن با المان‌های جرم نقطه‌ای در محل گره‌های المان‌های تیر است [۱۲]. در روش مذکور فقط فرم هارمونیک انرژی‌های پتانسیل بین‌اتمی دوجزئی در نظر گرفته می‌شود و مشابه

با توجه به سرعت تعیین پاسخ و هزینه کمتر، روش‌های مطالعه تئوری معمولاً مسیری مناسب برای کاهش آزمون و خطای مطالعات تجربی و آزمایشگاهی در نظر گرفته می‌شود. روش‌های محاسباتی در حوزه نانومکانیک با رویکردهای اتمی، مکانیک مولکولی، روش اجزاء محدود (FEM) و محیط پیوسته دنبال می‌شود که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که تاکنون بسیاری از محققین با استفاده از رویکردهای تئوری فوق به بررسی جنبه‌های مختلف نانو ساختارها و به ویژه گرافن پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از این موارد اشاره خواهد شد. روش‌های اتمی مانند تنگ بست و تئوری تابعی چگالی به دلیل دقت و قابلیت اطمینان مطلوب در تحلیل رفتار مکانیکی صفحات تک لایه گرافن مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷]. یکی دیگر از رویکردهای مطالعه تئوری، شبیه‌سازی با روش‌های مبتنی بر دینامیک مولکولی (MD) است که در مطالعات مختلف در مورد نانو ساختارها گزارش شده است. یکی از مزایای این روش‌ها امکان معادل‌سازی ساختارهای اتمی و در نظر گرفتن پدیده‌های شیمیایی مانند شکست و تشکیل پیوند و میدان نیرو در اطراف اتم‌ها است و اصولاً هر مشکلی که مربوط به حرکت‌های مولکولی و اتمی باشد با این تکنیک‌ها قابل شبیه‌سازی است [۸]. برای مثال از این روش در تحلیل رفتار مکانیکی صفحات گرافنی تک لایه پرداخته شده و خواصی از قبیل استحکام نهایی، مدول یانگ و وابستگی خواص الاستیک به دما مورد مطالعه قرار گرفته است. در این رابطه، اخیراً وانگ و ژانگ با استفاده از شبیه‌سازی‌های MD، مدول یانگ و استحکام شکست گرافن دو لایه را محاسبه کردند. آنها نشان دادند که دما تأثیر کمی روی مدول الاستیک دارد، اما در استحکام شکست نقش کلیدی را ایفا می‌کند [۹].

رویکرد تئوری دیگر مبتنی بر محیط پیوسته است که قادر به مدل‌سازی رفتار ساختارهای مقیاس کوچک است. به عنوان مثال جعفری و همکاران، ارتعاشات آزاد نانوصفحات را با استفاده از تئوری کلاسیک و تئوری‌های غیر کلاسیک مختلف مانند گرادیان کرنش مرتبه اول، گرادیان کرنش مرتبه دوم، فرم دیفرانسیل غیرمحملی و گرادیان ضمنی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. در این مطالعه، روش ناوبر و روش گلرکین برای حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی و تعیین پاسخ‌های پارامتریک برای فرکانس‌های طبیعی صفحه اتخاذ شدند و اثر پارامترهای مختلف از قبیل خواص کلاسیک و غیرمحملی، شرایط مرزی و اندازه صفحه روی فرکانس‌های طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. اسبقیان نامین و همکاران از تئوری الاستیسیته غیرمحملی برای مطالعه

در اندازه‌های نانو به صورت قطعی و با قابلیت تکرار به سختی میسر است.

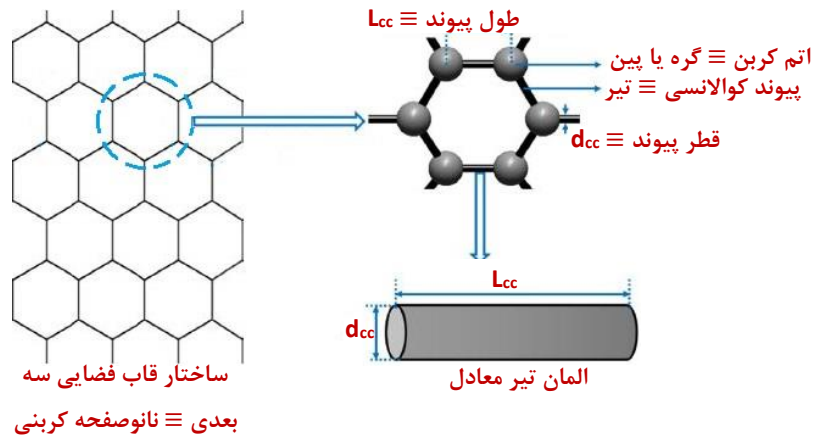
با توجه به عوامل و مشکلات ذکر شده، امروزه روش‌های تئوری به صورت گسترده‌ای برای بدست‌آوردن خواص الاستیک نانوساختارها مانند مدول یانگ، مدول برشی و ضریب پواسون توسعه یافته و از اهمیت بالایی برخوردارند. با این توضیحات، در مطالعه حاضر اثر اندازه روی خواص الاستیک نانوصفحات گرافنی نوع آرمیچری یک لایه و دو لایه مورد مطالعه قرار گرفته شده است. به منظور حفظ ماهیت گسسته نانوصفحات، با ساختارهای قاب فضایی معادل‌سازی شد. سپس روش المان محدود اتمی (AFEM) مؤثر و کارآمد برای تعیین خواص الاستیک و رفتار مکانیکی صفحات گرافن یک لایه و دوباره توسعه داده شده است. به منظور تایید روش انجام کار، نتایج عددی در زمینه خواص الاستیک با نتایج تحقیقات دیگران اعتبارسنجی گردید. مطالعه حاضر تأثیر اندازه بر خواص الاستیک صفحات یک لایه و دو لایه است که در مطالعات قبلی به ویژه صفحات دو لایه کمتر مورد توجه قرار گرفته شده است.

۲- تئوری و شبیه‌سازی مسأله

۲-۱- تئوری مسأله

در این مطالعه، ساختار نانوصفحه کربنی آرمیچر مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۱ بصورت شماتیک نشان داده شده، طبق رویکرد مکانیک ساختاری مولکولی، نانوصفحه به عنوان یک ساختار فضایی مدل‌سازی شده است. شکل ۱ همچنین بخشی از شبکه شش ضلعی را نشان می‌دهد که المان‌های تیر در نمایش پیوندهای کووالانسی منفرد کربن-کربن در المان محدود استفاده شده است. همانند مدل‌های المان محدود متداول، از گره‌ها جهت اتصال المان‌های تیر برای تشکیل ساختار گرافن استفاده شد. در این مورد، گره‌ها نشان‌دهنده اتم‌های کربن هستند و با همان مختصات اتمی تعریف می‌شوند. پتانسیل بین اتمی اصلاح شده برای توصیف رفتار برهم‌کنش‌های اتمی در گرافن استفاده شد. این پتانسیل برای توصیف رفتار پیوند کووالانسی کربن-کربن مناسب است و توسط چندین پژوهشگر در مطالعه شکست نانولوله کربنی در هر دو شبیه‌سازی پیوسته اتمی خالص [۲۰، ۲۱] و مبتنی بر اتمی [۲۲-۲۵]، استفاده شده است.

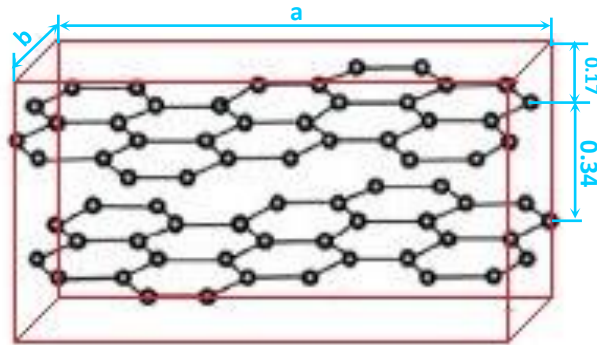
روش قبل نمی‌توان هر نوع تابع پتانسیلی را در نظر گرفت [۷]؛ اما مزیت این روش این است که می‌تواند برهم‌کنش‌های دوجزئی را به خوبی در نظر بگیرد و ماهیت گسسته نانوساختارها را شبیه‌سازی کند. بعلاوه، نسبت به روش دینامیک ملکولی کلاسیک از سرعت بسیار بالایی برخوردار است. همچنین می‌تواند برای مدل‌سازی سیستم‌های مقیاس کوچک ولی با تعداد زیاد درجه آزادی مورد استفاده قرار گیرد. جعفری و همکاران با این روش و البته بهبود آن با ترکیب المان‌های پیوسته تیر و میله با المان‌های فنر متمرکز، خواص مکانیکی و پیروزالکتریک نانولوله‌های بر-نیتريد را تعیین نمودند [۱۶]. براساس برخی نتایج تحقیق مذکور، با افزایش قطر نانولوله‌ها خواص مکانیکی به سمت مقادیر مشخصی همگرا گردید. نتایج آنها نشان داد که مدول یانگ از حدود ۰/۷ ترا پاسکال در قطرهای کم به حدود ۱/۱ ترا پاسکال در قطرهای زیاد همگرا شد. سخایی پور و همکاران مدل مذکور را برای مطالعه ویژگی‌های ارتعاشی صفحات گرافنی یک لایه کامل پیشنهاد کردند که پتانسیل کاربرد به عنوان سنسورهای کرنش را دارد [۱۷]. باید اذعان نمود که روش‌های محاسباتی نمی‌توانند برای مطالعه رفتار مواد از جمله گرافن کافی باشند و در نهایت نتایج آزمایشگاهی و تجربی ملاک قضاوت و عملکرد واقعی خواهد بود. بعلاوه، با مقایسه نتایج تئوری با نتایج آزمایشگاهی امکان اعتبارسنجی و صحت‌سنجی نتایج فراهم می‌گردد. هرچند مطالعات آزمایشگاهی مختلفی برای تعیین خواص نانوساختارها از جمله گرافن گزارش شده ولی همچنان دستورالعمل‌های استاندارد برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی ساختارهای مقیاس کوچک تثبیت نشده است. لی و همکاران با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، خواص الاستیک و استحکام شکست غشای گرافن تک لایه را اندازه‌گیری کرده و مدول یانگ $1/1 \pm 0$ ترا پاسکال را بدست آوردند [۱۸]. در مطالعه‌ای دیگر ژانگ و پان این مدول را ۰/۸۹ ترا پاسکال اندازه‌گیری کردند [۱۹]. این نتایج و البته مواردی از این قبیل نشان می‌دهد که معمولاً محدوده‌ای از مقادیر برای هر یک از ویژگی‌های نانوساختارها گزارش شده که بعضاً اختلاف قابل توجهی دارند که این تلقی را ایجاد می‌کند که شاید ابهامات یا نقاط ضعفی در روش‌های آزمایشگاهی در مقیاس نانو وجود دارد. یکی از دلایل این پدیده می‌تواند نویزهای موجود در محیط باشد که سبب اختلال و خطای احتمالی در نتایج می‌شود. علاوه بر این، نواقص موجود در نانوساختار و تمرکز تنش در تکیه‌گاه‌ها نیز می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین معمولاً امکان پیاده‌سازی شرایط آزمایشگاهی



شکل ۱: شمانیک رویکرد مکانیک ساختاری مولکولی

از طرفی، یک صفحه چند لایه با تکرار یک صفحه دو بعدی در جهت Z ایجاد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، ضخامت هر لایه و فاصله بین لایه‌ها بر اساس نتایج تجربی معادل طول پیوند بین اتم‌های کربن $0.34 \text{ nm} = 3.4 \text{ \AA}$ لحاظ شده است [۲۶].

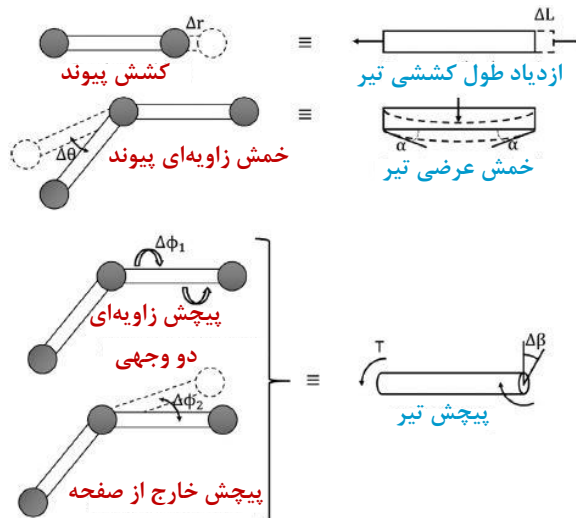
شکل ۲: فاصله بین لایه‌ای در صفحات دو لایه



شکل ۲: فاصله بین لایه‌ای در صفحات دو لایه

تغییر شکل ساختاری گرافن تک لایه می‌تواند ناشی از تغییر فاصله محوری پیوند، تغییر زاویه پیوند (خمش پیوند)، پیچش دو وجهی پیوند و پیچش خارج از صفحه در پیوند کربن-کربن مطابق شکل ۳ است.

تغییر شکل ساختاری گرافن تک لایه می‌تواند ناشی از تغییر فاصله محوری پیوند، تغییر زاویه پیوند (خمش پیوند)، پیچش دو وجهی پیوند و پیچش خارج از صفحه در پیوند کربن-کربن مطابق شکل ۳ است.



شکل ۳: مقایسه تغییر شکل‌ها در پیوند بین اتم‌های کربن و نمایش قاب فضایی معادل آن

$$\vec{F}_r = -kx; \vec{F}_a = -\vec{F}_r = kx \quad (۳)$$

$$U = \int_0^x kx dx = \frac{1}{2} kx^2 \quad (۴)$$

در اینجا، F_r نیروی بازگرداننده فنر با سختی k است که با قانون هوک توصیف شده است. با استفاده از رابطه (۴)، انرژی‌های فضایی مولکولی در تغییر شکل پیوند را می‌توان با معادلات (۵) و (۶) تعیین نمود [۷،۲۸]. به طور مشابه، انرژی‌های کرنش المان تیر به دلیل تغییر شکل آن، که توسط نظریه مکانیک سازه ارائه می‌گردد با رابطه (۷) تعیین می‌گردد [۷،۲۸].

$$U_r = \frac{1}{2} k_r (\Delta r)^2; U_\theta = \frac{1}{2} k_\theta (\Delta \theta)^2 \quad (۵)$$

$$U_\tau = \frac{1}{2} k_\tau (\Delta \phi)^2, \text{ where } \Delta \phi = \Delta \phi_1 + \Delta \phi_2 \quad (۶)$$

$$U_A = \frac{EA}{2L} (\Delta L)^2;$$

$$U_B = \frac{EI}{2L} (2\alpha)^2; \quad (۷)$$

$$U_T = \frac{GJ}{2L} (\Delta \beta)^2$$

در اینجا، k_r ، k_θ و k_τ سختی متناظر پیوندهای کووالانسی کربن-کربن به ترتیب در تغییر طول پیوند، تغییر زاویه پیوند و پیچش پیوند هستند. مطابق شکل ۳، در حالی که Δr ، $\Delta \theta$ و $\Delta \phi$ به ترتیب تغییرات در طول پیوند، زاویه پیوند درون صفحه و زاویه پیچش پیوند هستند. L و A به ترتیب نشان دهنده طول تیر و سطح مقطع، I و J به ترتیب نشان دهنده ممان دوم و ممان دوم قطبی مساحت مقطع تیر حول محور مرکزی آن و E و G به ترتیب نشان دهنده مدول یانگ و مدول برشی ماده تیر هستند. مطابق شکل ۳، در حالی که ΔL ، α و $\Delta \beta$ به ترتیب تغییر طول محوری تیر، زاویه خمش تیر، و زاویه پیچش تیر هستند. در رویکرد مکانیک ساختاری مولکولی، U_r معادل U_A و U_θ معادل U_B (تغییر طول پیوند معادل تغییر طول تیر است)، U_τ معادل U_T و 2α معادل $\Delta \theta$ (تغییر زاویه پیوند معادل خمش تیر است) و $\Delta \beta$ معادل $\Delta \phi$ (پیچ خوردگی پیوند معادل پیچش تیر است) هستند. معادل سازی این انرژی‌های متناظر مکانیک مولکولی و مکانیک ساختاری، مجموعه معادلات (۸) را نتیجه می‌دهد [۷،۲۸].

در هر ساختاری از جمله نانولوله‌های کربنی و گرافن که به طور کامل از پیوندهای کووالانسی کربن-کربن تشکیل شده است، انرژی‌های فضایی مولکولی ناشی از برهم‌کنش‌های پیوندی بسیار بیشتر از برهم‌کنش‌های غیر پیوندی (دوربرد) مانند برهم‌کنش واندروالس است [۷]؛ بنابراین، کل انرژی فضایی مولکولی در طول تغییر شکل نانو ساختار کربنی تک لایه (لایه) برابر با انرژی‌های ناشی از انواع تغییر شکل‌های پیوند یعنی مجموع انرژی‌های ناشی از کشش/فشار پیوند، تغییر زاویه پیوند و پیچش پیوند است. به طور مشابه، کل انرژی کرنش در تغییر شکل ساختاری قاب فضایی برابر مجموع انرژی‌های کرنش ناشی از تغییر طول تیر، خمش تیر و پیچش تیر است. در رویکرد مکانیک ساختاری مولکولی، تغییر شکل نانوصفحه کربنی همان تغییر شکل ساختاری قاب فضایی است. بنابراین، کل انرژی‌های فضایی مولکولی برابر با جمع کل انرژی‌های کرنش است که با معادله (۱) نشان داده می‌شود.

$$U_{\text{total}} = U_r + U_\theta + U_\tau = U_A + U_B + U_T \quad (۱)$$

در اینجا، U_{total} کل انرژی مولکولی یک تغییر شکل پیوند نانوصفحه کربنی تک لایه یا کل انرژی کرنش تغییر شکل ساختاری تیر است. U_r ، U_θ و U_τ به ترتیب انرژی‌های ناشی از تغییر طول پیوند، تغییر زاویه پیوند و پیچش پیوند هستند. U_A ، U_B و U_T به ترتیب انرژی‌های کرنشی ناشی از تغییر طول، خمش تیر و پیچش تیر هستند. مشخص شده است که تغییر شکل‌های پیوند در حرکت‌های ارتعاشی نانو ساختارهای کربنی بسیار کوچک‌تر از ابعاد کلی آنهاست [۷،۲۷]. بنابراین، با فرض تغییر شکل‌های کوچک، همانطور که در رابطه (۲) نشان داده شده، انرژی پتانسیل کل این نوسان‌گر، برابر کار انجام‌شده برای تغییر شکل آن است.

$$U = \int_0^x dW = \int_0^x \vec{F}_a \cdot d\vec{x} = \int_0^x F_a dx \quad (۲)$$

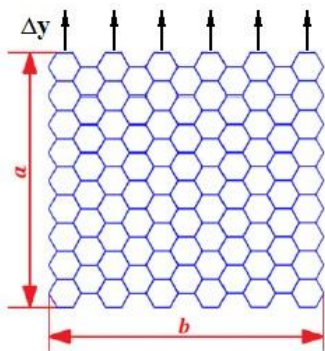
در اینجا U انرژی پتانسیل نوسان‌گر و x بیانگر تغییر شکل است. dW کار جزیی است که در تغییر شکل نوسان‌گر با مقدار جزیی dx انجام می‌شود که همان حاصل ضرب نیروی وارد شده برای تغییر شکل آن (\vec{F}_a) و تغییر شکل جزیی در جهت نیرو (dx) است. همانطور که در رابطه (۳) نشان داده شده است، نیروی اعمال شده برای تغییر شکل نوسان‌گر در هر حالتی برابر نیروی بازگرداننده ناشی از سختی فنر در آن نمونه است. بنابراین کل انرژی پتانسیل این نوسان‌گر با رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$G = 8.701 \times 10^{-9} \text{N}\cdot\text{A}^{-2}$$

لازم به ذکر است که نسبت پواسون در فرمول سختی تیر استاندارد اوپلر وجود ندارد ولی باید به این نکته اشاره کرد که نتایج فوق با قیود محدودیت ضریب پواسون سازگار نیست. با این حال ثابت شده که نسبت پواسون تأثیر کمی بر خواص مؤثر نانو ساختارهای کربنی دارد [۲۹]. برای تعیین خواص الاستیک گرافن، از تئوری الاستیسیته دوبعدی ارتوتروپیک استفاده می‌شود که در آن تنش‌های عمود بر صفحه نادیده گرفته می‌شود. در واقع طی این تحلیل، خواص الاستیک شامل مدول‌های یانگ E_x و E_y ، مدول برشی G_{xy} و ضرایب پواسون ν_{xy} و ν_{yx} تعیین می‌شود. براساس تئوری الاستیسیته خطی دوبعدی، روابط تنش- کرنش به شرح زیر است:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/2G_{xy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

در معادله فوق E_x و E_y نشان‌دهنده مدول‌های یانگ در جهات x و y ، G_{xy} مدول برشی، ν_{xy} و ν_{yx} ضرایب پواسون، σ_x ، σ_y و τ_{xy} مؤلفه‌های تنش و ϵ_x ، ϵ_y و ϵ_{xy} مؤلفه‌های کرنش در حالت تنش صفحه‌ای هستند. برای تعیین خواص الاستیک با اعمال شرایط مرزی مناسب، نیروهای تکیه‌گاهی و به دنبال آن مؤلفه‌های مختلف تنش تعیین می‌شود. از سوی دیگر، با اعمال شرایط مرزی جابجایی، مقادیر طول تغییر می‌کند و متعاقباً کرنش‌ها مشخص می‌شود. با مؤلفه‌های تنش و کرنش، خواص الاستیک صفحه با حل معادله ماتریسی (۱۱) تعیین می‌شود. اعمال شرط مرزی جابجایی برای تعیین خواص مطابق شکل ۴ است.



ب) اعمال شرط مرزی جهت تعیین ν_{yx} و E_y

المان تیر دارای مقطع دایره‌ای با قطری برابر با قطر پیوند کربن-کربن d_{cc} است. بنابراین، با قرار دادن $A = \pi d_{cc}^2/4$ و $I = \pi d_{cc}^4/64$ در معادله (۸) و با حل آن، معادله (۹) حاصل می‌گردد [۷،۲۸].

$$EA/L = k_r; EI/L = k_\theta; GJ/L = k_\tau \quad (8)$$

$$d_{cc} = 4\sqrt{k_\theta/k_r};$$

$$E = k_r^2 L_{cc} / 4\pi k_\theta; \quad (9)$$

$$G = k_r^2 k_\tau L_{cc} / 8\pi k_\theta^2$$

در اینجا، طول تیر برابر با $L_{cc} = 1.421 \text{ \AA}$ معادل طول پیوند کووالانسی کربن-کربن در یک شبکه شش‌ضلعی است، و مقادیر k_r ، k_θ و k_τ از حوزه مکانیک مولکولی تجربی به شرح

$$k_r = 6.52 \times 10^{-7} \text{ Nnm/rad}^2$$

$$k_\theta = 8.76 \times 10^{-10} \text{ Nnm/rad}^2$$

$$k_\tau = 2.78 \times 10^{-10} \text{ Nnm/rad}^2$$

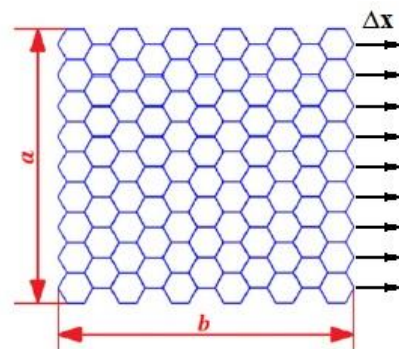
است [۲۸]. پس از وارد کردن این مقادیر در معادله (۹)، رابطه

(۱۰) برای تعیین خواص الاستیک المان تیر معادل پیوند کربن-کربن حاصل می‌گردد.

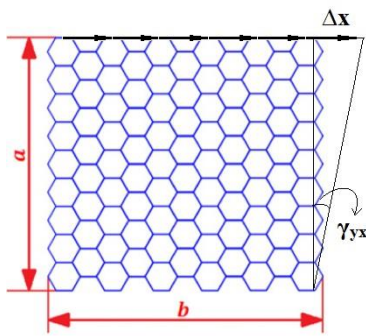
$$d_{cc} = 1.466 \text{ \AA};$$

(۱۰)

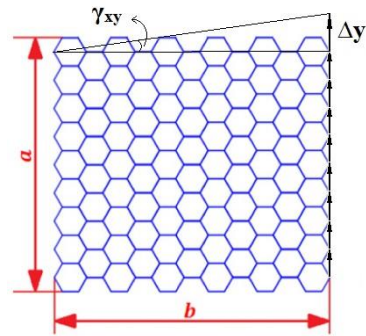
$$E = 5.4875 \times 10^{-8} \text{ N}\cdot\text{A}^{-2};$$



الف) اعمال شرط مرزی جهت تعیین ν_{xy} و E_x



د) اعمال شرط مرزی دیگری جهت تعیین G_{yx}



ج) اعمال شرط مرزی جهت تعیین G_{xy}

شکل ۴: اعمال شرط مرزی جابجایی به منظور تعیین خواص نانو صفحه گرافن

با اعمال جابجایی به اندازه Δy به لبه سمت راست صفحه و $\Delta x = 0$ روی همین لبه (شکل ۴ ج)، کرنش برشی خالص $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$ ایجاد می‌گردد و با استناد به معادلات تنش-کرنش G_{xy} به صورت زیر تعیین می‌گردد.

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \tan^{-1}(\Delta y/b) \quad (16)$$

$$G_{xy} = \tau_{xy}/\gamma_{xy} \quad (17)$$

مطابق شکل ۴ د، با اعمال جابجایی به اندازه Δx به لبه بالای صفحه و محدود کردن حرکت آن در جهت y ، درواقع کرنش برشی $\gamma_{yx} = 2\varepsilon_{yx}$ ایجاد شده و سایر کرنش‌ها و تنش‌ها صفر خواهند بود. بدین ترتیب، رابطه کلی تنش-کرنش ساده شده و فقط جمله سوم معادله ماتریسی (۱۱) باقی می‌ماند. با این اوصاف کرنش برشی مربوطه از روابط هندسی (۱۸) محاسبه شده و در پی آن مدول برشی از رابطه (۱۹) تعیین می‌گردد. باید اذعان نمود که با فرض حاکم بودن رفتار ارتوتروپیک کامل، انتظار داریم که مدول برشی به دست آمده در این روش با مدول برشی به دست آمده در روش قیل یکسان باشند ولی درواقع ممکن است این تساوی به صورت کامل برقرار نباشد. در ادامه و طی گزارش و بحث نتایج بیشتر به این موضوع پرداخته خواهد شد.

$$\gamma_{yx} = 2\varepsilon_{yx} = \tan^{-1}(\Delta x/a) \quad (18)$$

$$G_{yx} = \tau_{yx}/\gamma_{yx} \quad (19)$$

۲-۲- شبیه‌سازی مساله

با توجه به اینکه مدل‌سازی ساختار صفحات گرافنی به‌طور کلی در نرم‌افزار ANSYS به راحتی امکان‌پذیر نیست، بنابراین با توسعه یک برنامه کامپیوتری، مدل‌های هندسی لازم در نرم‌افزار MATLAB

برای تعیین E_x ، نیاز است که σ_y و τ_{xy} صفر در نظر گرفته شوند. برای این منظور، جابجایی به اندازه Δx به وجه سمت راست عمود بر محور x اعمال می‌شود و وجه مقابل محدود می‌شود و جابجایی‌های مرزهای دیگر که عمود بر محور y هستند آزاد در نظر گرفته شده که بر اساس آن تنش روی آن مرزها صفر می‌شود (شکل ۴ الف). در نتیجه معادله ماتریسی (۱۱) به معادلات زیر تبدیل می‌شود:

$$\varepsilon_x = \sigma_x/E_x \quad (12)$$

$$\varepsilon_y = -\nu_{yx}\sigma_x/E_y \quad (13)$$

با در دست داشتن مؤلفه‌های تنش و کرنش، مدول یانگ E_x مستقیماً از رابطه (۱۲) استخراج می‌شود. باین حال، برای تعیین ν_{yx} ابتدا باید مقدار E_y را تعیین کرد و سپس در معادله (۱۳) جایگزین گردد.

با اعمال جابجایی Δy در لبه بالایی صفحه عمود بر محور y و محدود کردن وجه مقابل و آزاد گذاشتن جابجایی سایر مرزها، تنها σ_y غیر صفر است (شکل ۴ ب) و معادله ماتریسی (۱۱) به صورت زیر می‌شود.

$$\varepsilon_x = -\nu_{xy}\sigma_y/E_x \quad (14)$$

$$\varepsilon_y = \sigma_y/E_y \quad (15)$$

با جایگزینی E_x به دست آمده از مرحله اول در رابطه (۱۴)، ν_{xy} مشخص می‌شود. همچنین مقدار E_y مستقیماً از رابطه (۱۵) تعیین می‌شود. از طرفی با به دست آوردن E_y و جایگزینی آن در رابطه (۱۳)، ν_{yx} به دست می‌آید.

۳- اعتبارسنجی

در این بخش به بررسی صحت نتایج به دست آمده پرداخته می‌شود. ابتدا مدول یانگ و مدول برشی نانو صفحه به دست آمده با مقادیر ارائه شده در مراجع معتبر مقایسه می‌گردد. پس از ساخت گرافن و به دنبال کشف خواص برجسته مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی آن، محققان زیادی به مطالعه این نانو ساختار منحصر به فرد پرداختند. به منظور مقایسه، در جدول ۱ نتایج کار حاضر برای مدول یانگ و مدول برشی نانو صفحات گرافنی یک لایه در کنار نتایج تعدادی مراجع ارائه شده است. لازم به ذکر است که تعداد مطالعات قابل توجهی پیرامون مدول یانگ نانو صفحات گرافنی یک لایه و نانولوله‌های کربنی بزرگ صورت گرفته، ولی تعداد محدودی گزارش و مقاله در رابطه با مطالعه مدول برشی منتشر شده است

ایجاد و سپس از نرم افزار ANSYS برای حل معادلات اجزای محدود استفاده شد. در واقع برنامه MATLAB به گونه‌ای تهیه شده است که امکان استفاده از دستورات محیطی ANSYS را فراهم می‌کند.

این مدل یک سازه دوبعدی با طول b و عرض a است که شماتیک آن و دستگاه مختصات انتخابی در شکل ۲ و شکل ۴ نشان داده شده است. برای ساخت مدل، ابتدا نقاط آن نشان دهنده اتم‌های کربن و سپس خطوط اتصال آن‌ها نشان دهنده پیوندهای کووالانسی ایجاد می‌شود. برای ایجاد نقاط صفحه ابتدا سلول واحد ایجاد گردیده است و سپس این سلول در جهت x و y تکرار می‌شود تا صفحه دوبعدی ایجاد شود.

برای مدل سازی پیوندهای کووالانسی از المان الاستیک سه بعدی BEAM4 استفاده شد که هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی در سه جهت x ، y و z و سه درجه آزادی چرخشی حول محورهای فوق الذکر است. علاوه بر المان‌های تیر، فنرهای بین لایه‌ای نیز در مدل سازی گنجانده شده است که معادل پیوند واندروالسی بین لایه‌ها است. البته، برهم کنش‌های واندروالسی بین دو اتم به شرطی در نظر گرفته می‌شوند که فاصله آن‌ها کمتر یا مساوی با شعاع قطع^۱ یعنی σ (پارامتر لنارد-جونز) باشد [۳۰]. به عبارت دیگر، هیچ پیوندی بین اتم‌هایی که در فواصل بیشتر از مقدار فوق قرار دارند وجود ندارد. در نهایت پس از تعریف فنرهای بین نقاط، سختی لازم برای انرژی الاستیک فنر معادل انرژی پیوند شیمیایی نسبت داده می‌شود.

جدول ۱: اعتبارسنجی و مقایسه مدول یانگ و مدول برشی صفحه گرافنی یک لایه

روش	مدول الاستیک (TPa)	مدول برشی (GPa)
کار حاضر - FEM مکانیک ساختاری	۱/۰۴۳	۳۰۲/۳
روش DFT [۳۱]	۰/۹۵-۱/۱	-
روش DFT [۳۲]	۱/۰۵	-
روش MD [۳۳]	۱/۰۳۰۵۳	-
روش MD [۳۴]	۰/۹۱۲	۳۵۸
روش تجربی [۱۸]	۱±۰/۱	-
روش تجربی [۱۹]	۰/۸۹	-
روش FEM مکانیک ساختاری [۳۵]	۱/۳۶۷	۲۸۰
روش FEM مکانیک ساختاری [۳۶]	۰/۸۰	۴۴۰
روش مکانیک پیوسته [۳۷]	۱/۰۴	-
روش AFEM [۱۹]	۰/۸۱۳	-

^۱ Cut off

یک لایه و سپس صفحات دو لایه ارائه شده است. همچنین، تأثیر اندازه صفحه بر خواص الاستیک و رفتار آن از منظر درجه غیر آیزوتروپی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

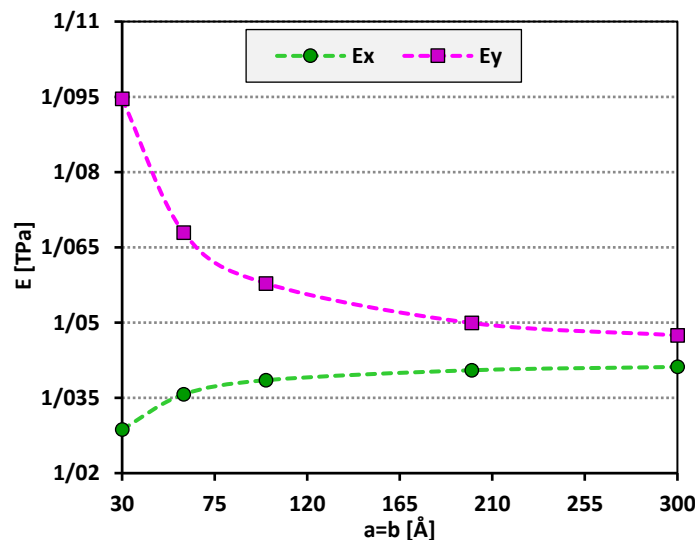
۴-۱- خواص مکانیکی صفحه یک لایه بر حسب اندازه

شکل ۵ تغییرات مدول یانگ صفحه را در جهت x و y نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در اندازه‌های کوچک، این ویژگی‌ها به شدت تحت تأثیر جهت بارگذاری قرار می‌گیرند و تفاوت قابل توجهی دارند. اما با افزایش اندازه، این وابستگی به جهت ضعیف می‌شود و در نهایت دو نمودار به مقدار معینی همگرا می‌شوند. به عبارت دیگر، با افزایش ابعاد صفحه گرافن، خاصیت الاستیک آن به سمت آیزوتروپیک صفحه‌ای متمایل می‌شود. اما بر اساس نمودارها می‌توان گفت که صفحه گرافن آرمچیر در ابعاد نانومتری غیرآیزوتروپ بوده و انعطاف‌پذیری آن در جهت x بیشتر از جهت y است، البته این تفاوت معنی‌دار نیست. از نظر فیزیکی می‌توان گفت که در اندازه‌های کوچک صفحه، توزیع آماری المان‌ها در هر جهت به نسبت کل المان‌ها دارای اختلاف محسوسی است، اما با افزایش اندازه، تعداد کل المان‌ها افزایش یافته و تفاوت تعداد المان‌ها در دو جهت به نسبت کل المان‌ها کاهش می‌یابد، بنابراین خواص جهتی به تدریج از بین می‌رود.

اضافه می‌شود که در برخی مراجع مطالعه روی نانولوله‌های کربنی با قطر خیلی بزرگ صورت گرفته که در واقع ابعاد و خواص به سمت تک لایه گرافن میل می‌کنند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج تحقیق حاضر و مراجع از جمله نتایج تجربی گزارش شده توسط لی [۱۸] وجود دارد. جالب توجه است که نتایج حاضر نیز تطابق خوبی با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی MD دارد. علاوه بر این، در مقایسه با مراجعی که با روش مکانیک ساختاری برای تعیین خواص الاستیک صفحات گرافنی استفاده کرده‌اند، تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود، اما تأکید می‌شود که نتایج مطالعه حاضر به نتایج روش‌های تجربی و روش‌های دینامیک ملکولی نزدیک‌تر است که نشان‌دهنده دقت مطلوب مدل پیشنهادی است. با وجود تعداد محدود نتایج مدول برشی ولی در مقایسه با مدول یانگ همبستگی کمتری بین نتایج وجود دارد ولی باید اشاره نمود که نتیجه به دست آمده در این تحقیق انطباق بیشتری با نتیجه حاصل از روش MD داشته است.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

به منظور تعیین خواص الاستیک، صفحات مربعی با طول‌های مختلف انتخاب شده و مطابق شکل ۴ تحت چهار شرایط بارگذاری قرار می‌گیرند. در این بخش ابتدا نتایج مربوط به خواص مکانیکی صفحات



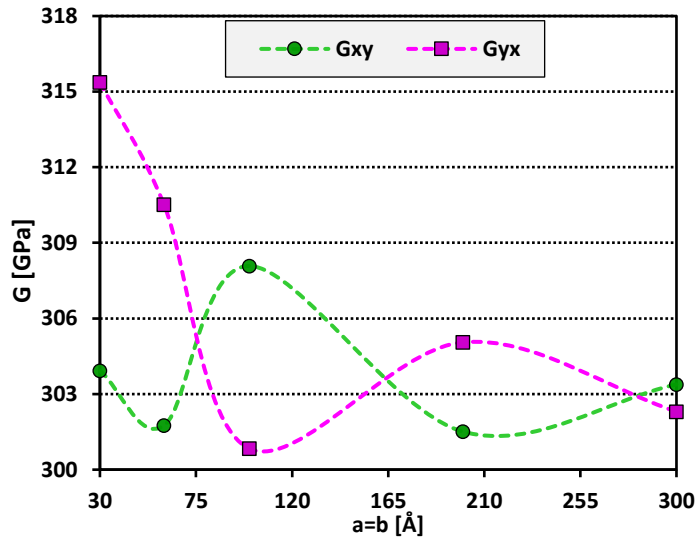
شکل ۵: مدول یانگ صفحه یک لایه بر حسب اندازه صفحه

است، اختلاف محسوسی بین دو نتیجه وجود دارد که بیانگر انحراف از فرض آیزوتروپی و ارتوتروپی است. با این حال، با افزایش اندازه صفحه، نوسان دو نمودار کاهش یافته و به تدریج هر دو به سمت یکدیگر همگرا می‌شوند که نشان می‌دهد در اندازه‌های کوچک، صفحه غیرآیزوتروپ است ولی به تدریج با افزایش اندازه، به سمت آیزوتروپی تمایل ایجاد

ویژگی الاستیک بعدی، مدول برشی است که بر اساس تئوری الاستیسیته دوبعدی با فرض خاصیت ارتوتروپی با سمبل G_{xy} معرفی می‌شود. با این حال در اینجا با دو نوع بارگذاری در دو جهت متعامد اندازه‌گیری و با نام‌های G_{yx} و G_{xy} معرفی گردیده و نتایج آن‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. قابل توجه است که وقتی اندازه صفحه کوچک

مدول برشی پرداخته‌اند که ناشی از مشکلات اجرایی انجام آزمایشات عملی است. چنین مشکلاتی در تئوری نیز وجود دارد و این باعث عدم قطعیت در برآورد مدول برشی می‌شود.

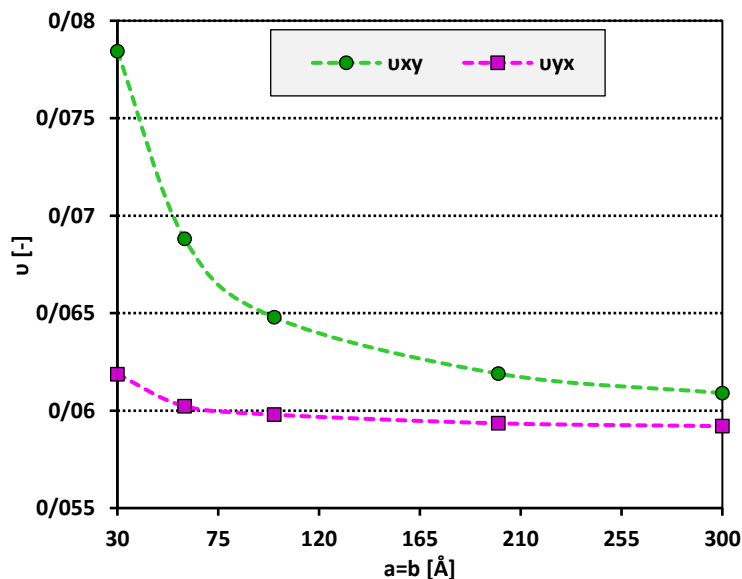
می‌شود که با طبیعت فیزیکی مواد در تطابق است. در اینجا باید به نوسانی بودن ضریب برشی و تفسیر فیزیکی احتمالی آن نیز اشاره نمود. در واقع بر اساس مرور پیشینه تحقیق، تعداد کمی از مراجع به مطالعه



شکل ۶: مدول برشی صفحه یک لایه برحسب اندازه صفحه

آن در جهت X بیشتر از حالت معکوس است. این می‌تواند به دلیل آرایش آرمچیر نانو صفحه باشد که طبق آن تعداد المان‌های مایل در جهت Y نسبت به جهت X بیشتر است و تغییر اندازه عرضی را تسهیل می‌کنند. اما با افزایش اندازه صفحه، این اختلاف کم شده و به تدریج به مقدار یکسانی میل می‌کنند که در مورد تفسیر آن مشابه سایر ضرایب می‌توان به نسبت آماری المان‌های مایل به کل المان‌ها اشاره نمود و معمولاً با افزایش اندازه تمایل به ایزوتروپی افزایش می‌یابد که در این صورت دو نسبت پواسون یکسان می‌شوند.

در ادامه به مطالعه ضریب پواسون نانو صفحه در اندازه‌های مختلف پرداخته شده و نمودارهای آن در شکل ۷ ارائه شده است. در اینجا نیز مشاهده می‌شود که در ابعاد کوچک، تفاوت بین دو نسبت پواسون کوچک و بزرگ قابل توجه است اما با افزایش اندازه صفحه، این دو نمودار به یک مقدار همگرا می‌شوند. طبق نمودارها، هر دو نسبت پواسون مثبت است که نشان می‌دهد با کشش صفحه در هر جهت، در جهت عمود بر آن لاغر می‌شود و ν_{xy} بزرگ‌تر نشان‌دهنده این واقعیت است که وقتی صفحه در جهت Y بارگذاری می‌شود میزان لاغر شدن



شکل ۷: ضرایب پواسون نانو صفحه یک لایه برحسب اندازه صفحه

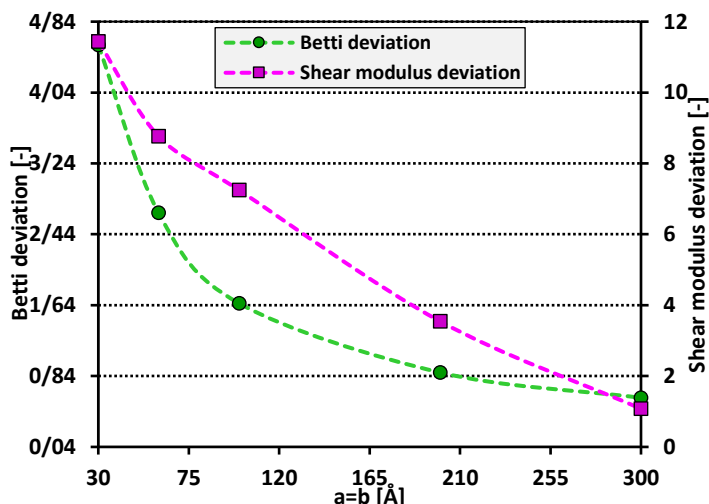
است، اما با افزایش اندازه که در آن وابستگی ویژگی‌ها به جهت خیلی کم می‌شود، دو نمودار کاهش پیدا کرده و به سمت صفر میل می‌کنند. در مورد چرایی وجود چنین وابستگی می‌توان به وابستگی رفتار به اندازه اشاره کرد که نشان می‌دهد هر چه اندازه کوچک‌تر باشد شدت وابستگی بیشتر است، البته در اندازه‌های کوچک باید به خطای فرض پیوستگی نیز اشاره نمود. در عین حال باید توجه داشت که این روابط برای مواد ارتوتروپ تعریف شده است و صفر نبودن این دو متغیر می‌تواند بیانگر غیرایزوتروپی از مرتبه بالاتری نسبت به ارتوتروپی باشد. در هر صورت با کنار هم قرار دادن نتایج این دو کمیت و نمودار تغییرات مدول یانگ، مدول برشی و ضریب پواسون می‌توان گفت که با افزایش اندازه صفحه میزان خطا کاهش می‌یابد و صفحه نیز به حالت ارتوتروپ میل می‌کند و اگر اندازه آن خیلی بزرگ شود به ایزوتروپ صفحه‌ای تبدیل می‌شود.

به منظور بررسی رفتار ارتوتروپیک یا ایزوتروپیک این نانو صفحات معیارهای انحراف بتی و انحراف مدول برشی به صورت زیر تعریف می‌گردد. در واقع در حالت ایزوتروپیک و ارتوتروپیک، انحراف بتی و انحراف مدول برشی صفر است و وجود مقدار غیر صفر می‌تواند معیاری از انحراف از فرض رفتار مذکور باشد.

$$Betti\ deviation = \left| \frac{E_x}{u_{xy}} - \frac{E_y}{v_{yx}} \right| \quad (20)$$

$$Shear\ modulus\ deviation = |G_{xy} - G_{yx}| \quad (21)$$

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در اندازه‌های کوچک که ویژگی‌ها به شدت تحت تأثیر جهت قرار می‌گیرند، تفاوت بین این دو معیار در مقایسه با صفر زیاد است و رفتار نانو صفحه غیرارتوتروپ

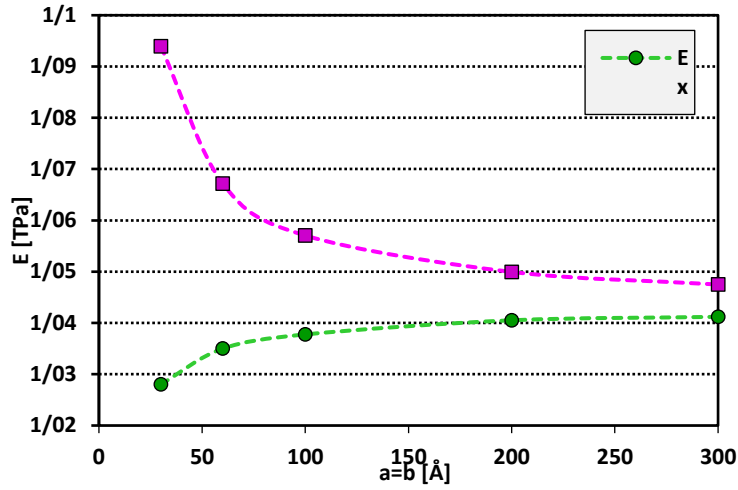


شکل ۸: انحراف نسبت بتی و انحراف مدول برشی نانو صفحه یک لایه برحسب اندازه آن

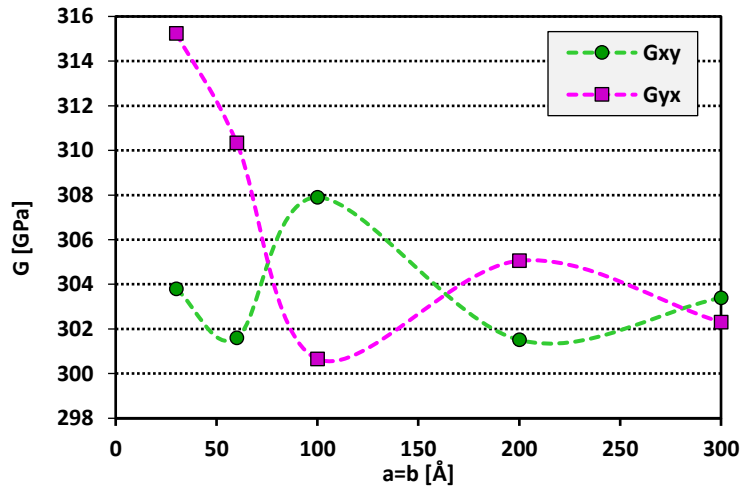
کوالانسی قوی کمتر مؤثر بوده و سهم قابل توجهی در نتایج ندارد. در واقع می‌توان گفت که هرگاه رفتار درون صفحه‌ای در نظر گرفته شود، وجود دو صفحه در کنار یکدیگر تفاوت چندانی با یک صفحه ندارد، مشروط بر این‌که مقدار بار نیز به همان نسبت تغییر کند. به عبارت دیگر، هر صفحه، تقریباً باری معادل بار تک صفحه از قسمت قبلی را حمل می‌کند. بنابراین از ارائه توضیحات در مورد دلایل و تفسیر فیزیکی این نمودارهای صرف نظر شده و می‌توان به همان توضیحات مربوط به صفحه تک لایه اشاره نمود.

۴-۲- خواص مکانیکی صفحه دو لایه برحسب اندازه

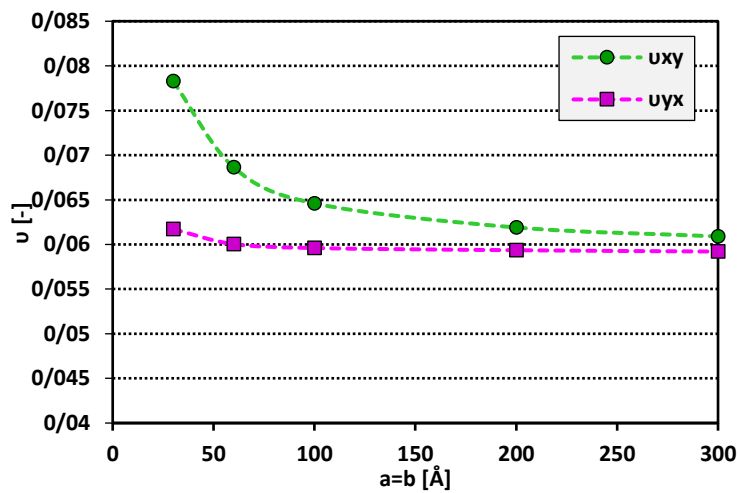
پس از مطالعه خواص الاستیک صفحات یک لایه نوبت به مطالعه خواص صفحه دو لایه می‌رسد که برای این منظور تغییرات خواص الاستیک آن برحسب اندازه آن‌ها در شکل ۹ تا شکل ۱۱ ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روند تغییر خواص مشابه صفحات یک لایه است و تفاوت جزئی بین این مقادیر و نتایج مربوط به صفحات تک لایه وجود دارد. این تفاوت جزئی به دلیل برهم-کنش‌های ضعیف واندروالسی بین دو لایه است که نسبت به پیوندهای



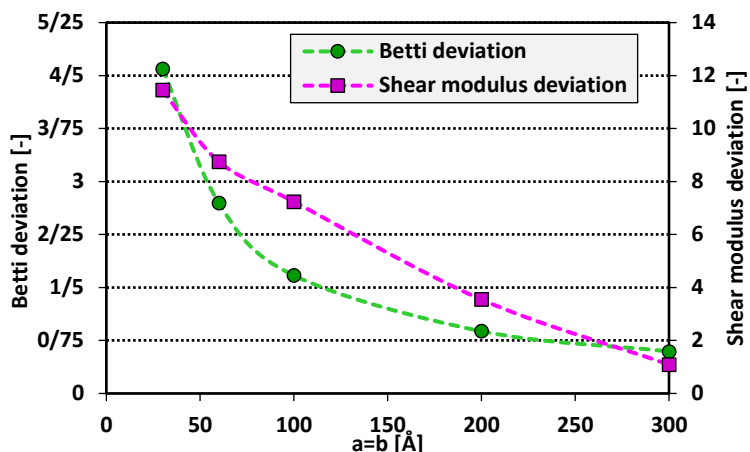
شکل ۹: مدول یانگ نانو صفحه دو لایه برحسب اندازه آن



شکل ۱۰: مدول برشی نانو صفحه دو لایه برحسب اندازه آن



شکل ۱۱: ضرایب پواسون نانو صفحه دو لایه برحسب اندازه آن



شکل ۱۲: انحراف نسبت بتی و مدول برشی نانو صفحه دو لایه بر حسب اندازه آن

مراجع، انطباق بیشتری با نتایج روش MD دارد که با توجه به هزینه محاسباتی کمتر یک مزیت محسوب می‌شود.

۳- براساس نتایج عددی، در نانو صفحه کوچک (30 Å)، مدول های یانگ در دو راستا دارای اختلاف حدود ۶٪، در اندازه بزرگ تر (100 Å) این اختلاف به حدود ۲٪ رسیده و با بزرگ تر شدن نانو صفحه به 300 Å این اختلاف به حدود ۰.۷٪ کاهش یافته است.

۴- طبق نتایج حاصل، ضرایب پواسون در دو راستای متعامد، در نانو صفحات مربعی یک لایه در ابعاد کوچک (10 Å)، دارای اختلاف قابل توجه حدود ۱۹٪ است؛ با رسیدن به اندازه (100 Å) اختلاف به حدود ۸٪ رسیده و در نهایت با رسیدن اندازه نانو صفحه به 300 Å، اختلاف خیلی کمتر شده و به حدود ۱.۵٪ رسیده است. مقایسه نتایج عددی ثابت می‌کند که همگرایی به ایزوتروپی در مدول یانگ سریع تر از نسبت پواسون رخ داده است.

۵- در مطالعه حاضر برای بررسی رفتار ارتوتروپیک یا ایزوتروپیک نانو صفحات، معیارهای انحراف بتی و انحراف مدول برشی تعریف گردید. نتایج نشان داد که در اندازه‌های کوچک که خواص به شدت تحت تأثیر جهت هستند مقادیر این دو معیار زیاد بوده و رفتار نانو صفحه غیرایزوتروپ است، اما با افزایش اندازه که وابستگی خواص به جهت خیلی کم می‌شود، دو نمودار کاهش پیدا کرده و به سمت صفر میل می‌کنند.

۶- منابع

[1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, pp. 56–58, 1991. [Online]. doi: [10.1038/354056a0](https://doi.org/10.1038/354056a0)

مشابه صفحات یک لایه با مشاهده شکل ۱۲، رفتار غیرایزوتروپیک صفحات دو لایه در اندازه‌های کوچک و سپس ارتوتروپیک و به تدریج ایزوتروپیک بودن این نانو صفحات در مقیاس‌های بزرگ برداشت می‌شود.

۵- نتیجه گیری

برای تعیین خواص الاستیک نانو صفحات، صفحات مربعی یک لایه و دو لایه با ابعاد مختلف بین ۳۰ تا ۳۰۰ انگستروم مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- مشاهده شد که در اندازه‌های خیلی کوچک صفحات، مقادیر مربوط به خواص در دو جهت x و y به شدت تحت تأثیر جهت بارگذاری بوده و تفاوت قابل توجهی دارند، اما با افزایش اندازه، این وابستگی به جهت کاهش یافته و در نهایت دو نمودار به یک مقدار مشخص همگرا می‌شوند. همچنین، در اندازه‌های کوچک که خواص به شدت تحت تأثیر جهت هستند، رفتار نانو صفحه غیرایزوتروپ است، ولی به تدریج با افزایش اندازه به سمت ارتوتروپی و در ادامه به ایزوتروپی میل می‌کند.

۲- نتایج کار حاضر به روش اجزاء محدود مکانیک ساختاری برای مدول یانگ و مدول برشی صفحات گرافنی یک لایه نسبت به روش‌های مختلف ارائه شده در مراجع اعتبارسنجی گردید. با مقایسه مدول یانگ به دست آمده توسط مدل پیشنهادی با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی‌های MD مشاهده می‌شود که مدل پیشنهادی از دقت بسیار زیادی برخوردار است. علاوه بر این، در مقایسه با مراجعی که از روشی مشابه تحقیق حاضر برای تعیین خواص الاستیک صفحات گرافنی استفاده کرده‌اند، نتایج دقیق‌تری حاصل شده است که نشان‌دهنده دقت مدل پیشنهادی است. در مقایسه با دیگر مقادیر گزارش شده در رابطه با مدول برشی، ملاحظه شد که نتیجه حاضر نسبت به نتایج مشابه در

- plates; one problem, different answers,” *European Journal of Mechanics*, vol. 59, pp. 124–139, 2016.
- [11] S. F. A. Namin and R. Pilafkan, “Vibration analysis of defective graphene sheets using nonlocal elasticity theory,” *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 93, pp. 257–264, 2017.
- [12] B. Liu, Z. Zhang, and Y. Chen, “Atomistic statics approaches—Molecular mechanics, finite element method and continuum analysis,” *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 5, pp. 1891–1913, 2008.
- [13] B. Liu, Y. Huang, H. Jiang, S. Qu, and K. C. Hwang, “The atomic-scale finite element method,” *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 193, pp. 1849–1864, 2004.
- [14] B. Liu, H. Jiang, Y. Huang, S. Qu, M.-F. Yu, and K. C. Hwang, “Atomic-scale finite element method in multiscale computation with applications to carbon nanotubes,” *Physical Review B*, vol. 72, p. 035435, 2005.
- [15] M. Malakouti and A. Montazeri, “Nanomechanics analysis of perfect and defected graphene sheets via a novel atomic-scale finite element method,” *Superlattices and Microstructures*, vol. 94, pp. 1–12, 2016.
- [16] A. Jafari, A. A. Khatibi, and M. M. Mashhadi, “Evaluation of mechanical and piezoelectric properties of boron nitride nanotube: a novel electrostructural analogy approach,” *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 9, pp. 461–468, 2012.
- [17] A. Sakhaee-Pour, M. T. Ahmadian, and A. Vafai, “Potential application of single-layered graphene sheet as strain sensor,” *Solid State Communications*, vol. 147, pp. 336–340, 2008.
- [18] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, “Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene,” *Science*, vol. 321, pp. 385–388, 2008.
- [2] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and A. Jorio, “Unusual properties and structure of carbon nanotubes,” *Annual Review of Materials Research*, vol. 34, pp. 247–278, 2004. [Online]. doi: [10.1146/annurev.matsci.34.040203.112300](https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.34.040203.112300)
- [3] A. Alizadeh, M. Heydari Beni, and R. Soltani Bidar, “Fabrication and Investigation of Mechanical Properties of Copper Alloy Matrix Composite Reinforced with Micron Diamond Particles,” *Scientific and Technological Mechanical Engineering*, vol. 3, pp. 117–132, 2024. [Online]. doi: [10.22034/STME.2024.471009.1068](https://doi.org/10.22034/STME.2024.471009.1068) (in Persian)
- [4] A. Alizadeh, M. Lotfian, and M. Heydari Beni, “Preparation of Al-B4C Composite by Mechanical Alloying Method and Investigation of Its Thermomechanical Properties,” *Scientific and Technological Mechanical Engineering*, vol. 3, pp. 163–183, 2024. [Online]. doi: [10.22034/STME.2024.471431.1070](https://doi.org/10.22034/STME.2024.471431.1070) (in Persian)
- [5] C. Q. Ru, “Axially compressed buckling of a double-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 49, pp. 1265–1279, 2001.
- [6] M. M. Shokrieh, Z. Shokrieh, and S. M. Hashemianzadeh, “Effective parameters in modeling of graphene sheet Young’s modulus,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 12, pp. 147–155, 2012. (in Persian)
- [7] C. Li and T.-W. Chou, “A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 40, pp. 2487–2499, 2003.
- [8] K. I. Tserpes and I. Vattistas, “Buckling analysis of pristine and defected graphene,” *Mechanics Research Communications*, vol. 64, pp. 50–56, 2015.
- [9] L. Wang and Q. Zhang, “Elastic behavior of bilayer graphene under in-plane loadings,” *Current Applied Physics*, vol. 12, pp. 1173–1177, 2012.
- [10] A. Jafari, S. S. Shah-enayati, and A. A. Atai, “Size dependency in vibration analysis of nano

- Composites Part B: Engineering*, vol. 36, pp. 468–477, 2005. [Online].: doi:[10.1016/j.compositesb.2004.10.003](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.10.003)
- [29] S. Singh and V. Dutt, “A reduced form for fundamental transverse modal frequency of carbon nanotubes,” *Materials Today Communications*, vol. 25, p. 101404, 2020. [Online]. doi:[10.1016/j.mtcomm.2020.101404](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101404)
- [30] S. K. Georgantzinos and N. K. Anifantis, “Vibration analysis of multi-walled carbon nanotubes using a spring–mass based finite element model,” *Computational Materials Science*, vol. 47, pp. 168–177, 2009.
- [31] D. Sánchez-Portal, E. Artacho, J. M. Soler, A. Rubio, and P. Ordejón, “Ab initio structural, elastic, and vibrational properties of carbon nanotubes,” *Physical Review B*, vol. 59, p. 12678, 1999.
- [32] F. Liu, P. Ming, and J. Li, “Ab initio calculation of ideal strength and phonon instability of graphene under tension,” *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 76, p. 064120, 2007.
- [33] B. WenXing, Z. ChangChun, and C. WanZhao, “Simulation of Young’s modulus of single-walled carbon nanotubes by molecular dynamics,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 352, pp. 156–163, 2004.
- [34] J.-L. Tsai and J.-F. Tu, “Characterizing mechanical properties of graphite using molecular dynamics simulation,” *Materials & Design*, vol. 31, pp. 194–199, 2010.
- [35] S. K. Georgantzinos, G. I. Giannopoulos, and N. K. Anifantis, “Numerical investigation of elastic mechanical properties of graphene structures,” *Materials & Design*, vol. 31, pp. 4646–4654, 2010.
- [36] G. I. Giannopoulos, I. A. Liosatos, and A. K. Moukanidis, “Parametric study of elastic mechanical properties of graphene nanoribbons by a new structural mechanics approach,” *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 44, pp. 124–134, 2011.
- [19] Y. Zhang and C. Pan, “Measurements of mechanical properties and number of layers of graphene from nano-indentation,” *Diamond and Related Materials*, vol. 24, pp. 1–5, 2012.
- [20] K. Esfarjani, N. Gorjizadeh, and Z. Nasrollahi, “Molecular dynamics of single wall carbon nanotube growth on nickel surface,” *Computational Materials Science*, vol. 36, pp. 117–120, 2006.
- [21] T. Belytschko, S. P. Xiao, G. C. Schatz, and R. S. Ruoff, “Atomistic simulations of nanotube fracture,” *Physical Review B*, vol. 65, p. 235430, 2002.
- [22] K. M. Liew, B. J. Chen, and Z. M. Xiao, “Analysis of fracture nucleation in carbon nanotubes through atomistic-based continuum theory,” *Physical Review B*, vol. 71, p. 235424, 2005.
- X. Sun and W. Zhao, “Prediction of stiffness and strength of single-walled carbon nanotubes by molecular-mechanics based finite element approach,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 390, pp. 366–371, 2005.
- [24] J. R. Xiao, J. Staniszewski, and J. W. Gillespie Jr, “Fracture and progressive failure of defective graphene sheets and carbon nanotubes,” *Composite Structures*, vol. 88, pp. 602–609, 2009.
- [25] T. Natsuki and M. Endo, “Structural dependence of nonlinear elastic properties for carbon nanotubes using a continuum analysis,” *Applied Physics A*, vol. 80, pp. 1463–1468, 2005.
- [26] G. J. Huguet Rodríguez, “Comparison of finite element buckling solutions for flat plates under complex combined loading to analytical methods,” M.S. thesis, 2015.
- [27] B. R. Gelin, *Molecular Modeling of Polymer Structures and Properties*, Hanser-Gardner Publications, 1994.
- [28] K. I. Tserpes and P. Papanikos, “Finite element modeling of single-walled carbon nanotubes,”



Experimental Study on Bending Fatigue of 3D-Printed Specimens Fabricated via Fused Deposition Modeling

Ammar Watheq Younus¹, Ali Hassani*², Abbas Zolfaghari³

1. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2 Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Abstract

Polymer components manufactured using additive manufacturing (AM) methods have many applications in various industries. Different parameters affect the quality of parts' printing, and subsequently their mechanical and surface properties. In this paper, the effect of 3D printing factors including layer height, printing speed, and temperature on the fatigue life of PLA specimens printed by the Fused Deposition Modeling is investigated. Layer heights of 0.2, 0.25, and 0.3 mm, printing speeds of 1000, 1400, and 1800 mm/min, and printing temperatures of 205, 215, and 225°C, all with an infill density of 100%, are considered. For this purpose, 15 different configurations were created in Minitab using the Box-Behnken method for laboratory evaluation. The fatigue life of specimens was obtained using a SANTAM rotational fatigue machine at a constant speed of 5 Hz. Then, using linear and nonlinear second-order regression models and fitting the experimental data, the fatigue life estimation function was extracted using the scikit-learn package in Python. Studies show that the results obtained from nonlinear regression are reliable and do not suffer from overfitting. The results also show that as the printing speed and layer height increase, the fatigue life of specimens decreases due to the reduction in the mechanical and surface quality of the samples. In addition, although the printing temperature does not have a large effect on the fatigue life; its changes are nonlinear, and using nonlinear regression estimation, the optimal temperature of 213 degrees in the printing temperature range of 205 to 225 degrees Celsius has been obtained.

Keywords

3D printing

PLA polymer

Rotating fatigue test

Fatigue life estimation

Linear and non-linear regressions.

Received: 01.27.2025

Revised: 03.16.2025

Accepted: 03.30.2025

*Corresponding Author

Ali Hassani

Email

Hassani@nit.ac.ir

1- Introduction

Recent technological advancements have significantly transformed conventional manufacturing methods. Through the development of innovative fabrication techniques, designers can now produce complex geometries that closely resemble final part specifications. The invention of multi-axis CNC machines and subsequent 3D printers has revolutionized industry, enabling the production of virtually any three-dimensional component using various raw materials [1].

A critical challenge in additively manufactured components lies in their mechanical behavior. The fundamental characteristic of all additive manufacturing (AM) techniques is their layer-by-layer fabrication approach [2]. This inherent feature results in anisotropic mechanical properties of manufactured parts. Numerous factors influence this phenomenon, most of which are determined by the manufacturing process parameters [3]. While 3D printing has primarily been utilized for prototyping applications, its adoption in full-scale production remains limited. The development of



diverse AM technologies has expanded their applications across medical, aerospace, automotive, and engineering sectors due to advantages such as design feasibility and integrated manufacturing capabilities [4]. The medical industry has begun exploring 3D printing for tissue engineering, organ development, and cellular structure fabrication [5]. The operational principle of 3D printers relies on additive manufacturing methodology. Initially, a virtual 3D model is created using computer-aided design (CAD) software. Subsequently, secondary software slices this model into multiple layers, generating G-code instructions [2]. In fused deposition modeling (FDM), the most common feedstock consists of thermoplastic filaments fed through a heated nozzle. This technique can achieve layer thicknesses up to 50 μm [2]. Compared to other AM methods, FDM has attracted significant research attention due to its cost-effectiveness and other advantages [6].

Research by Ezeh et al. [7] demonstrated that PLA specimens exhibit superior fatigue life compared to ABS counterparts. Furthermore, horizontally printed samples showed greater fatigue strength than vertically oriented ones. Dadashi and Azadi [8] found that reducing nozzle diameter improves fatigue performance. Safai et al. [9] highlighted the challenges in optimizing printing parameters for fatigue resistance due to complex interactions between process variables and material properties. Salim et al. [10] reported that PLA outperforms ABS in tensile strength, strain, and elastic modulus characteristics.

This study investigates the bending fatigue behavior of 3D-printed specimens fabricated via FDM. Multiple parameters influence the surface and internal quality of printed samples, consequently affecting their fatigue life. Key variables include layer height, melt temperature, thermoplastic polymer type, printing orientation, infill percentage, and printing speed. Notably, this research focuses specifically on 3D printing parameters affecting fatigue life, excluding applied bending load and

fatigue test machine rotational speed. It is important to emphasize that for polymeric materials, excessive rotational speeds during fatigue testing must be avoided due to their temperature-sensitive mechanical properties, as elevated speeds may induce thermal degradation during testing.

2- Materials and Methods

This study investigates the influence of FDM printing parameters on the fatigue life of 3D-printed specimens, focusing on layer height (0.2-0.3 mm), printing speed (1000-1800 mm/min), and melt temperature (205-225°C). A Box-Behnken experimental design was implemented in Minitab software, generating 15 test conditions (including 3 replicates) to evaluate 13 unique parameter combinations (Table 1 and Table 2). All specimens were printed using white PLA filament (1.75 mm diameter, Esun brand), selected for its superior deformation resistance (1.25-1.5 \times) and specific strength (1.1-1.3 \times) compared to ABS [11].

Table 1: Investigated Printing Parameters

<i>Values</i>			<i>Variable</i>
0.2	0.25	0.3	Layer Height (mm)
1000	1400	1800	Printing Speed (mm/min)
205	215	225	Melt Temperature (°C)
PLA			Filament Material

3- Discussion and Results

3.1 Fatigue life analysis

Rotational fatigue testing (5 Hz, 0.5 kg load) was conducted on triplicate samples for each parameter combination (Table 2).

Table 2: Experimental Design and Effect of various factors on fatigue life

Sample	Layer Height (mm)	Printing Temp. (°C)	Printing Speed (mm/min)	Cycles to Failure (Each Sample)			Mean Life
				1	2	3	
1	0.3	215	1000	35157	35781	36189	35709
2	0.2	225	1400	40479	40789	41012	40760
3	0.25	215	1400	36459	36795	37123	36792
4	0.25	215	1400	36459	36795	37123	36792
5	0.25	225	1000	38994	39564	39029	39195
6	0.25	215	1400	36459	36795	37123	36792
7	0.25	205	1000	39481	40465	39966	39971
8	0.2	215	1000	47062	47670	47149	47294
9	0.3	215	1800	26938	27842	27861	27547
10	0.3	225	1400	30895	31451	30021	30789
11	0.3	205	1400	47121	46159	47237	31126
12	0.25	205	1800	31049	30946	31482	31159
13	0.2	215	1800	35068	34875	35121	35021
14	0.2	205	1400	41542	42006	41894	41814
15	0.25	225	1800	30082	30746	30176	30335

3.2 Regression Modeling

Two predictive models were developed using Python's scikit-learn:

A) Linear Regression:

$$Sn_{lin} = +85605.21 - 99295 H - 37.38 T - 11.91 V \quad (1)$$

B) Nonlinear Regression:

$$Sn_{nonlin} = 111533.33H^2 + 358.5 HT + 51.38 HV - 304070 H - 9.49 T^2 - 0.00308 TV + 3957.65 T - 0.00424 V^2 - 12.22 V - 317328.08 \quad (2)$$

3.3 Validation Results

To evaluate the accuracy of the linear and nonlinear regression results, two additional test samples were examined. The outcomes of these two samples are presented in Table 3. Table 4 compares the experimental data with the predictions from both linear and nonlinear regression models, along with their respective percentage errors.

Table 3: Test samples for regression validation

Sample No.	Layer Height (mm)	Printing Temp. (°C)	Printing Speed (mm/min)	Cycles to Failure (Each Sample)			Mean Life
				1	2	3	
1	0.3	215	1400	31136	30224	31891	31084
2	0.25	205	1400	36767	36644	36521	36644

At first glance, it appears that the prediction error of the nonlinear regression function is greater than that of the linear regression. This observation stems from the fact that the characteristics of the two test samples happened to align more favorably with the linear regression model. Therefore, relying solely on these two test results would be insufficient to conclude that linear regression outperforms nonlinear regression in this study. However, this study provides two key pieces of evidence demonstrating the superior accuracy of the second-order nonlinear regression (Eq. 2) over linear regression (Eq. 1):

A) Python's Model Evaluation Scores:

The Python-generated scores assessing the models' ability to predict failure cycles were 0.97155 for linear regression and 0.9962 for nonlinear regression, indicating that the nonlinear regression achieves a better fit.

B) Least Squares Sum Comparison:

The sum of squared residuals (LS) was calculated for all samples (training and test). The results showed linear regression LS is 11,160,347; while the nonlinear regression LS equals to 2,726,721. The significantly lower LS value for nonlinear regression confirms its higher predictive precision.

Table 4: Accuracy assessment of linear and nonlinear regression models against experimental tests

<i>Sample 1</i>			<i>Sample 2</i>		
<i>Experimental (cycles)</i>	<i>Linear Regression (cycles)</i>	<i>Nonlinear Regression (cycles)</i>	<i>Experimental (cycles)</i>	<i>Linear Regression (cycles)</i>	<i>Nonlinear Regression (cycles)</i>
31,084	31,108	32,106	36,644	36,447	36,217
Error (%)	0.078	3.28	Error (%)	0.54	1.16

4- References

[1] R. Jerez-Mesa, J. Travieso-Rodriguez, X. Corbella, R. Busqué, and G. Gomez-Gras, "Kinematic optimization of FDM additive manufacturing process: defining a strategy for quality improvement," *Mechatronics*, vol. 36, pp. 119–126, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.mechatronics.2016.03.006](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.03.006)

[2] M. Domingo-Espín, "Contributions to the knowledge about additive manufacturing with

Fused Deposition Modeling technology," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.

[3] P. K. Gurralla and S. P. Regalla, "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modeling," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, no. 3, pp. 141–149, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1080/17452759.2014.914957](https://doi.org/10.1080/17452759.2014.914957)

[4] F. Calignano et al., "Overview on additive manufacturing technologies," *Proceedings of the*

IEEE, vol. 105, no. 4, pp. 593–612, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1109/JPROC.2016.2625098](https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2625098)

[5] F. P. W. Melchels et al., “Additive manufacturing of tissues and organs,” *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 8, pp. 1079–1104, 2012. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007)

[6] B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 192–204, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-01-2013-0012](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012)

[7] O. H. Ezeh and L. Susmel, “On the fatigue strength of 3D-printed polylactide (PLA),” *Procedia Structural Integrity*, vol. 9, pp. 29–36, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.prostr.2018.06.006](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.006)

[8] A. Dadashi and M. Azadi, “Experimental bending fatigue data of additive manufactured PLA

biomaterial fabricated by different 3D printing parameters,” *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101553, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.addma.2020.101553](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101553)

[9] L. Safai, J. S. Cuellar, G. Smit, and A. A. Zadpoor, “A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers,” *Additive Manufacturing*, vol. 28, pp. 87–97, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.addma.2019.04.015](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.015)

[10] M. A. Salim, Z. H. Termiti, and A. M. Saad, “Mechanical Properties on ABS/PLA Materials for Geospatial Imaging Printed Product using 3D Printer Technology,” *Elsevier Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 65–72, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.promfg.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.011)

[11] S. Singh and R. Singh, “Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 123–143, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-08-2014-0092](https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2014-0092)



مطالعه تجربی خستگی خمشی قطعات چاپ سه‌بعدی ساخته‌شده با روش ریزش مذاب

عمار واثق‌یونس^۱، علی حسنی^{۲*}، عباس ذوالفقاری^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

چکیده

امروزه قطعات پلیمری ساخته شده با روش‌های ساخت افزودنی در صنایع مختلف کاربردهای متعددی دارند. پارامترهای مختلفی بر کیفیت چاپ قطعات و متعاقباً خواص مکانیکی و سطحی آن‌ها تأثیر می‌گذارند. در این مقاله، تأثیر فاکتورهای چاپ سه‌بعدی شامل ارتفاع لایه‌ها، سرعت و دمای چاپ بر عمر خستگی نمونه‌های پلیمر پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) چاپ‌شده با روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده (FDM) بررسی شده است. ارتفاع لایه‌ها ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ میلی‌متر، سرعت چاپ ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و دمای چاپ ۲۰۵، ۲۱۵ و ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد، همگی با درصد پرشدگی ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است. بدین منظور ۱۵ پیکربندی مختلف در نرم‌افزار Minitab با استفاده از روش Box-Behnken برای ارزیابی آزمایشگاهی این عوامل ایجاد شد. عمر خستگی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه خستگی دورانی ستام با سرعت ثابت ۵ هر تیز بدست آمد. سپس با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی مرتبه دوم و برازش داده‌های آزمایشگاهی، تابع تخمین عمر خستگی با استفاده از بسته scikit-learn در Python استخراج گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد نتایج حاصل از رگرسیون غیرخطی قابل اعتماد بوده و دچار برازش بیش از حد (over fitting) نیز نمی‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هر چه سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها افزایش یابد، عمر خستگی نمونه‌ها به دلیل کاهش کیفیت مکانیکی و سطحی نمونه‌ها، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اگرچه دمای چاپ تأثیر زیادی بر عمر خستگی ندارد؛ اما تغییرات آن غیرخطی بوده و با استفاده از تخمین رگرسیون غیرخطی، دمای بهینه ۲۱۳ درجه در محدوده‌ی دمای چاپ ۲۰۵ الی ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد بدست آمده است.

کلمات کلیدی

چاپ سه‌بعدی
تست خستگی دورانی
تخمین عمر خستگی
رگرسیون‌های خطی و غیرخطی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰

*نویسنده مسئول

علی حسنی

ایمیل

Hassani@nit.ac.ir

۱- مقدمه

ممکن شده است [۱]. یکی از چالش‌هایی که در قطعات تولیدشده با روش‌های ساخت افزایشی مطرح است، رفتار مکانیکی آن‌ها می‌باشد. پیچیدگی مشخص کردن خواص مکانیکی این نوع قطعات در تعداد پارامترهای متغیری است که در فرآیند ساخت آن‌ها دخیل هستند و عدم اطلاع از نحوه تعامل آن‌ها با یکدیگر نیز مطرح است. مشخصه اصلی مشترک در همه روش‌های ساخت افزودنی (AM^۱) این واقعیت است که قطعات توسط لایه‌های انباشته ساخته می‌شوند [۲]. این ویژگی باعث می‌شود که قطعات ساخته‌شده، رفتار مکانیکی

امروزه پیشرفت تکنولوژی، روش‌های رایج سنتی ساخت و تولید را دچار تغییر و تحول بسیاری کرده است. با بهبود و ایجاد روش‌های نوین ساخت، طراحان قادرند تا طرح‌های پیچیده‌ی خود را هر چه بیشتر به شکل نهایی قطعات نزدیک کنند. طرح‌هایی که تا چندی پیش، امکان ساخت آن‌ها وجود نداشت و یا به‌صرفه نبود. اختراع ماشین‌های کنترل عددی چند محوره و در پی آن چاپگرهای سه‌بعدی، انقلابی بزرگ در صنعت ایجاد کرد و با استفاده از این ماشین‌آلات تقریباً ساخت هر نوع قطعه‌ی سه‌بعدی و فضایی با انواع مواد اولیه

¹ Additive manufacturing



همچنین اکسترودر پرینتر، دما و سرعت و غیره را کنترل می‌کند و توسط ماشین قابل فهم می‌باشد و لذا در این نوشتار از آن با عنوان کد دستورات عمل یاد می‌گردد. کد دستورات عمل ذخیره می‌شود و به ماشین منتقل می‌گردد و با توجه به جنس ماده‌ی ورودی، چاپگر شروع به چاپ لایه به لایه قطع می‌کند.

از دهه ۱۹۸۰، طیف گسترده‌ای از روش‌های چاپ سه‌بعدی به دلیل تقاضای بالای صنایع تولیدی ابداع شده است و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان استریولیتوگرافی^۱، تف جوشی لیزری انتخابی^۲، ساخت اشیای چند لایه^۳، نوشتن مستقیم جوهر^۴ و روش ریزش مذاب (FDM^۷) دسته‌بندی کرد. فرآیند ریزش مذاب یا لایه نشانی مذاب در دهه‌ی ۱۹۹۰ تجاری‌سازی شد. ساخت قطعه با برش لایه به لایه مدل سه بعدی قطعه و تبدیل به جی‌کد آغاز می‌شود. ماده اولیه مورد استفاده این دستگاه عموماً ترموپلاستیک‌ها هستند و به شکل رشته‌ای با قطر معین وارد نازل گرم دستگاه که قابلیت حرکت در دو جهت صفحه‌ای (در دستگاه‌های متداول بازار) را دارد، وارد شده و بر اساس جی‌کد ورودی در مکانی خاص خارج می‌شود. محور عمودی نیز برای ضخامت بخشی به قطعه پس از هر لایه جابجا می‌شود تا در آخر قطعه نهایی تولید شود. این روش دارای ضخامت لایه‌ای تا ۵۰ میکرومتر می‌تواند داشته باشد. از این روش برای تولید مستقیم یا ساخت مدل ریخته‌گری قطعه مشبک می‌توان استفاده کرد [۲]. مدل‌سازی رسوب ذوب شده از یک نازل گرم برای تبدیل رشته ترموپلاستیک به شکل نیمه مذاب استفاده می‌کند که برای ساخت ساختار از طریق رسوب لایه به لایه اکسترودر می‌شود. در مقایسه با سایر روش‌های AM، از آنجایی که روش FDM مزایای بسیاری از جمله کاهش هزینه را ارائه می‌دهد، اکنون بسیاری از محققان برای مطالعه به سمت FDM روی می‌آورند [۹].

ایده و همکاران [۱۰] در مطالعه خود، تأثیر جهت چاپ بر خواص خستگی خمشی چرخه قطعات پلیمری ساخته شده با روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده را در چاپ سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های PLA^۸ طول عمر خستگی بهتری نسبت به نمونه‌های ABS^۹ داشتند. علاوه بر این، نشان داده شد که استحکام خستگی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی در جهت افقی بیشتر از نمونه‌های

ناهمسان‌گردی از خود نشان دهند. از سوی دیگر، تفاوت قابل توجهی بین نیروهای اتصال بین لایه‌ها و بین ذرات همان لایه وجود دارد. عوامل زیادی بر این پدیده تأثیر می‌گذارند و بیشتر آن‌ها با نحوه ساخت قطعات تعیین می‌شوند. فرآیند تولید، تحت تأثیر پارامترهای مختلفی است که با تعریف و کنترل آن‌ها می‌توان خواص خوبی در قطعات نهایی به دست آورد [۳].

به‌وضوح قابل مشاهده است که چاپ سه‌بعدی عمدتاً در تولید نمونه اولیه در تمام این سال‌ها استفاده شده است و رشد این فناوری در تولید واقعی هنوز در سطح پایین‌تری قرار دارد. با اختراع انواع مختلف فناوری‌های AM، این روش به دلیل مزایای فراوان از جمله امکان‌سنجی تولید مجتمع‌ها، به صنایع پزشکی، هوافضا، خودروسازی، صنایع غذایی و مهندسی گسترش یافته است. طراحی، اثربخشی هزینه، زمان کوتاه و تکرارپذیری این روش باعث محبوبیت استفاده از آن شده است [۴]. صنعت پزشکی شروع به آزمایش با توسعه بافت‌ها، اندام‌ها و ساختارهای سلولی با استفاده از چاپ سه‌بعدی کرده است [۵]. با پذیرش چاپ سه‌بعدی در صنعت خودرو، زمان مورد نیاز برای ایزارسازی و همچنین هزینه ساخت نمونه‌های اولیه کاهش یافت [۶]. چاپ سه‌بعدی امکان ایجاد قطعات منحصربه‌فرد برای حجم بالا و پایین را فراهم کرده است. صنعت هوافضا به یکی از صنایع پر سود چاپ سه‌بعدی تبدیل شده است، زیرا سازه‌های معمولی را می‌توان با ساختارهای هندسی سبک، انعطاف‌پذیر و بهبود یافته جایگزین کرد تا مصرف سوخت و ضایعات مواد را کاهش داد [۷]. بر اساس داده‌های آماری در سال ۲۰۱۸، پیش‌بینی شد که نرخ رشد ترکیبی سالانه (CAGR) چاپ سه‌بعدی در صنایع پزشکی، خودروسازی، هوافضا و صنایع غذایی تا ابتدای سال ۲۰۲۶، به ترتیب ۱۸/۲٪، ۲۹/۰۷٪، ۲۲/۱۷٪ و ۳۲/۰۵٪ خواهد بود.

اساس کار چاپگرهای سه‌بعدی به روش ساخت افزایشی می‌باشد. به این صورت که در مرحله اول یک مدل سه‌بعدی مجازی از قطعه موردنظر در نرم‌افزار طراحی به کمک کامپیوتر^۱ ساخته می‌شود. در مرحله بعد، یک نرم‌افزار ثانویه این مدل سه‌بعدی را به صورت برش‌های مختلف درآورده و مجموع این لایه‌ها با هم جی-کد^۲ را می‌سازد. جی-کد زبانی حرفی-عددی می‌باشد که نحوه حرکت محورهای حرکتی و

^۶ Direct ink writing

^۷ Fused deposition modelling (FDM)

^۸ Polylactic acid (PLA)

^۹ Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

^۱ Computer aided design (cad)

^۲ G-Code

^۳ Stereolithography

^۴ Selective laser sintering

^۵ Laminated object manufacturing

بهینه‌سازی فرآیند چسبندگی برای قطعات تولیدشده توسط FFF قرار دادند. این مطالعه افزایش قابل توجهی در نیروهای چسبندگی هنگام چاپ قطعات در دمای بستر کمی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای مواد چاپ را نشان داد. لی و همکاران [۱۹] مکانیسم‌های اصلی که موجب شکست خستگی قطعات فولادی ضد زنگ ۳۰۴ در شرایط سطحی ماشین‌کاری و صیقل‌شده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حساسیت به زبری سطح و حالت کنترل بستگی دارد. همچنین نتایج نشان داد که آزمون‌های خستگی مبتنی بر تنش، حساسیت بیشتری نسبت به آزمون‌های خستگی مبتنی بر کرنش خواهد داشت. در مطالعه آزادی و همکاران [۲۰]، طول عمر خستگی دامنه پایین کامپوزیت‌های چند لایه کربن/اپوکسی بررسی شد. تجزیه و تحلیل حساسیت همچنین برای مطالعه اثرات دامنه جابجایی و فرکانس بارگذاری بر طول عمر خستگی سیکل پایین در کامپوزیت‌ها انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش دامنه جابجایی، طول عمر خستگی سیکل پایین همان‌طور که انتظار می‌رفت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هنگامی که فرکانس بارگذاری افزایش یافت، طول عمر خستگی کامپوزیت‌ها در سیکل کم، کاهش یافت.

چاپ سه‌بعدی محصولات با استفاده از پلیمرهای پلاستیکی به‌طور گسترده‌ای مورد کاوش قرار گرفته و در فناوری فضایی استفاده می‌شود. انتخاب پلیمرهای پلاستیکی که قرار است مورد استفاده قرار گیرند به تکنیک چاپ سه‌بعدی، کاربردها و خواص آن‌ها بستگی دارد. سلیم و همکاران [۲۱] به‌طور خاص در مورد خواص مکانیکی دو مورد از متداول‌ترین مواد پلیمری چاپ سه‌بعدی در فناوری زمین فضایی، که عبارت‌اند از پلی لاکتیک اسید (PLA) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) توضیح دادند. نتایج تجربی نشان داد که PLA از نظر استحکام، کرنش و مدول الاستیسیته عملکرد کششی بهتری دارد. برای تست خمشی، PLA از نظر استحکام و مدول الاستیسیته عملکرد بهتری نشان می‌دهد، اما ABS از نظر کرنش برتری بیشتری دارد. به همین دلیل، می‌توان نتیجه گرفت که مواد پلیمری پلاستیکی مختلف خواص مکانیکی متمایزی از خود نشان می‌دهند. هدف از بررسی باقری و همکاران [۲۲] تحلیل تجربی رفتار خستگی نمونه‌های NiTi (مثلاً Nitinol) ساخته‌شده با افزودنی و مقایسه نتایج با مواد فرفورزه بود. فراکتوگرافی سطح شکست نمونه‌های خستگی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) وجود عیوب ریزساختاری مانند حفره‌ها را نشان داد که ناشی از گاز محبوس شده یا عدم هم‌جوشی بود و به‌عنوان محل شروع ترک عمل کردند که دلیل اصلی کوتاه شدن

چاپ سه‌بعدی در جهت عمودی می‌باشد. آربیتز و همکاران [۱۱] مطالعه‌ای بر روی شکست و عملکرد خستگی پلی لاکتید چاپ‌شده با استفاده از نمونه‌های کشش فشرده (CT) و خم بریدگی تک لبه (SENB) برای یک جهت (0° و 90°) و $90^\circ/0^\circ$ تحت یکنواخت انجام دادند. آزمایش‌های خستگی بر روی نمونه‌های CT استقلال مشابه‌ای را در جهت‌گیری رشته برای قوانین شروع ترک و انتشار ترک ثابت کرد که می‌تواند برای تخمین طول عمر اجزای تولیدشده توسط FFF استفاده شود. صفایی و همکاران [۱۲] برای درک بهتر اثرات تکنیک چاپ، مواد چاپی و پارامترهای چاپ بر رفتار خستگی مواد چاپ سه‌بعدی، مروری بر داده‌های موجود در ادبیات موجود از جمله پروتکل‌های تست خستگی و تجزیه و تحلیل کمی از خستگی موجود را ارائه کردند. نتایج بررسی ادبیات به‌وضوح نشان داد که به دلیل هم‌افزایی بین پارامترهای چاپ و خواص مواد چاپی، تعیین بهترین ترکیب از متغیرها برای مقاومت در برابر خستگی چالش برانگیز است. داداشی و آزادی [۱۳] به بررسی ویژگی‌های خستگی خمشی

بایومتریال‌های PLA ساخته‌شده با چاپگرهای سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با کاهش قطر نازل، رفتار خستگی نمونه بهبود می‌یابد. علاوه بر این، به این نتیجه رسیدند که چاپ در دماهای پایین‌تر سبب افزایش عمر خستگی نمونه می‌شود. هوراسان و ساراک [۱۴] نیز رفتار خستگی مواد PLA چاپ سه‌بعدی شده را به‌صورت تجربی و المان محدود بررسی نمودند. آن‌ها به‌طور ویژه تأثیر سرعت و زاویه چاپ بر رفتار نمونه‌ها را مطالعه نمودند. نتایج بررسی‌های ایشان نشان داد که افزایش سرعت چاپ تأثیر منفی بر عمر خستگی تمام نمونه‌ها دارد، که این مورد متفاوت از نتایج بررسی‌های بختیاری و همکاران [۱۵] است. محققین دیگر [۱۶، ۱۷] نیز با بررسی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده PLA به این نتیجه رسیدند که فاکتورهایی از جمله ارتفاع لایه‌ها، دمای نازل، درصد پرشدگی و دمای بستر بر عمر خستگی نمونه‌ها تأثیرگذارند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان می‌دهد که نتیجه‌گیری کلی در مورد تأثیر هریک از پارامترها چالش برانگیز است. به‌عبارت‌دیگر، هریک از پارامترها بسته به نوع بارگذاری و ماده می‌توانند تأثیر مثبت یا منفی بر رفتار نمونه داشته باشند [۱۶].

برای قطعات تولیدشده توسط ساخت فیلامنت ذوب‌شده (FFF) چسبندگی بین اولین لایه چاپ شده و بستر چاپ بسیار مهم است، زیرا پایه و اساس لایه‌های بعدی را فراهم می‌کند. چسبندگی ناکافی می‌تواند منجر به کیفیت چاپ پایین یا تخریب سطوح بستر شود. مارتین اسپورک و همکاران [۱۸] هدف از مطالعه خود را درک و

جدول ۱: پارامترهای چاپ مورد بررسی

متغیر	مقادیر	
ارتفاع لایه	۰/۲	۰/۲۵
سرعت چاپ (mm/min)	۱۰۰۰	۱۴۰۰
دمای مذاب (°C)	۲۰۵	۲۱۵
جنس فیلامنت	PLA	

همچنین به منظور طراحی آزمایش، با قراردادی فاکتورهای مذکور در نرم افزار Minitab، ۱۵ حالت توسط روش باکس-بنکن مطابق جدول ۲ تولید شده است. همان طور که قابل مشاهده است در این طراحی، ردیف‌های ۳، ۴ و ۶ جدول تکراری می‌باشند و لذا ۱۳ سه‌تایی مستقل برای چاپ نمونه‌ها و تست خستگی در اختیار است.

جدول ۲: طراحی آزمایشات

نمونه	ارتفاع لایه‌ها	دمای چاپ	سرعت چاپ
1	0.3	215	1000
2	0.2	225	1400
3	0.25	215	1400
4	0.25	215	1400
5	0.25	225	1000
6	0.25	215	1400
7	0.25	205	1000
8	0.2	215	1000
9	0.3	215	1800
10	0.3	225	1400
11	0.3	205	1400
12	0.25	205	1800
13	0.2	215	1800
14	0.2	205	1400
15	0.25	225	1800

در این پژوهش، قطعات با روش FDM و با ماده فیلامنت از جنس PLA تولید شده‌اند. این نوع فیلامنت جزء محبوب‌ترین مواد مورد استفاده در روش FDM محسوب می‌شوند. فیلامنت PLA در مقایسه با فیلامنت ABS مقاومت ۱/۲۵ الی ۱/۵ برابری در برابر تغییر شکل از خود نشان داده و همچنین PLA، ۱/۱ تا ۱/۳ برابر استحکام ویژه‌ی بالاتری نسبت به ABS دارد [۲۴]. فیلامنت PLA بکار گرفته شده در این پژوهش، از برند شرکت Esun می‌باشد. این فیلامنت PLA به رنگ سفید بوده و قطر سطح مقطع فیلامنت ۱/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. برای چاپ نمونه‌های تست خستگی از دستگاه چاپگر سه‌بعدی ساخت شرکت کوانتوم^۲ مدل Twin که ساخت ایران می‌باشد، استفاده شده است. فرآیند چاپ قطعات مورد نظر با رسم مدل سه‌بعدی آن‌ها

عمر خستگی بود. امینی و همکاران [۲۳] با توجه به تأثیر بسیار زیاد چسبندگی بین لایه‌ای در عمر نهایی قطعات ساخته شده به روش پرینت سه‌بعدی، چندین نمونه قطعات استاندارد آزمون کشش و مهره پایین کمر را با ماده PLA و با استفاده از روش ریزش مذاب در دو راستای افقی و عمودی پرینت کردند و تحت آزمایش‌های استاندارد کشش و خستگی قرار دادند. آن‌ها نتایج را با شبیه‌سازی اجزاء محدود مقایسه کردند و نشان دادند که راستای پرینت قطعات بسیار در عمر خستگی قطعات مؤثر می‌باشد.

هدف از این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی خستگی خمشی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده با روش ریزش مذاب می‌باشد. پارامترهای مختلفی بر کیفیت سطحی و داخلی نمونه چاپ شده و در نتیجه بر عمر خستگی قطعه نهایی تأثیرگذار هستند. از جمله این پارامترها می‌توان به ارتفاع لایه‌های چاپ، دمای مذاب، نوع پلیمر ترموپلاستیک، جهت چاپ و درصد پرشدگی^۱، سرعت چاپ و همچنین مقدار بار خمشی اعمال شده، سرعت دورانی دستگاه تست خستگی و غیره اشاره کرد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، هدف بررسی پارامترهای چاپ سه‌بعدی که بر عمر خستگی قطعه تأثیر دارند، می‌باشد. لذا پارامترهایی مانند مقدار بار خمشی اعمال شده و سرعت دورانی دستگاه تست خستگی، بررسی نخواهند شد. ذکر این نکته جالب توجه است که در پلیمرها به دلیل تأثیرپذیری شدید استحکام مکانیکی آن‌ها از تغییرات دما، نمی‌توان سرعت دورانی دستگاه تست خستگی را از حد معینی بالاتر برد؛ زیرا افزایش بیش از حد سرعت زاویه‌ای، موجب افزایش دمای ماده چاپ شده و در نتیجه افت خواص پلیمر ترموپلاستیک در حین تست خستگی می‌گردد.

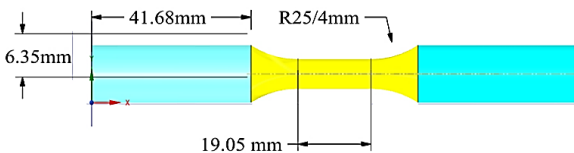
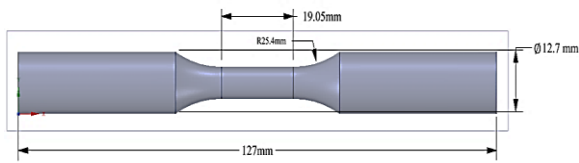
۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- طراحی آزمایش

پارامترهای تأثیرگذار بر عمر خستگی نمونه‌ها به دو بخش هندسه و پارامترهای چاپ قطعات تقسیم می‌شوند که تمرکز در این پژوهش معطوف به پارامترهای چاپ شامل ضخامت لایه‌ها، سرعت و دمای چاپ است. جنس مواد برای همه آزمایش‌ها PLA بوده و متغیرهای آزمایش، پارامترهای چاپ مذکور هستند. طراحی آزمون در نرم‌افزار Minitab با اعمال فاکتورهای ارتفاع لایه‌ها، سرعت و دمای چاپ با روش باکس بنکن انجام شده است. پارامترهای چاپ مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

^۲ Quantum

^۱ Infill percentage



(الف)



(ب)



شکل ۲: الف) خروجی فایل SolidWorks و مشخصات هندسی

نمونه‌های چاپ شده PLA

ابعاد بر اساس استاندارد ASTM E606 -92 - Reapproval 1998

تعیین شده‌اند، (ب) نمونه PLA چاپ شده برای تست خستگی؛ (پ) نمونه

شکست ناشی از خستگی

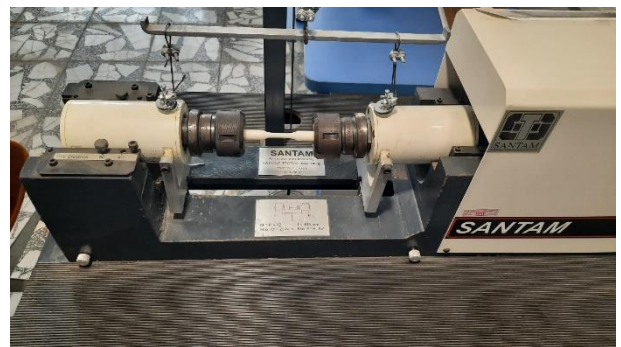
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر فاکتورهای مختلف بر عمر خستگی

نمونه‌های چاپ شده تحت تست خستگی دورانی با دستگاه سننام SFT-850 با سرعت دورانی ۵ هرتز قرار گرفته است تا منجر به شکست نمونه گردد. از هر ردیف از جدول ۲، سه نمونه چاپ شده و تحت تست خستگی قرار گرفته تا در تعداد دور مشخص ناشی از خستگی بشکند. سپس برای هر نمونه با محاسبه مقدار متوسط سیکل‌های طی شده، عمر خستگی به دست آمده است. در جدول ۳ تأثیر عوامل مختلف بر عمر خستگی نشان داده شده است.

در نرم‌افزار طراحی صنعتی SolidWorks^۱ شروع و با انتقال مدل به نرم‌افزار Simplify3D شرایط چاپ اعمال شد. با انتقال فایل جی-کد خروجی به چاپگر قطعات مورد نظر چاپ شدند. پارامترهای چاپ شامل سرعت، ضخامت لایه و دمای چاپ هستند. همچنین مقادیر پارامترهای ثابت برای چاپ قطعات در این پژوهش، شامل دمای بستر 60 °C، دمای محفظه 28 °C، قطر نازل 0.4 mm و درصد پرشدگی 100% می‌باشد. جهت چاپ نیز عمودی و از پایین به بالا بوده است تا نیاز به مواد محافظ که در جهت افقی می‌بایست به همراه قطعه پرینت شود، از بین برود.

در دستگاه تست خستگی دورانی سننام مدل SFT-850، یک نمونه‌ی چاپ شده تحت چرخش با بار 0.5 کیلوگرم قرار می‌گیرد. از آنجائی که نمونه مورد نظر از جنس پلیمر است، سرعت دورانی دستگاه نباید بیشتر از 5 Hz باشد؛ زیرا در غیر این صورت دمای نمونه بالا رفته و موجب افت خواص مکانیکی نمونه می‌گردد. در حین این آزمون، سطح نمونه تحت بیشترین مقدار تنش قرار دارد. این آزمون در فشار اتمسفر و در معرض هوا صورت می‌گیرد. آزمون تا زمانی ادامه می‌یابد که نمونه تخریب شود و یا به مقدار چرخه‌ی از پیش تعیین شده (معمولاً 10⁷ دور) برسد. تصویر دستگاه تست خستگی دورانی سننام با نمونه سوار شده بر آن در شکل ۱، نشان داده شده است.



شکل ۱: دستگاه تست خستگی دورانی سننام با نمونه نصب شده

۳-۲- نمونه چاپ شده

خروجی فایل SolidWorks برای مدل‌سازی هندسی نمونه‌ها و مشخصات هندسی آن‌ها در شکل ۲-الف نشان داده شده است. همچنین یک نمونه‌ی چاپ شده جهت تست خستگی، در شکل ۲-ب نشان داده شده است

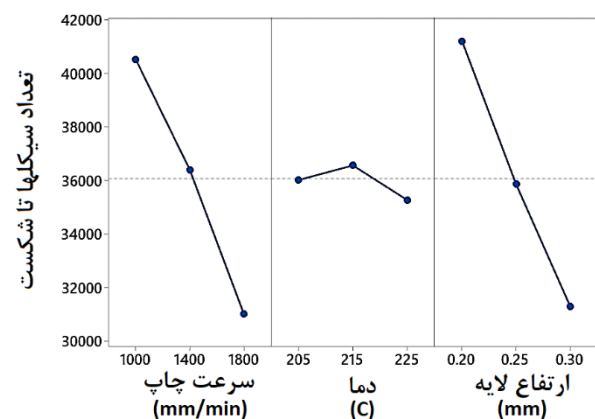
^۱ CATIA (computer-aided three-dimensional interactive application)

جدول ۳: تأثیر عوامل مختلف بر عمر خستگی

انحراف معیار	عمر متوسط	تعداد سیکل تا لحظه‌ی شکست هر نمونه			سرعت چاپ (mm/min)	دمای چاپ (°C)	ارتفاع لایه (mm)	شماره نمونه
		3	2	1				
520	35709	36189	35781	35157	1000	215	0.3	1
268	40760	41012	40789	40479	1400	225	0.2	2
332	36792	37123	36795	36459	1400	215	0.25	3
332	36792	37123	36795	36459	1400	215	0.25	4
319	39195	39029	39564	38994	1000	225	0.25	5
332	36792	37123	36795	36459	1400	215	0.25	6
492	39971	39966	40465	39481	1000	205	0.25	7
329	47294	47149	47670	47062	1000	215	0.2	8
527	27547	27861	27842	26938	1800	215	0.3	9
721	30789	30021	31451	30895	1400	225	0.3	10
444	31126	47237	46159	47121	1400	205	0.3	11
284	31159	31482	30946	31049	1800	205	0.25	12
129	35021	35121	34875	35068	1800	215	0.2	13
242	41814	41894	42006	41542	1400	205	0.2	14
359	30335	30176	30746	30082	1800	225	0.25	15

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت لایه - های چاپ، تعداد دور سیکل تا قبل از شکست، کاهش می‌یابد؛ بنابراین، با کاهش ضخامت لایه‌ها، کیفیت مکانیکی قطعه چاپ شده افت کرده که منجر به شکست زودتر قطعه می‌شود. کاهش کیفیت مکانیکی نمونه‌ها با افزایش ضخامت لایه‌ها، به دلیل ایجاد حفره^۱ در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین هر چه سرعت چاپ افزایش یابد، تعداد سیکل تا قبل از شکست کاهش می‌یابد. این امر ناشی از کاهش کیفیت مکانیکی و همچنین زبری بیشتر سطح نمونه چاپ شده است. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که تغییرات دما تأثیر چندانی بر روی عمر خستگی نمونه‌ها ندارد؛ ولی با این وجود دمای بهینه از سه دمای مذکور، دمای ۲۱۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از سوی دیگر مشخص است، دمای چاپ رابطه غیرخطی با تعداد سیکل دارد. لذا برای تخمین رفتار ماده از رگرسیون غیرخطی استفاده می‌شود و نتیجه با تخمین رگرسیون خطی مقایسه می‌گردد. برای این منظور، مجموع حداقل مربعات

با استفاده از جدول ۳ در نرم‌افزار Minitab، عمر خستگی متوسط نمونه‌ها برحسب سه فاکتور ضخامت لایه، دمای چاپ و سرعت چاپ به صورت نشان داده شده در شکل ۳ به دست آمده است.



شکل ۳: عمر خستگی متوسط نمونه‌ها برحسب پارامترهای مورد بررسی

¹ Void

$$Sn_{lin} = c_0 + c_1H + c_2T + c_3V \quad (1)$$

$$Sn_{nonlin} = c_0 + c_1H + c_2T + c_3V + c_4T^2 + c_5V^2 + c_6H^2 + c_6HT + c_7VT + c_8HV \quad (2)$$

که H ، T و V به ترتیب ارتفاع لایه، دمای چاپ، و سرعت چاپ می‌باشد. با استفاده از بسته pandas در پایتون، دیتافریم^۳ ارائه شده در جدول ۱ و جدول ۵ برای تخمین به ترتیب رگرسیون خطی و رگرسیون غیرخطی تشکیل شده است.

جدول ۴: دیتافریم تشکیل شده در pandas برای رگرسیون خطی

Samples	V (Printing speed) (mm / min)	T (Temperature) (°C)	H (Layer height) (mm)	Cycles to failure
1	1000.0	215.0	0.30	35709
2	1400.0	225.0	0.20	40760
3	1400.0	215.0	0.25	36459
4	1400.0	215.0	0.25	36795
5	1000.0	225.0	0.25	39196
6	1400.0	215.0	0.25	37123
7	1000.0	205.0	0.25	39971
8	1000.0	215.0	0.20	47294
9	1800.0	215.0	0.30	27547
10	1400.0	225.0	0.30	30789
11	1400.0	205.0	0.30	31126
12	1800.0	205.0	0.25	31159
13	1800.0	215.0	0.20	35021
14	1400.0	205.0	0.20	41814
15	1800.0	225.0	0.25	30335

جدول ۵: دیتافریم تشکیل شده در pandas برای رگرسیون غیرخطی

Samples	V	T	H	H × H	H × T	T × T	H × V	V × V	V × T	Cycles to failure
1	1000.0	215.0	0.30	0.0900	64.50	46225.0	300.0	1000000.0	215000.0	35709
2	1400.0	225.0	0.20	0.0400	45.00	50625.0	280.0	1960000.0	315000.0	40760
3	1400.0	215.0	0.25	0.0625	53.75	46225.0	350.0	1960000.0	301000.0	36459
4	1400.0	215.0	0.25	0.0625	53.75	46225.0	350.0	1960000.0	301000.0	36795
5	1000.0	225.0	0.25	0.0625	56.25	50625.0	250.0	1000000.0	225000.0	39196
6	1400.0	215.0	0.25	0.0625	53.75	46225.0	350.0	1960000.0	301000.0	37123
7	1000.0	205.0	0.25	0.0625	51.25	42025.0	250.0	1000000.0	205000.0	39971
8	1000.0	215.0	0.20	0.0400	43.00	46225.0	200.0	1000000.0	215000.0	47294
9	1800.0	215.0	0.30	0.0900	64.50	46225.0	540.0	3240000.0	387000.0	27547
10	1400.0	225.0	0.30	0.0900	67.50	50625.0	420.0	1960000.0	315000.0	30789
11	1400.0	205.0	0.30	0.0900	61.50	42025.0	420.0	1960000.0	287000.0	31126
12	1800.0	205.0	0.25	0.0625	51.25	42025.0	450.0	3240000.0	369000.0	31159
13	1800.0	215.0	0.20	0.0400	43.00	46225.0	360.0	3240000.0	387000.0	35021
14	1400.0	205.0	0.20	0.0400	41.00	42025.0	280.0	1960000.0	287000.0	41814
15	1800.0	225.0	0.25	0.0625	56.25	50625.0	450.0	3240000.0	405000.0	30335

³ Data frame

¹ Features

² Train

$$Sn_{lin} = +85605.21 - 99295 H - 37.38 T - 11.91 V \quad (۳)$$

با استفاده از بسته‌ی یادگیری ماشین در پایتون، یعنی scikit-learn و ایجاد تابع شیء^۱ از مدل (LinearRegression) و برازش^۲ داده‌های رگرسیون خطی، تابع نتیجه بصورت (۳) و برای رگرسیون غیر خطی به صورت (۴) بدست آمده است:

$$Sn_{nonlin} = 111533.33H^2 + 358.5 HT + 51.38 HV - 304070 H - 9.49 T^2 - 0.00308 TV + 3957.65 T - 0.00424 V^2 - 12.22 V - 317328.08 \quad (۴)$$

۳-۳- بررسی دقت توابع رگرسیون خطی و غیرخطی

جدول ۶: نمونه‌های تست شده برای بررسی برازش با رگرسیون

شماره نمونه	ارتفاع لایه (mm)	دمای چاپ (سانتی‌گراد)	سرعت چاپ (mm/min)	تعداد سیکل تا لحظه‌ی شکست هر نمونه		
				عمر متوسط	3	2	1
1	0.3	215	1400	31084	31891	30224
2	0.25	205	1400	36644	36521	36644

مدل خطی و غیرخطی در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، درصد خطای تخمین رگرسیون خطی برای نمونه‌های اول و دوم به ترتیب برابر با ۰/۰۷۸ و ۰/۵۴ و درصد خطای تخمین رگرسیون غیرخطی برای نمونه‌های اول و دوم به ترتیب برابر با ۳/۲۸ و ۱/۱۶ می‌باشد.

برای مطالعه دقت تخمین نتایج رگرسیون‌های خطی و غیرخطی، دو نمونه تست اضافی انجام شده است. نتیجه این دو نمونه در جدول ۶ آورده شده است. تخمین حاصل از رگرسیون خطی و غیرخطی این دو نمونه اضافی و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی و درصد خطاهای تخمین‌های

جدول ۷: بررسی دقت تخمین رگرسیون‌های خطی و غیرخطی با تست آزمایشگاهی

نمونه دوم			نمونه اول		
تخمین رگرسیون	تخمین رگرسیون	تست آزمایشگاهی	تخمین رگرسیون	تخمین رگرسیون خطی	تست آزمایشگاهی
غیرخطی (دور)	خطی (دور)	(دور)	غیرخطی (دور)	(دور)	(دور)
36217	36447	36644	32106	31108	31084
1.16	0.54	خطا (%)	3.28	0.078	خطا (%)

حاضر می‌توان با ارائه دو دلیل، دقت برازش رگرسیون غیرخطی مرتبه دوم (۴) بر برازش رگرسیون خطی (۳) را نشان داد:
الف- امتیازی^۳ که پایتون به مدل ایجادشده با رگرسیون‌های خطی و غیرخطی، برای توانایی تخمین تعداد دور شکست می‌دهد، به ترتیب برابر با 0.97155 و 0.9962 است؛ یعنی برازش حاصل از رگرسیون غیرخطی امتیاز بیشتری نسبت به رگرسیون خطی دریافت می‌کند.

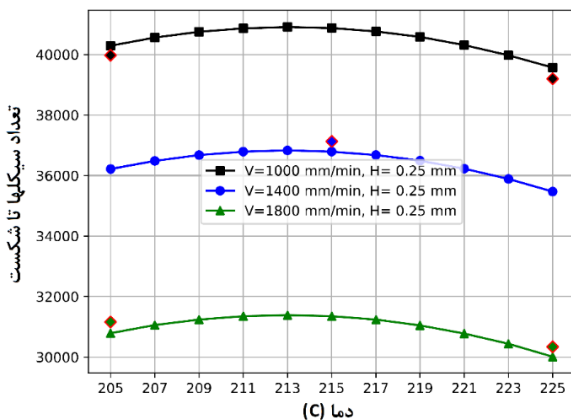
در نگاه اول، به نظر می‌رسد که خطای تخمین با تابع رگرسیون غیرخطی بیشتر از خطای تخمین با تابع رگرسیون خطی است. این به این دلیل است که مقادیر مشخصه‌های دو نمونه تست، تصادفاً به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تطبیق خوبی با رگرسیون خطی دارند. لذا نمی‌توان فقط با تکیه بر نتایج این دو تست، نتیجه گرفت که رگرسیون خطی بر رگرسیون غیرخطی در این تحقیق برتری دارد. اما در تحقیق

³ Score

¹ Object
² Fitting

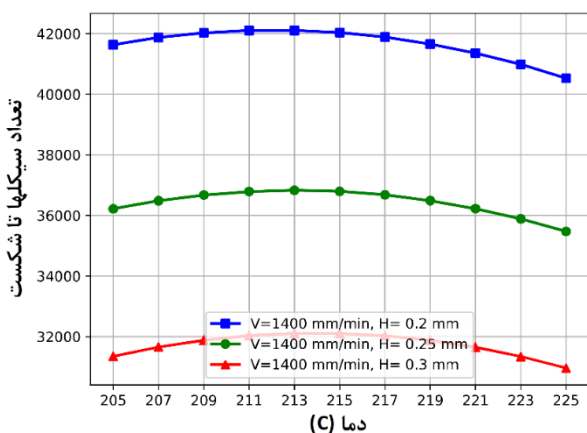
نقاط گسسته لوزوی با حاشیه قرمز، نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود برازش رگرسیون غیرخطی توانایی پیش بینی عمر خستگی را برای دمای چاپ مختلف در سرعت چاپ و ارتفاع لایه ی ثابت، دارا می باشد.

همان طور که در شکل ۵ ملاحظه می شود، با افزایش دمای چاپ تا ۲۱۳ درجه، عمر خستگی افزایش می یابد ولی بعد از این دما، هرچه دمای چاپ افزایش یابد تعداد دور نمونه قبل از شکست کاهش می یابد. همچنین ملاحظه می شود که دمای بهینه برای محدوده سرعت چاپ ۱۰۰۰ الی ۱۸۰۰ میلی متر بر دقیقه و برای ارتفاع لایه ثابت، برابر با ۲۱۳ درجه سانتی گراد است.



شکل ۵: تعداد دور نمونه بر حسب دمای مختلف چاپ در سرعت های متفاوت چاپ و ارتفاع لایه ۰/۲۵ میلی متر

در شکل ۶ تغییرات تعداد دور نمونه قبل از شکست (ناشی از خستگی) بر حسب دمای چاپ برای سه ارتفاع لایه مختلف در سرعت ثابت، نشان داده شده است.



شکل ۶: تعداد دور نمونه تا شکست بر حسب دمای چاپ در ارتفاع لایه های مختلف و سرعت چاپ ۱۴۰۰ میلی متر بر دقیقه

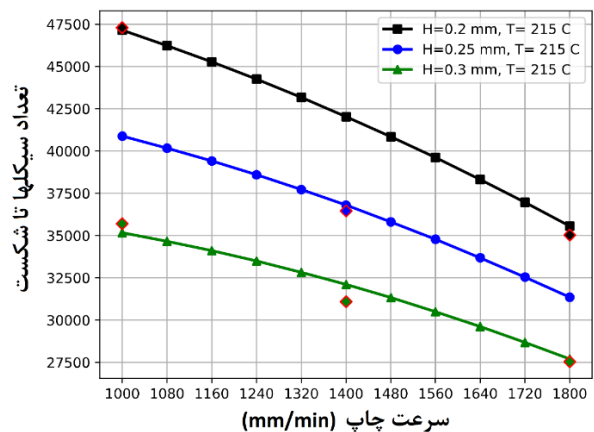
ب- محاسبه مجموع حداقل مربعات به دست آمده با استفاده از تخمین خطی و غیرخطی برای همه نمونه ها (شامل نمونه های آموزش و تست) که از طریق رابطه (۵) به دست می آید، به ترتیب برابر با ۱۱۱۶۰۳۴۷ و ۲۷۲۶۷۲۱ است:

$$LS = \sum_{i=1}^{17} (f_{Sn_i} - data_i)^2 \quad (5)$$

که f_{Sn_i} همان تابع رگرسیون ارائه شده در توابع (۳) و (۴) به ترتیب برای رگرسیون های خطی و غیرخطی نمونه های $i = 1 \dots 17$ می باشد و $data_i$ تعداد سیکل ها تا شکست نمونه i -م در تست آزمایشگاهی است.

لازم به ذکر است که بالاتر بردن مرتبه رگرسیون غیرخطی به مرتبه سوم به جواب های غیرقابل اعتماد، منتهی می گردد.

در شکل ۴ تغییرات تعداد دور نمونه قبل از شکست (ناشی از خستگی) بر حسب سرعت چاپ برای سه ارتفاع لایه مختلف در دمای ثابت نشان داده شده است. همچنین در این شکل، به عنوان نمونه، مقادیر عمر خستگی آزمایشگاهی بصورت نقاط گسسته لوزوی با حاشیه قرمز، نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود برازش رگرسیون غیرخطی توانایی پیش بینی عمر خستگی را برای سرعت های چاپ مختلف در دمای چاپ و ارتفاع لایه ی ثابت، دارا می باشد.



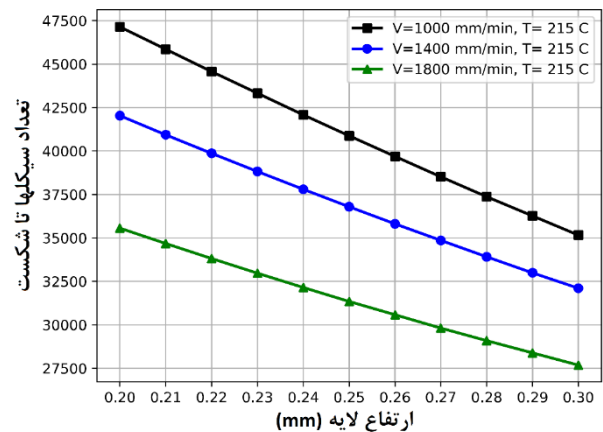
شکل ۴: تعداد دور نمونه تا شکست بر حسب سرعت چاپ در ارتفاع لایه های مختلف و دمای ۲۱۵ درجه سانتی گراد

همچنین ملاحظه می گردد که با افزایش سرعت چاپ و ارتفاع لایه، عمر خستگی نمونه، به دلیل افت خواص مکانیکی و کیفیت سطح مقطع نمونه، کاهش می یابد.

در شکل ۵ تغییرات عمر خستگی بر حسب دمای چاپ برای سه سرعت مختلف در ارتفاع لایه ثابت، نشان داده شده است. در این شکل همچنین، به عنوان نمونه، مقادیر عمر خستگی آزمایشگاهی به صورت

همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، مجدداً با افزایش دمای چاپ تا ۲۱۳ درجه، عمر خستگی نمونه قبل از شکست افزایش می‌یابد؛ ولی بعد از این دما، هرچه دمای چاپ افزایش یابد عمر قطعه کاهش می‌یابد. لذا دمای بهینه برای محدوده ارتفاع لایه ۰/۲ الی ۰/۳ میلی‌متر و سرعت ثابت، برابر با ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد است.

در شکل ۷ تعداد دور نمونه تا شکست ناشی از خستگی برحسب ارتفاع لایه برای سه سرعت چاپ مختلف در دمای ثابت با استفاده از تابع برازش رگرسیون غیرخطی (نشان داده شده است.



شکل ۷: تعداد دور نمونه تا شکست برحسب ارتفاع لایه در سرعت‌های چاپ متفاوت در دمای ۲۱۵ درجه سانتی‌گراد

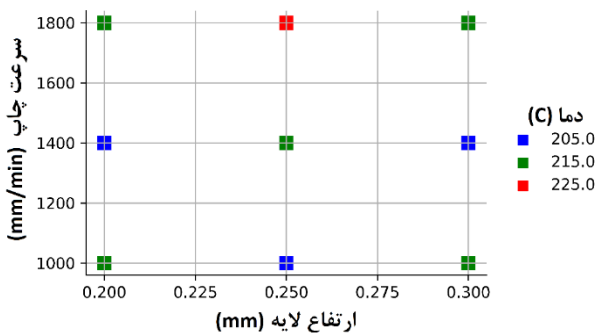
همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، با افزایش ارتفاع لایه، تعداد دور نمونه قبل از شکست، کاهش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً گفته شد رگرسیون غیرخطی مرتبه بالاتر از دو، به نتایج قابل‌اعتماد ختم نمی‌گردد. دلیل این امر آن است که ممکن است در حین تلاش برای افزایش دقت تابع ایجاد شده توسط رگرسیون، تابع ایجاد شده بجای آنکه آموزش ببیند، تقلید^۱ می‌نماید. در ادبیات یادگیری ماشین به این رخداد، over fitting می‌گویند. نتیجه over fitting این است که دقت مدل در نقاط تست که مورد آموزش قرار گرفته است، به شدت افزایش می‌یابد؛ اما در نقاط غیر از نقاط آموزش، خطای تخمین به شدت افزایش می‌یابد. در این تحقیق، سعی در به‌کارگیری تابع رگرسیون غیرخطی مرتبه سوم شد که به دلیل ایجاد over fitting، نتایج حاصله ارزشی نداشتند و لذا ارائه نشدند، گرچه امتیازی که پایتون برای داده‌هایی که بر طبق آن رگرسیون غیرخطی مرتبه سوم آموزش دیده است، عددی بالاتر از ۰/۹۹۹ بود. همان‌طور که در شکل ۴ الی شکل ۷ مشخص است، در همه نقاط در بازه‌ی دمای

۳-۴- بررسی استقلال سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها بر عمر خستگی

همان‌طور که قبلاً مشاهده شد، شکل ۳ تأثیر سرعت چاپ و ارتفاع لایه بر عمر خستگی نمونه را ارائه می‌دهد. با نگاه اولیه به این شکل مشاهده می‌شود که تأثیر سرعت چاپ و ارتفاع لایه بر عمر خستگی نمونه‌ها، شبیه یکدیگر هستند و این احتمال را ایجاد می‌کند که ممکن است فاکتورهای ارتفاع لایه و سرعت چاپ برای عمر خستگی نمونه‌ها، مستقل از هم نباشند. برای رد کردن احتمال وابستگی سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها، می‌توان دلایل زیر را ارائه کرد:

الف- با دقت در شکل ۴ و شکل ۷ دیده می‌شود که در سرعت چاپ ثابت، با افزایش ارتفاع لایه‌ها عمر خستگی کم می‌شود و همچنین در ارتفاع لایه‌ی ثابت، با افزایش سرعت چاپ، عمر خستگی کاهش می‌یابد. با دقت در شکل ۴ مشخص می‌شود که با افزایش ارتفاع لایه‌ها، روند منحنی‌های عمر خستگی برحسب سرعت چاپ، تغییر نمی‌کند؛ به بیان دیگر، با افزایش ارتفاع لایه، این روند از حالت نزولی به صعودی تغییر نمی‌کند. این موضوع در شکل ۷ نیز دیده می‌شود. یعنی، با افزایش سرعت چاپ، روند منحنی عمر خستگی برحسب ارتفاع لایه، همچنان نزولی باقی می‌ماند

ب- با رسم منحنی پراکندگی^۲ سرعت چاپ برحسب ارتفاع لایه (شکل ۸)، می‌توان به خوبی عدم وابستگی این دو فاکتور به یکدیگر را مشاهده کرد.



شکل ۸: منحنی پراکندگی سرعت چاپ برحسب ارتفاع لایه

۴- نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق بررسی تجربی خستگی خمشی قطعات چاپ سه-بعدی شده با روش ریزش مذاب، نتایج آزمایشگاهی و برازش مبتنی بر

² Scatter plot

¹ Imitate

[2] M. Domingo-Espín, "Contributions to the knowledge about additive manufacturing with Fused Deposition Modeling technology," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.

[3] P. K. Gurralla and S. P. Regalla, "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modeling," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, no. 3, pp. 141–149, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1080/17452759.2014.914957](https://doi.org/10.1080/17452759.2014.914957)

[4] F. Calignano et al., "Overview on additive manufacturing technologies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 4, pp. 593–612, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1109/JPROC.2016.2625098](https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2625098)

[5] F. P. W. Melchels et al., "Additive manufacturing of tissues and organs," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 8, pp. 1079–1104, 2012. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007)

[6] R. Leal et al., "Additive manufacturing tooling for the automotive industry," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 1671–1676, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1007/s00170-017-0246-3](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0246-3)

[7] L. J. Kumar and C. K. Nair, "Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry," in *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, Springer, Berlin, Germany, 2017, pp. 39–54. [Online]. Available: doi: [10.1007/978-981-10-0812-2_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2_3)

[8] M. Domingo-Espín et al., "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts," *Materials & Design*, vol. 83, pp. 670–677, 2015. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.matdes.2015.06.074](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074)

[9] B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 192–204, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-01-2013-0012](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012)

[10] F. Arbeiter et al., "Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near-homogeneous components produced by fused filament fabrication," *Polymer Testing*, vol. 66, pp.

رگرسیون خطی و غیرخطی برای تخمین عمر خستگی با تغییرات مشخصه‌های سرعت چاپ، دمای چاپ و ارتفاع لایه‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون بوده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر چه ضخامت لایه و سرعت چاپ افزایش یابد، عمر نمونه‌ها قبل از شکست ناشی از خستگی، کاهش خواهد یافت. این بدان معناست که خواص مکانیکی و کیفیت سطح مقطع نمونه‌ها با افزایش سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نشان داده شد که دمای بهینه، ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد در محدوده دمایی ۲۰۵ الی ۲۲۵ درجه است. گرچه به‌طور کلی، تغییرات دمای چاپ، تأثیر زیادی بر عمر خستگی نمونه ندارد. نشان داده شد که برازش با رگرسیون غیرخطی مرتبه دوم، مجموع حداقل مربعات کمتری نسبت به رگرسیون خطی برای ۱۷ نمونه تست‌شده دارد و لذا رگرسیون غیرخطی تخمین بهتری از عمر خستگی نمونه‌ها ارائه می‌دهد. از طرف دیگر رگرسیون غیرخطی مرتبه دوم (برخلاف مرتبه سوم) دچار over fitting یا به تعبیری ساده‌تر، تقلید از داده‌های آزمایشگاهی نمی‌شود و در همه‌ی نقاط در بازه‌ی دمای [۲۰۵، ۲۲۵] و سرعت چاپ [۱۰۰۰، ۱۸۰۰] و ارتفاع لایه‌ی [۰/۲ و ۰/۳]، رخداد نامطلوب over fitting رخ نمی‌دهد. تاکنون تحقیقات فراوانی در مورد چاپگرهای سه‌بعدی و انواع قطعات PLA صورت گرفته است. با توجه به کارهای صورت گرفته در تحقیق حاضر، عناوین کارهای پیشنهادی که می‌توان در مورد بررسی عمر خستگی نمونه‌های چاپ‌شده انجام داد، عبارت‌اند از:

- بررسی عمر خستگی نمونه‌های چاپ‌شده با پلیمرهای دیگر از جمله ABS، PET و ...
- بررسی عمر خستگی نمونه‌های چاپ‌شده با مشخصه‌های دیگر چاپ از جمله درصد پرشدگی، دمای بستر، درصد جریان و ...
- بررسی عمر خستگی نمونه‌های چاپ‌شده از پلیمرهای نانوکامپوزیت و بررسی تأثیر درصد نانومواد بر عمر خستگی

۵- منابع

[1] R. Jerez-Mesa, J. Travieso-Rodriguez, X. Corbella, R. Busqué, and G. Gomez-Gras, "Kinematic optimization of FDM additive manufacturing process: defining a strategy for quality improvement," *Mechatronics*, vol. 36, pp. 119–126, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.mechatronics.2016.03.006](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.03.006)

- 467, 2023. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-10-2022-0276](https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2022-0276)
- [18] M. Spoerk et al., "Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 47, no. 1, pp. 17–24, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1080/14658011.2017.1397302](https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1397302)
- [19] S. Lee, J. W. Pegues, and N. Shamsaei, "Fatigue behavior and modeling for additive manufactured 304L stainless steel: The effect of surface roughness," *Int. J. Fatigue*, vol. 141, p. 105856, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijfatigue.2020.105856](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105856)
- [20] M. Azadi, M. Alizadeh, and H. Sayar, "Sensitivity analysis for effects of displacement amplitude and loading frequency on low-cycle fatigue lifetime in carbon/epoxy laminated composites," *MATEC Web Conf.*, vol. 165, p. 15003, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1051/mateconf/201816515003](https://doi.org/10.1051/mateconf/201816515003)
- [21] M. A. Salim, Z. H. Termiti, and A. M. Saad, "Mechanical Properties on ABS/PLA Materials for Geospatial Imaging Printed Product using 3D Printer Technology," *Elsevier Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 65–72, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.promfg.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.011)
- [22] A. Bagheri, M. J. Mahtabi, and N. Shamsaei, "Fatigue behavior and cyclic deformation of additive manufactured NiTi," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 252, pp. 440–453, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.09.038](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.038)
- [23] M. Amini, M. Fathi, and M. Baghestani, "Effect of interlayer adhesion on predicting fatigue failure of 3D printed parts," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 10, no. 8, pp. 36–48, 2023. (in Persian)
- [24] S. Singh and R. Singh, "Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 123–143, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-08-2014-0092](https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2014-0092)
- 105–113, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.polymertesting.2018.01.002](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.01.002)
- [11] O. H. Ezeh and L. Susmel, "On the fatigue strength of 3D-printed polylactide (PLA)," *Procedia Structural Integrity*, vol. 9, pp. 29–36, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.prostr.2018.06.006](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.006)
- [12] L. Safai, J. S. Cuellar, G. Smit, and A. A. Zadpoor, "A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers," *Additive Manufacturing*, vol. 28, pp. 87–97, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.addma.2019.04.015](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.015)
- [13] A. Dadashi and M. Azadi, "Experimental bending fatigue data of additive manufactured PLA biomaterial fabricated by different 3D printing parameters," *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101553, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.addma.2020.101553](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101553)
- [14] M. Horasan and I. Sarac, "The fatigue response of 3D-printed Polylactic Acid (PLA) parts with varying raster angles and printing speed," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 47, no. 1, pp. 123–134, 2024. [Online]. Available: doi: [10.1111/ffe.13678](https://doi.org/10.1111/ffe.13678)
- [15] H. Bakhtiari, M. Aamir, and M. Tolouei-Rad, "Effect of 3D printing parameters on the fatigue properties of parts manufactured by fused filament fabrication: A Review," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 904, 2023. [Online]. Available: doi: [10.3390/app13040904](https://doi.org/10.3390/app13040904)
- [16] B. Akhoundi and R. Ouzah, "Experimental and numerical investigation of rotating bending fatigue of polylactic acid 3D printed parts by an extrusion-based additive manufacturing method," *Journal of Engineering Research*, vol. 11, no. 2, pp. 45–56, 2024. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.jer.2023.10.005](https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.005)
- [17] S. N. Cerda-Avila et al., "Fatigue experimental analysis and modeling of fused filament fabricated PLA specimens with variable process parameters," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 29, no. 3, pp. 456–



Numerical Simulation of the Effect of Conventional and Hybrid Nanofluids on the Cooling Performance of Automobile Radiator

Reza Babaei^{*1}, Mohammad Mahdi Touiserkani², Milad Khanchoupan³, Alireza Afradi⁴

1. PhD, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2 PhD Student, College of Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. BSc, faculty of engineering, university of urmia, urmia, Iran.

4. PhD, Faculty of Mining and Geology Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

Abstract

In this paper, the effect of conventional nanofluids including Al₂O₃, CNC and TiO₂ and hybrid nanofluids including Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ on the cooling rate of an automobile radiator was investigated. Hydrodynamic-Thermal simulation was performed using ANSYS Fluent software. The flow rate of the nanofluid solution was in the range of 10 to 100 g/s and the volume concentration of the nanofluid was between 0.1 and 0.9%. The flow temperature of the hot fluid was 45 °C and the temperature of the radiator cooling air was 30 °C. The results showed that hybrid nanofluids, despite increasing the heat transfer coefficient (CHTC), also increased the pressure drop of the system. At 0.9%, The thermal performance efficiency (TPE) parameter analysis showed that hybrid nanofluids including Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ (values 1.5 and 1.42) had better performance than conventional nanofluids including Al₂O₃, CNC and TiO₂ (values 1.30, 1.32 and 1.09). It was also observed that TiO₂ nanofluid had a low effect on increasing the thermal performance of the radiator.

Keywords

Nanofluids
Hybrid
Car radiator
TPE
Heat transfer enhancement

Received: 02.02.2025

Revised: 03.29.2025

Accepted: 04.05.2025

*Corresponding Author

Reza Babaei

Email

r.babaei@modares.ac.ir

1- Introduction

Engine cooling is the biggest technical challenge in the manufacturing, electrical, and automotive industries. Water pump failure and radiator wear, along with inefficient coolant, are the main causes of overheating in automobile engines. Overheating can cause damage to various parts of the vehicle, including warping of the cylinder head, distortion of the radiator hose, and even vehicle failure [1]. Engine operating temperatures must be controlled to prevent mechanical problems in materials caused by high operating temperatures, which allows for

optimal fuel consumption while preventing overcooling. Many industrial cooling systems, automotive parts, air conditioning, power generation, and chemical processes use common coolants such as water, motor oils, mineral oil, and ethylene glycol as the base fluid [2]. Increasing the heat transfer rate of the base fluid is one of the primary issues for current science and technology [3]. Improving cooling performance includes three methods: passive cooling, active cooling, and a combination of the two [4]. Active methods mostly



require the use of external forces to improve the cooling capabilities, such as installing a cooling fan to remove excess heat or using antifreeze (water and antifreeze) [5]. However, this solution has limitations in order to maintain the same system size, area or input power. Adding nanoparticles to the base fluid has great potential to increase the effectiveness of the cooling technique [6] [7]. Fluids in this category, known as nanofluids, are in which a colloidal suspension of solid nanoparticles (100 nm in size) is added to the base fluid. Therefore, researchers have focused on comparing the heat transfer characteristics of solid particles with base fluids to enhance the thermal performance of automotive cooling systems. Various studies have shown that the use of nanofluids in automotive cooling systems can help minimize the size and weight of the radiator, while increasing system efficiency and reducing fuel consumption [8]. In most works, a mixture of water and ethylene glycol (in various proportions) is used in automotive cooling systems [9].

It is observed that most studies conducted on automobile radiators focus on the effect of conventional nanofluids and in the laboratory, and the use of hybrid nanofluids for radiators, especially their numerical simulation, is very limited. In the present work, a radiator is simulated in real dimensions and then the effect of different simple and hybrid nanofluids on the performance of the radiator cooling system is investigated. The innovation of the present work is the simultaneous use of conventional and hybrid nanofluids and the comparison between them.

2- Research Methods

In the present work, the effect of various hybrid nanofluids on the cooling performance of an automobile radiator is numerically investigated. First, the work of Singh et al. [10] is used to verify the numerical results. Figure 1 shows the geometry of a finned radiator. The number of tubes is 39 and the number of fins is 10. The temperature of the hot water entering the tubes is 45 degrees Celsius and the air temperature is 30 Celsius and the velocity is

3 m/s. The flow rate of the hot water entering the radiator is variable and ranges from 10 g/s to 100 g/s. In the present work, the hot water base fluid is used as the inlet fluid to the automobile radiator and the air base fluid is used as the cooling fluid of the automobile radiator. In the present work, in order to increase the heat transfer, nanofluids (simple and hybrid) are added to the water fluid to investigate its effect on the cooling performance of the radiator.

3- Results

Figure 8 shows the values of pressure drop increase for different nanofluid solutions. It is observed that the pressure drop with respect to the fluid flow rate is approximately a quadratic function and its values increase with increasing fluid flow rate. It is also observed that the Al₂O₃/CNC nanofluid solution produces the highest pressure drop and the TiO₂ nanofluid produces the lowest pressure drop in the radiator tube assembly.

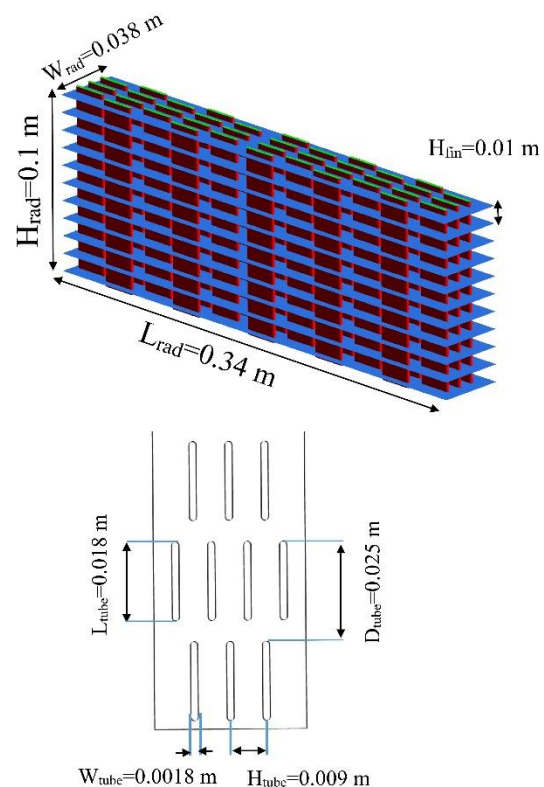


Figure 1: Schematic of the geometry of an automobile radiator

This is a contradictory behavior with the values of heat transfer increase, because in the heat transfer

section it was shown that the best performance was related to Al₂O₃/CNC and the worst performance was related to TiO₂. For this reason, the thermal performance coefficient (TPE) parameter, which indicates the power of heat transfer coefficient increase with respect to the increase in pressure drop, is investigated. The number one for this parameter indicates the equality of the heat transfer increase and the increase in pressure drop, and therefore, in order to justify the type and amount of nanofluid, this value should be greater than one. Figures 9 and 10 show the thermal performance coefficient (TPE) at volume fractions of 0.1 and 0.9 percent. It is observed that the value of the thermal performance coefficient is higher at low flow rates and decreases with increasing base fluid flow rate. The reason for this is that at high flow rates, the contribution of fluid convection heat transfer becomes superior to the performance of nanofluid properties and practically the effect of nanofluid in improving the heat transfer rate is reduced. It is observed that the hybrid nanofluids Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ had better performance than simple nanofluids, so that at a volume fraction of 0.1 percent and a flow rate of 10 g/s, the TPE parameter for these two hybrid nanofluids is 1.16 and 1.12, respectively. While for simple nanofluids Al₂O₃ and CNC, this value is approximately 1.07. For TiO₂ nanofluid, the TPE value even reached below 1, which indicates the inappropriateness of using this nanofluid in automotive radiator cooling applications at low volume fractions. The TPE parameter at 0.9% volume fraction and 10 g/s flow rate for Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ hybrid nanofluids is 1.5 and 1.42, respectively, while for simple Al₂O₃, CNC and TiO₂ nanofluids it is 1.30, 1.32 and 1.09, respectively.

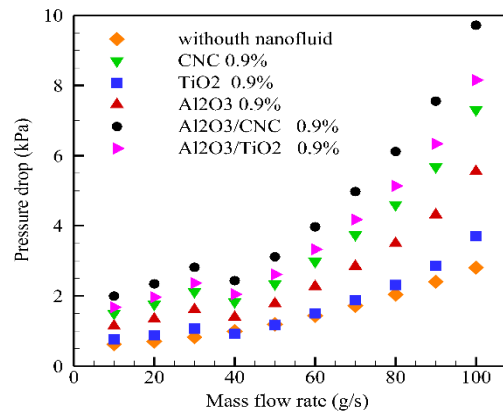


Figure 2: Pressure drop increase value for different nanofluids

These values are the highest TPE values. For TiO₂ nanofluid, at mass flow rates higher than 10 g/s, the TPE value approaches one even at a volume fraction of 0.9%, indicating the low effectiveness of this nanoparticle.

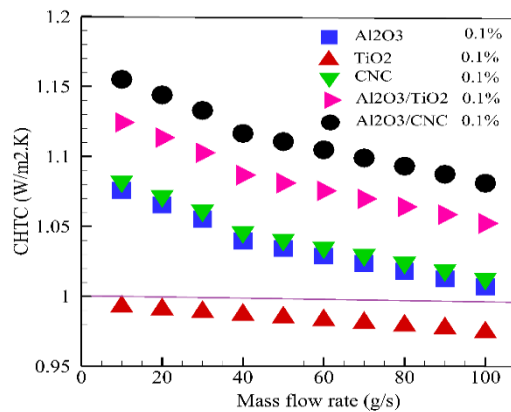


Figure 3: Thermal performance coefficient for 0.1% volume fraction

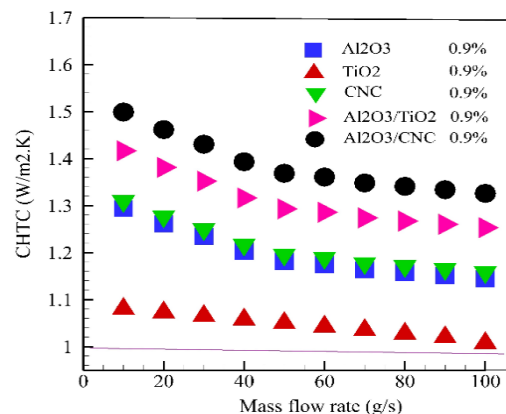


Figure 4: Thermal performance coefficient for 0.9% volume fraction

4- Conclusion

In the present work, a performance comparison was made on simple and hybrid nanofluids in increasing the cooling rate of an automobile radiator. Simple nanofluids include Al₂O₃, CNC, and TiO₂, and hybrid nanofluids include Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂. The flow rate of hot water entering the radiator is in the range of 10 to 100 g/s, its temperature is 45 Celsius, and the temperature of the radiator cooling air is 30 Celsius. The hydrodynamic-thermal simulation of the radiator was performed using ANSYS Fluent software. The results showed that hybrid nanofluids, despite increasing the heat transfer coefficient (CHTC) compared to simple nanofluids, also increase the pressure drop rate of the system. By examining the thermal performance coefficient (TPE) parameter, it was observed that hybrid nanofluids including Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ had better performance than simple nanofluids including Al₂O₃, CNC and TiO₂, so that the highest thermal performance coefficient (TPE) for hybrid nanofluids Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ was 1.5 and 1.42, respectively, while for simple nanofluids Al₂O₃, CNC and TiO₂ it was 1.30, 1.32 and 1.09, respectively. The results showed that TiO₂ nanofluid has a low effect on increasing the thermal performance of the radiator.

5- References

- [1] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, and R. Saidur, "Hybrid nanocoolant for enhanced heat transfer performance in vehicle cooling system," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 133, p. 105922, Apr. 2022. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922)
- [2] R. Cong, Y. Ozaki, B. S. Machado, and P. K. Das, "Constructal Design of a Rectangular Fin in a Mixed Convective Confined Environment," *Inventions*, vol. 3, no. 2, Jun. 2018. [Online]. Available: doi : [10.3390/inventions3020027](https://doi.org/10.3390/inventions3020027)
- [3] K. Ting, A. K. Mozumder, and P. K. Das, "Effect of surface roughness on heat transfer and entropy generation of mixed convection in nanofluid," *Phys. Fluids*, vol. 31, no. 9, 2019. [Online]. Available: doi: [org/10.1063/1.5111104](https://doi.org/10.1063/1.5111104)
- [4] J. Philip, P. D. Shima, and B. Raj, "Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids," *Nanotechnology*, vol. 19, no. 30, p. 305706, Jul. 2008. [Online]. Available: doi: [10.1088/0957-4484/19/30/305706](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/30/305706)
- [5] M. Afrand, D. Toghraie, and B. Ruhani, "Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe₃O₄-Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 77, pp. 38–44, Oct. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007)
- [6] M. Bahrami, M. Akbari, A. Karimipour, and M. Afrand, "An experimental study on rheological behavior of hybrid nanofluids made of iron and copper oxide in a binary mixture of water and ethylene glycol: Non-Newtonian behavior," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 79, pp. 231–237, Dec. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.07.015](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.015)
- [7] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, and S. Wongwises, "Entropy generation analysis of graphene–alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 103, pp. 1084–1097, Dec. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070)
- [8] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, and G. Najafi, "Recent state of nanofluid in automobile cooling systems," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, no. 2, pp. 981–1008, Jan. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1007/s10973-018-7477-3](https://doi.org/10.1007/s10973-018-7477-3)
- [9] M. U. Sajid and H. M. Ali, "Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 103, pp. 556–592, Apr. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2018.12.057](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057)



شبیه‌سازی عددی اثر نانوسیال ساده و هیبریدی بر عملکرد خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل

رضا بابایی^{۱*}، محمد مهدی توپسرکانی^۲، میلاد خان‌چوپان^۳، علیرضا افرادی^۴

۱- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده‌گان فنی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- کارشناسی، گروه فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- دکتری، گروه مهندسی معدن و زمین‌شناسی، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

چکیده

در مقاله حاضر اثر نانوسیال‌های ساده شامل Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 و نانوسیال‌های هیبریدی شامل Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 بر روی نرخ افزایش خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل بررسی شد. شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار گمبیت و شبیه‌سازی هیدرودینامیک-حرارتی توسط نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام شد. دبی محلول نانوسیال در بازه 10 g/s تا 100 g/s ، درصد حجمی نانوسیال بین $0/1$ و $0/9$ درصد، دمای دبی سیال داغ 45 سلسیوس و دمای هوای خنک‌کن رادیاتور 30 سلسیوس می‌باشد. نتایج نشان داد که نانوسیال‌های هیبریدی با وجود افزایش میزان ضریب انتقال حرارت (CHTC) سبب افزایش افت فشار سیستم نیز می‌شوند. در $0/9$ درصد از نانوسیال، مقادیر ضریب عملکرد حرارتی (TPE) برای نانوسیال‌های هیبریدی شامل Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 (به ترتیب $1/5$ و $1/42$) بوده که نشان دهنده عملکرد بهتر نسبت به نانوسیال‌های ساده شامل Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 (به ترتیب $1/30$ ، $1/32$ و $1/09$) است. همچنین مشاهده شد که نانوسیال TiO_2 اثرگذاری پایینی در افزایش عملکرد حرارتی رادیاتور در درصدهای مختلف نانوسیال ($0/1$ و $0/9$) دارد.

کلمات کلیدی

نانوسیال

هیبرید

رادیاتور اتومبیل

TPE

افزایش انتقال حرارت.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

*نویسنده مسئول

رضا بابایی

ایمیل

r.babaei@modares.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده می‌کنند [۲]. افزایش نرخ انتقال حرارت سیال پایه یکی از مسائل اولیه برای علم و فناوری فعلی است [۳]. بهبود عملکرد خنک‌کاری شامل سه روش خنک‌کننده غیرفعال، خنک‌کننده فعال و ترکیبی از این دو می‌باشند [۴]. روش‌های فعال بیشتر مستلزم استفاده از نیروی خارجی برای بهبود توانایی‌های خنک‌کننده مانند نصب یک فن خنک‌کننده برای از بین بردن گرمای اضافی یا استفاده از ضد یخ (آب و ضد یخ) می‌باشد [۵]. با این حال، جهت حفظ اندازه سیستم، مساحت یا قدرت ورودی یکسان، این راه‌حل دارای محدودیت‌هایی هستند. افزودن نانوذرات به سیال پایه، پتانسیل بالایی برای افزایش اثربخشی تکنیک خنک‌سازی دارد [۶] [۷]. سیالات این دسته که به‌عنوان نانوسیال شناخته می‌شوند که در آن سوسپانسیون کلوتیدی با نانوذرات جامد (اندازه 100 نانومتر) به سیال پایه می‌شوند. بنابراین

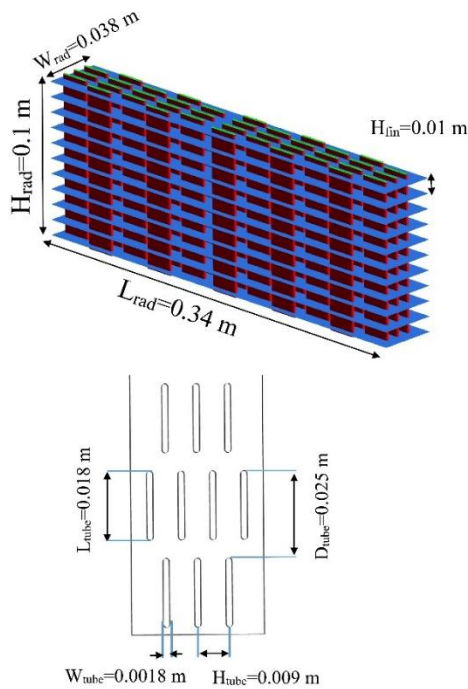
خنک‌کاری موتور بزرگترین چالش فنی در صنایع تولیدی، برقی و خودروسازی است. خراب شدن پمپ آب و فرسوده شدن رادیاتور به همراه سیال خنک‌کننده ناکارآمد از عوامل اصلی گرم شدن بیش‌ازحد موتور اتومبیل هستند. گرمای بیش‌ازحد می‌تواند باعث آسیب به بخش‌های مختلف خودرو، از جمله تاب برداشتن سرسیلندر، اعوجاج شیلنگ رادیاتور، و همچنین خرابی خودرو شود [۱]. دمای کارکرد موتور باید تحت کنترل باشد تا از مشکلات مکانیکی در مواد ناشی از دمای کار بالا جلوگیری شود که باعث می‌شود مصرف سوخت بهینه و درعین حال از سرد شدن بیش‌ازحد جلوگیری شود. بسیاری از سیستم‌های خنک‌کننده صنعتی، بخش‌های خودرو، تهویه مطبوع، تولید برق و فرآیندهای شیمیایی از خنک‌کننده‌های معمولی مانند آب، روغن‌های موتور، روغن معدنی و اتیلن گلیکول به‌عنوان سیال پایه



ننوسیال‌های هیبریدی MWCNT-CuO/ آب برای توسعه روش جدیدی برای تعیین هدایت حرارتی استفاده کرد. مشاهده شد که در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد و درصد حجمی نانوذرات ۰/۶٪، هدایت حرارتی ننوسیال ۳۰/۳۸٪ افزایش یافت. جمشد و همکاران [۱۶] ویژگی‌های انتقال حرارتی ننوسیال‌های ترکیبی شامل نانوذرات مس و دی‌اکسید زیرکونیوم مشتق‌شده از روغن موتور (EO) را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل عددی نشان داد که در مقایسه با ننوسیالات Cu-EO، ننوسیالات هیبریدی ZrO₂Cu/EO نرخ انتقال حرارت بالاتری دارند. در مقایسه با خنک‌کننده‌های ننوسیال معمولی، دمای ننوسیال مبتنی بر نانوذرات هیبریدی سریعتر افزایش می‌یابد. کومار و همکاران [۱۷] دو نوع مختلف از ننوسیال ترکیبی را بر روی یک رادیاتور خنک‌کننده هوا مورد بررسی قرار دادند که شامل آلومینا-گرافن (GNP) و آلومینا-نانولوله کربنی (CNT) بودند. نتایج نشان داد GNP که به میزان ۲/۹۴ درصد بهتر از خنک‌کننده نانولوله کربنی (CNT) است. از استفاده از ننوسیال هیبریدی در کاربردهای مختلف می‌توان به جدول ۱ اشاره نمود. شبانی و همکاران [۲۷] به بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت در رادیاتور اتومبیل پرآید پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که اختلاف دمای ورودی و خروجی در موتور در شرایط جابه‌جایی آزاد ۱۳ سلسیوس و در شرایط اجباری ۱/۵ سلسیوس است. رحمتی‌نژاد و همکاران [۲۸] با بررسی عملکرد حرارتی یک رادیاتور نشان دادند که راندمان رادیاتور با کاهش ۲۵ درصدی طول و افزایش تعداد فین‌ها از ۳۸۵ به ۴۳۷ ثابت خواهد ماند. فواصل فین‌ها به وسیله الگوریتم ژنتیک بهینه شد. رحمتی‌نژاد و همکاران [۲۹] به بررسی اثر استفاده از ننوسیال اکسید آلومینیوم بر روی مبدل گرمایی موتور پرداختند. نتایج نشان داد افزایش ننوسیال تا دبی ۲۱ لیتر بر دقیقه سبب افزایش ضریب انتقال حرارت شده و پس از آن کاهش ضریب انتقال حرارت را در پی خواهد داشت. در نانوذرات ۲٪ و دور تند فن میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه، شاهد افزایش تقریبی ۳٪، ۲۰٪ و ۱۶٪ بوده است. عملکرد حرارتی موتور M13NI با استفاده از ننوسیال AL₂O₃+H₂O در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول توسط مرجع [۳۰] بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش کسر حجمی سبب افزایش انتقال حرارت و افزایش افت فشار و همچنین کاهش پارامتر مریت (نسبت انتقال حرارت به قدرت پمپ) شد. رحمتی‌نژاد و همکاران [۳۱] به بررسی عملکرد رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از ننوسیال اکسید آلومینیوم در سیال

محققان جهت تقویت عملکرد حرارتی و سیستم‌های خنک‌کننده خودرو بر آن شدند تا بر مقایسه ویژگی‌های انتقال حرارت ذرات جامد با سیالات پایه تمرکز کنند. مطالعات مختلف نشان داده است که استفاده از ننوسیال‌ها در سیستم‌های خنک‌کننده خودرو می‌تواند به، به‌حداقل رساندن اندازه و وزن رادیاتور کمک کند و درعین حال راندمان سیستم را افزایش و مصرف سوخت را نیز کاهش دهد [۸]. در بیشتر کارها از ترکیبی از آب و اتیلن گلیکول (در نسبت‌های مختلف) در سیستم‌های خنک‌کننده خودرو استفاده می‌شود [۹]. گالهان و همکاران [۱۰] از ننوسیال آلومینا در خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل و در شرایط جابه‌جایی اجباری (فن) استفاده نمودند. غلظت ننوسیال، سرعت جریان و دما به ترتیب ۰/۱ تا ۰/۴ درصد، ۲ تا ۵ لیتر بر دقیقه و دمای بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد است. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت در غلظت ۰/۴ درصد نانوذره اکسید آلومینیوم ۴۵/۸۷ درصد افزایش داشت. آرونکومار و همکاران [۱۱] عملکرد رادیاتورهای خودرو را با استفاده از EG و آب پر شده با نانوذرات مختل (Al₂O₃, MgO, TiO₂) به‌عنوان خنک‌کننده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک حالت بهینه از نانوذرات ۰/۱۲٪ و ۰/۴٪ به نسبت ۸۰:۲۰ (EG/W) تعیین نمودند. ناوین و همکاران [۱۲] با تنظیم نرخ جریان در محدوده ۲-۸ لیتر بر دقیقه میزان انتقال حرارت رادیاتور (OHTC¹) را با استفاده از ننوسیال گرافن در سیال پایه (70 W:30 EG) به‌عنوان یک سیال خنک‌کننده مورد مطالعه قرار دادند و حدود ۶۵ درصد افزایش در نرخ انتقال حرارت را گزارش نمودند. با افزایش نرخ جریان، عدد ناسلت ۵۳/۴٪ افزایش می‌یابد. تیجانی و همکاران [۱۳] عملکرد حرارتی یک رادیاتور را با استفاده از نانوذرات CuO و Al₂O₃ در سیال پایه (50 W:50 EG) در ۰/۵، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد بررسی کردند. نتایج نشان داد که ننوسیال CuO در دبی ۶ لیتر بر دقیقه حداکثر انتقال حرارت را نشان می‌دهد. پالانیپان و همکاران [۱۴] ترکیبی از خاکستر از بسیاری از اجزاء (آلومینا، اکسید آهن، تیتانیا، منیزیم، سیلیس و اکسید کلسیم، اکسید سدیم، تری اکسید گوگرد و اکسید پتاسیم) به‌عنوان ننوسیال هیبریدی در مخلوطی از آب دی‌نویزه و اتیلن گلیکول (DI/EG) ترکیب کردند. یک موتور ۶ سیلندر IC و یک رادیاتور جریان متقاطع بخشی از چیدمان آن‌ها بود. در کار آن‌ها غلظت بهینه (۲ درصد حجمی) ننوسیال هیبریدی می‌تواند OHTC خنک‌کننده پایه را با توجه به محاسبات انرژی و انرژی افزایش دهد. زادخواست [۱۵] از

¹ Overall heat transfer coefficient



شکل ۱: شماتیک هندسه رادیاتور اتومبیل

جدول ۱: استفاده از نانوسیال هیبریدی در منابع مختلف

نتایج	کاربرد	کسر حجمی (%)	نانوسیال هیبریدی
افزایش ۱۵ درصدی عدد ناسلت	دستگاه الکترونیکی	۰/۳	Graphene nanoparticles/Al ₂ O ₃ /W [۱۸]
۸۰ درصد جذب انرژی خورشیدی	انرژی خورشیدی	۱/۰۲۵	Al ₂ O ₃ /Co ₃ O ₄ /W [۱۹]
۵۴ درصد افزایش انتقال حرارت	هیت پایپ	۱/۳۵	Fe ₃ O ₄ /CNTs/W [۲۰]
افزایش ۴۴ درصدی انتقال حرارت	هیت سینک مینی کانال	۰/۰۱	Al ₂ O ₃ /MWCNTs/W [۲۱]
جذب کامل انرژی خورشیدی	انرژی خورشیدی	۰/۰۳	MWCNTs/CopperOxide/W [۲۲]
افزایش ۲۶ درصدی انتقال حرارت	هیت سینک مینی فین	۱	Al ₂ O ₃ /Copper/W [۲۳]
افزایش ۱۵ درصدی انتقال حرارت	مبدل حرارتی	۰/۰۱	MWCNT/Al ₂ O ₃ /W [۲۴]
افزایش ۹۷ درصدی راندمان حرارتی	کلکتور خورشیدی	۰/۱	Silicon Carbide/MWCNT/EG [۲۵]
افزایش ۳۵ درصدی انتقال حرارت	مبدل حرارتی دابل پایپ	۴	Aluminum/Nitride/W [۲۶]

پایه آب-اتیلن گلیکول پرداختند. دمای سیال ورودی ۸۵ درجه سانتی گراد و دبی حجمی سیال خنک‌کننده ۳/۱۸ تا ۱۵/۰۸ لیتر بر دقیقه و سرعت فن ۳/۲ تا ۶/۴ متر بر ثانیه است. آن‌ها نشان دادند که در نانوسیال ۴ درصد میزان نرخ انتقال حرارت ۳۷ درصد و ضریب انتقال حرارت ۲۸ درصد افزایش می‌یابد.

مشاهده می‌گردد که در اکثر مطالعات انجام شده بر روی رادیاتور اتومبیل تمرکز بر روی اثر نانوسیال معمولی و به صورت آزمایشگاهی بوده و همچنین استفاده از نانوسیال هیبریدی برای رادیاتور به خصوص شبیه‌سازی عددی آن بسیار محدود است. در کار حاضر یک رادیاتور در ابعاد واقعی شبیه‌سازی شده و در ادامه اثر نانوسیال‌های ساده و هیبریدی مختلف بر روی عملکرد سیستم خنک‌کاری رادیاتور بررسی می‌شود. نوآوری کار حاضر استفاده همزمان نانوسیال معمولی و هیبریدی و مقایسه بین آن‌ها است.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- تشریح سیستم

در کار حاضر اثر انواع نانوسیال هیبریدی بر روی عملکرد خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل به صورت عددی بررسی می‌شود. ابتدا جهت صحت‌سنجی نتایج عددی از کار سینگ و همکاران [۳۲] استفاده می‌گردد. شکل ۱ هندسه رادیاتور فین‌دار را نشان می‌دهد. تعداد لوله‌ها ۳۹ عدد و تعداد فین‌ها ۱۰ عدد می‌باشد. دمای آب گرم ورودی به لوله‌ها ۴۵ درجه سلسیوس و دمای هوا ۳۰ سلسیوس و با سرعت ۳m/s است. دبی آب گرم ورودی به رادیاتور متغیر است و در بازه ۱۰g/s تا ۱۰۰g/s می‌باشد.

در کار حاضر سیال پایه آب داغ به‌عنوان سیال ورودی به رادیاتور اتومبیل و سیال پایه هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده رادیاتور اتومبیل است. در کار حاضر جهت افزایش انتقال حرارت به سیال آب نانوسیال (ساده و هیبریدی) اضافه شده تا میزان اثر آن بر روی عملکرد خنک‌کاری رادیاتور بررسی شود.

۲-۲- معادلات حاکم بر تئوری مسأله

در کار حاضر از نانوذرات ساده و هیبریدی شامل Al_2O_3 ، TiO_2 ، CNC ، $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ و $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CNC}$ در درصدهای حجمی ۰/۱ و ۰/۹ درصد استفاده می‌گردد (جدول ۲). خواص سیال پایه و نانوذرات (هیبریدی و ساده) شامل چگالی، لزجت، هدایت حرارتی و گرمای ویژه تابعی از دما می‌باشد. روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴) به ترتیب برای محاسبه دانسیته، گرمای ویژه، لزجت و هدایت حرارتی محلول نانوسیال ارائه می‌گردد [۹] [۱۶].

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (1)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \rho_p C_{p,p} + (1 - \phi) \rho_f C_{p,f}}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\phi^2 + 73\phi + 1) \quad (3)$$

$$K_{nf} = 0.25 \left[(3\phi - 1) K_p + (2 - 3\phi) + \sqrt{\Delta} \right] \quad (4)$$

$$\Delta = \left[(3\phi - 1) K_p + (2 - 3\phi) K_f \right]^2 + 8\lambda_p \cdot \lambda_b \quad (5)$$

در روابط بالا اندیس‌های f ، p و nf به ترتیب به سیال پایه، نانوذره و محلول نانوسیال اشاره دارد. مرجع [۳۳] خواص مربوط به محلول نانوسیال را در دمای ۴۵ سلسیوس ارائه نموده که در جدول ۲ آمده است. با محاسبه خواص محلول نانوسیال می‌توان معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی را بیان نمود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} u_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{nf} u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_{nf} u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_{nf} + \mu_t) \bar{S}_{ij} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_{p,nf} T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_{p,nf} u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_{nf} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$

لزجت آشفتگی است و توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اتلاف انرژی (ε) با توجه به مدل توربولانسی k - ε Standard محاسبه می‌گردد. در روابط مذکور u_i سرعت، p فشار استاتیکی، T دمای استاتیکی و نرخ کرنش سیال است. مقدار ضریب انتقال حرارت (h) توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۳۴]:

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_{in} - T_{out})}{T_s - T_b} \quad (10)$$

$$T_b = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \quad (11)$$

دمای متوسط سطح رادیاتور و دمای متوسط ورودی و خروجی آب داغ است. میزان عدد رینولدز ورودی (Re) و ضریب اصطکاک (f) توسط روابط زیر محاسبه می‌گردد [۳۴]:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (12)$$

$$f = \frac{2}{L/D} \frac{P}{\rho U^2} \quad (13)$$

جدول ۲: خواص محلول نانوسیال مورد استفاده در کار حاضر [۳۳]

نانوذره	درصد حجمی	دانسیته	گرمای ویژه	لزجت	هدایت حرارتی
	%	Kg/m ³	KJ/Kg.K	Pa.s	W/m.K
Al ₂ O ₃	۰/۱	۱۰۴۴	۳۸۴۴	۰/۰۰۴۰۶	۰/۵۳۵
	۰/۵	۱۰۴۸	۳۷۹۴	۰/۰۰۴۶۶	۰/۵۴۵
	۰/۹	۱۰۵۲	۳۷۳۸	۰/۰۰۵۱۱	۰/۵۴۹
TiO ₂	۰/۱	۱۰۸۲	۳۶۵۵	۰/۰۰۱۳۹	۰/۴۹۴
	۰/۵	۱۰۸۴	۳۵۴۴	۰/۰۰۱۷۶	۰/۵۰۶
	۰/۹	۱۰۸۸	۳۴۳۱	۰/۰۰۲۲۰	۰/۵۱۶
CNC	۰/۱	۱۰۲۷	۳۹۹۵	۰/۰۰۲۶۵	۰/۵۲۶
	۰/۵	۱۰۳۴	۳۹۲۹	۰/۰۰۳۰۴	۰/۵۲۹
	۰/۹	۱۰۳۸	۳۸۸۲	۰/۰۰۳۶۶	۰/۵۳۹
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	۰/۱	۱۰۵۶	۳۶۷۵	۰/۰۰۵۶۶	۰/۵۵۶
	۰/۵	۱۰۵۹	۳۶۴۷	۰/۰۰۵۹۸	۰/۵۶۰
	۰/۹	۱۰۶۳	۳۶۳۴	۰/۰۰۶۳۱	۰/۵۶۳
Al ₂ O ₃ /CNC	۰/۱	۱۰۶۶	۳۳۵۶	۰/۰۰۶۷۷	۰/۵۷۰
	۰/۵	۱۰۶۹	۳۳۰۰	۰/۰۰۷۷۷	۰/۵۸۰
	۰/۹	۱۰۷۲	۳۲۶۵	۰/۰۰۸۳۰	۰/۵۸۵

میزان عدد ناسلت توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Nu = \frac{hD}{K_{nf}} \quad (14)$$

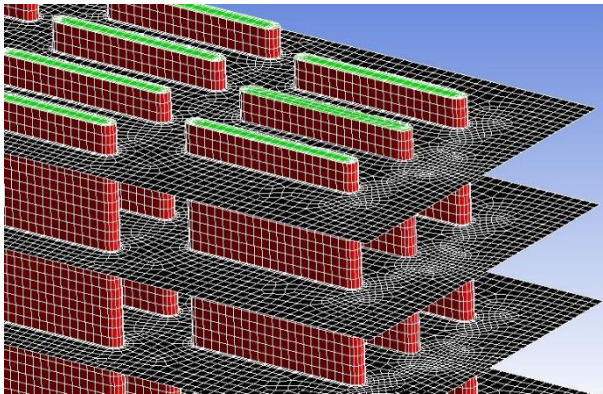
نانوسیال با وجود افزایش ضریب انتقال حرارت، سبب افزایش افت اصطکاکی نیز می‌شود. جهت بررسی اثربخشی نانوسیال در سیستم رادیاتور از پارامتری به نام ضریب عملکرد حرارتی (TPE¹) استفاده می‌گردد که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۴].

$$TPE = \frac{Nu}{Nu_0} \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (15)$$

اندیس 0 مربوط به معنای زمانی است که فقط سیال پایه وجود داشته و نانوسیال نداریم. مقدار ضریب عملکرد بیش از یک به معنای برتری میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به افزایش افت فشار بوده و استفاده از نانوسیال را تایید می‌کند.

در مقاله حاضر هندسه رادیاتور اتومبیل سپس توسط نرم‌افزار گمبیت ۲۴.۳.۲ ترسیم و شبکه‌بندی می‌گردد. در ادامه جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-حرارتی از نرم‌افزار انسیس فلونت^۳

استفاده می‌شود. از الگوریتم سیمپل جهت تصحیح سرعت-فشار و جهت گسسته سازی معادلات از روش کویک^۴ استفاده می‌گردد. مقدار باقیمانده^۵ برای معادلات ۱۰^{-۶} و گام زمانی ۰/۰۵^۶ ثانیه می‌باشد. در کار حاضر سعی شده است جهت شبکه‌بندی از شبکه ساختاریافته مربعی استفاده گردد تا دقت و سرعت حل افزایش یابد (شکل ۲). در کنار مرز دیواره‌ها نیز از روش لایه مرزی استفاده شده است که با استفاده از آن گرادیان‌های کمیت‌های مختلف (سرعت، دما و ...) به راحتی تسخیر^۷ و محاسبه شود. محلول نانوسیال با دبی جرمی مشخص (در بازه ۱۰g/s تا ۱۰۰g/s) و دمای ۴۵ سلسیوس وارد لوله‌های رادیاتور می‌شود. هوا نیز با سرعت ۳ m/s و دمای ۳۰ سلسیوس بر روی رادیاتور جریان داشته و با شرط فشار ثابت خارج می‌گردد.



شکل ۲: شبکه‌بندی هندسه رادیاتور اتومبیل

۳- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی و صحت‌سنجی

جهت بررسی استقلال از شبکه از تعداد چهار شبکه به اندازه‌های حدود ۳۰۰/۰۰۰، ۷۰۰/۰۰۰، ۱/۱۰۰/۰۰ و ۱/۳۰۰/۰۰۰ سلول استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه مورد مربوط به دبی جرمی ۱۰۰g/s بیشترین دبی موجود در کار حاضر است، از این دبی در بررسی استقلال از شبکه استفاده شده و پارامتر ضریب انتقال حرارت (CHTC^۸) در آن مقایسه می‌گردد. شکل ۳ نشان می‌دهد که تغییرات ضریب انتقال حرارت در بازه ۱/۱۰۰/۰۰۰ و ۱/۳۰۰/۰۰۰ سلول اندک و زیر ۲ درصد بوده و بدین ترتیب تعداد شبکه ۱/۱۰۰/۰۰۰ سلول به‌عنوان تعداد شبکه نهایی جهت شبیه‌سازی استفاده می‌گردد.

⁶ Time step

⁷ Capture

⁸ convective heat transfer coefficient

¹ Thermal performance coefficient

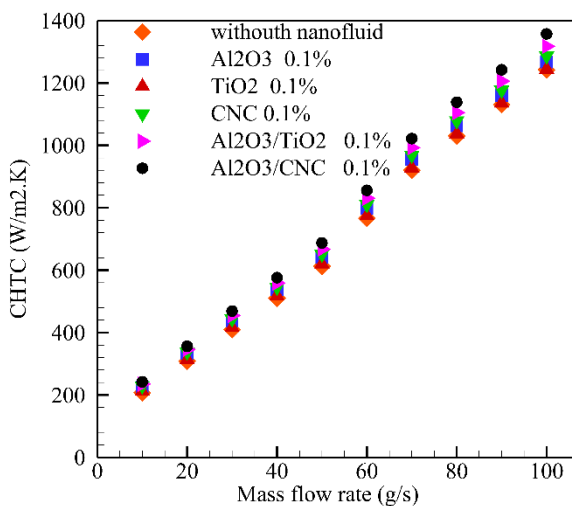
² Gambit 4.3.2

³ Ansys fluent 15

⁴ QUICK

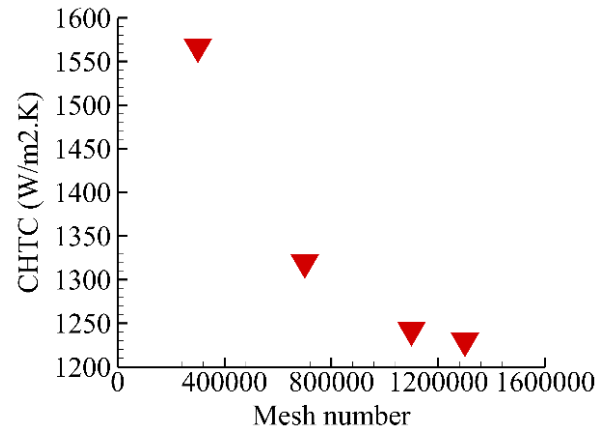
⁵ Residual

هدف کار حاضر بررسی اثر نانو سیال (هیبریدی و ساده) بر روی میزان افزایش انتقال حرارت و عملکرد دمایی آن است. ابتدا میزان ضریب انتقال حرارت برای انواع نانوسیال ساده و هیبریدی و در کسرهای حجمی مختلف بررسی می‌شود. شکل ۵ و شکل ۶ میزان ضریب انتقال حرارت را به ترتیب در کسر حجمی ۰/۱ درصد و ۰/۹ درصد برای انواع نانوذرات نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در یک عدد رینولدز ثابت در همه نانوسیال‌ها میزان ضریب انتقال حرارت با افزایش نانوذرات افزایش یافته است. همچنین میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای کسر حجمی ۰/۹ نسبت به ۰/۱ قابل ملاحظه‌تر است. نانوسیال‌های هیبریدی Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 نسبت به نانوذرات‌های ساده دیگر افزایش بیشتری در انتقال حرارت نشان می‌دهند. برای مقایسه دقیق‌تر مقدار نسبت ضریب انتقال حرارت که بیانگر میزان نسبت ضریب انتقال حرارت برای هر نانوسیال نسبت به ضریب انتقال حرارت در حالت پایه است، در شکل ۷ آمده است. به‌عنوان اولین نتیجه مشاهده می‌گردد که اثر نانوسیال در دبی‌های جرمی پایین بیشتر بوده و با افزایش دبی سیال از مقدار آن کاسته می‌شود. دلیل آن نیز این است که با افزایش دبی و افزایش سرعت سیال سهم سرعت سیال در افزایش ضریب انتقال حرارت به سهم افزایشی نانوسیال غلبه می‌کند. برای مثال میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال هیبریدی Al_2O_3/CNC در دبی 10 g/s به میزان ۵۵٪ بوده، اما برای دبی 100 g/s به میزان ۳۶٪ می‌باشد. این مقادیر برای Al_2O_3/TiO_2 به ترتیب ۴۳٪ و ۲۷٪ است. این مقادیر بیشترین میزان افزایش ضریب انتقال حرارت می‌باشد.



شکل ۵: ضریب انتقال حرارت در کسر حجمی ۰/۱ درصد

نانوذرات ساده Al_2O_3 و CNC رفتاری شبیه به هم دارند به طوری که مقادیر افزایشی در دبی کمینه و بیشینه برای Al_2O_3 به ترتیب ۳۳٪ و ۱۸٪ و برای CNC به ترتیب ۳۶٪ و ۲۰٪ است. نانوسیال TiO_2 از میان نانوسیال‌های ساده بدترین عملکرد را داشته به طوری که در مقدار حجمی ۹ درصد



شکل ۳: بررسی استقلال از شبکه

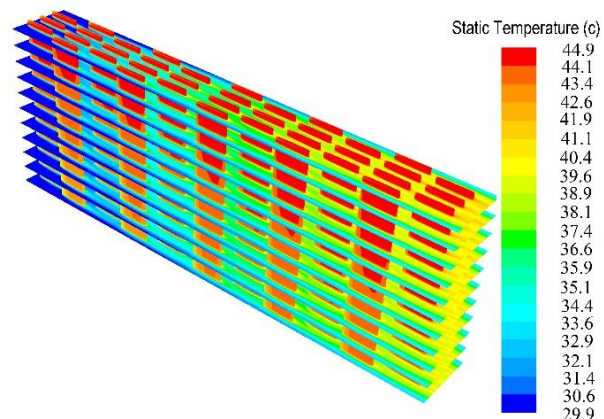
در ادامه اعتبارسنجی نتایج در بازه 10 g/s تا 100 g/s و با مقایسه پارامتر ضریب انتقال حرارت در مرجع [۳۲] می‌پذیرد. جدول ۳ نشان می‌دهد که بیشترین میزان خطا در کار حاضر ۹ درصد بوده و بنابراین می‌توان به نتایج شبیه‌سازی اعتماد نمود.

جدول ۳: اعتبارسنجی نتایج

خطا (%)	h (W/m².K) (کار حاضر)	h (W/m².K) [۳۲]	(g/s)m
۸	۱۲۴۳/۱۳	۱۳۵۰	۱۰
۹	۶۱۲/۴۴	۶۷۰	۵۰
۳/۵	۲۰۷/۱۵	۲۰۰	۱۰۰

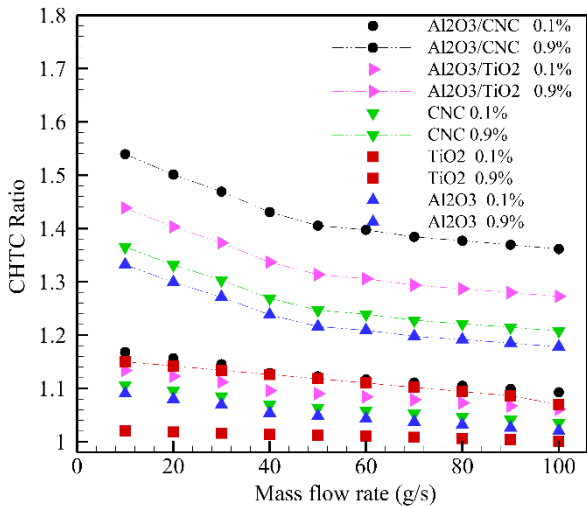
۴- نتایج و بحث

شکل ۴ کانتور دما را برای هندسه رادیاتور نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که سیال خنک‌کننده (هوا) با دمای حدود 30°C سلسیوس به تیوب و فین‌های رادیاتور برخورد کرده و با دریافت حرارت رادیاتور خارج می‌گردد. دمای آب داغ ورودی به تیوب نیز 45°C درجه بوده که مقداری از این حرارت به سیال هوا داده می‌شود.

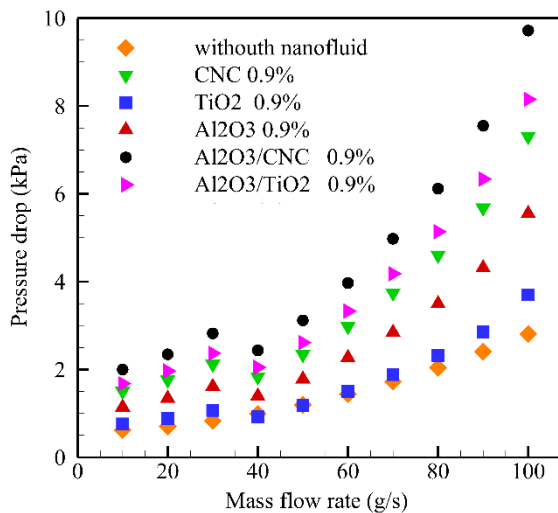


شکل ۴: کانتور دما در هندسه رادیاتور

برای نانوسیال TiO_2 مقدار TPE حتی به زیر مقدار ۱ رسیده که آن نشان دهنده نامناسب بودن استفاده از این نانوسیال در کاربرد خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل در درصدهای حجمی پایین است. میزان پارامتر TPE در کسر حجمی ۰/۹ درصد و دبی ۱۰ g/s برای نانوسیال-های هیبریدی Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 به ترتیب ۱.۵ و ۱.۴۲ می‌باشد، درحالی‌که برای نانوسیال‌های ساده Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 به ترتیب ۱/۳۰، ۱/۳۲ و ۱/۰۹ است

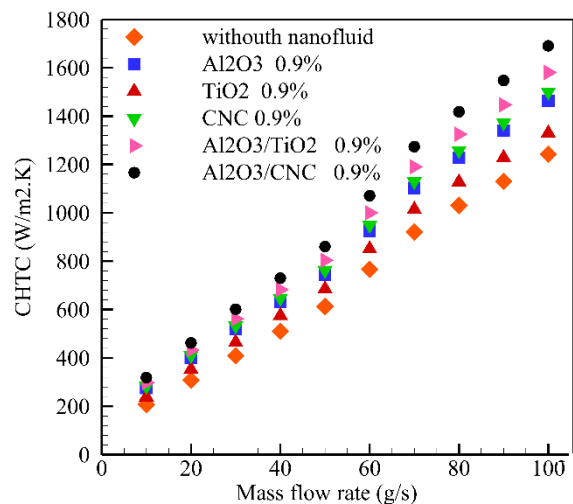


شکل ۷: نسبت ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال مختلف



شکل ۸: مقدار افزایش افت فشار برای نانوسیال مختلف

میزان افزایش آن در دبی کمینه و بیشینه به ترتیب ۱۵٪ و ۷٪ می‌باشد. اضافه کردن نانوسیال به سیال پایه سبب افزایش لزجت محلول نانوسیال می‌شود که آن سبب افزایش افت فشار آن می‌شود. شکل ۸ مقادیر افزایش افت فشار را برای محلول نانوسیال‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افت فشار نسبت به دبی سیال تقریباً یک تابع درجه ۲ است و مقادیر آن با افزایش دبی سیال افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که محلول نانوسیال Al_2O_3/CNC بیشترین افت فشار و نانوسیال TiO_2 کمترین افت فشار را در مجموعه تیوب‌های رادیاتور تولید می‌کند. این یک رفتار متناقض با مقادیر افزایش انتقال حرارت است، زیرا در مبحث انتقال حرارت نشان داده شد که بهترین عملکرد مربوط به Al_2O_3/CNC و بدترین عملکرد مربوط به TiO_2 بوده است. بنابراین جهت بررسی میزان تاثیر نانوسیال نیاز به بررسی پارامتر عملکرد حرارتی (رابطه (۱۵)) داریم. به همین دلیل پارامتر ضریب عملکرد حرارتی (TPE) که بیانگر قدرت افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به میزان افزایش افت فشار است، بررسی می‌شود. عدد یک برای این پارامتر نشان دهنده برابری میزان افزایش انتقال حرارت و افزایش افت فشار بوده و بنابراین جهت توجیه پذیری نوع و میزان نانوسیال این مقدار باید بزرگتر از یک باشد. شکل ۹ و شکل ۱۰ ضریب عملکرد حرارتی (TPE) را در درصدهای حجمی ۰/۱ و ۰/۹ درصد نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب عملکرد حرارتی در دبی‌های پایین بیشتر بوده و با افزایش دبی سیال پایه کاهش می‌یابد. دلیل آن نیز این است که در دبی‌های بالا سهم انتقال حرارت جابه‌جایی سیال نسبت به عملکرد خواص نانوسیال برتری پیدا کرده و عملاً اثر نانوسیال در بهبود افزایش نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد. مشاهده می‌گردد که نانوسیال‌های هیبریدی Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال‌های ساده داشتند به طوری که در کسر حجمی ۰/۱ درصد و دبی ۱۰ g/s میزان پارامتر TPE برای این دو نانوسیال هیبریدی به ترتیب ۱/۱۶ و ۱/۱۲ است. درحالی‌که برای نانوسیال‌های ساده Al_2O_3 و CNC این مقدار تقریباً ۱/۰۷ می‌باشد.



شکل ۶: ضریب انتقال حرارت در کسر حجمی ۰/۹ درصد

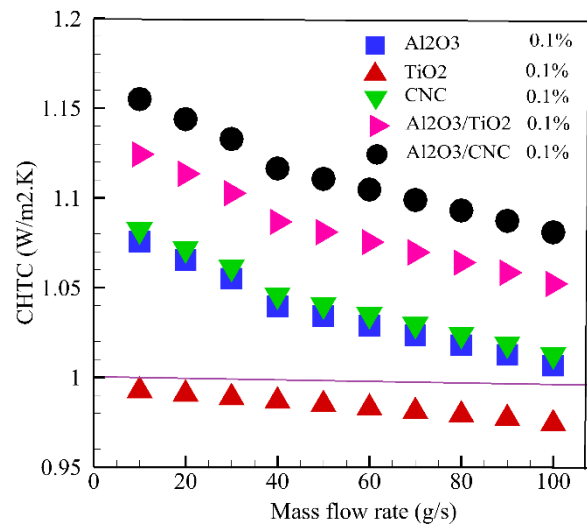
سلسیوس و میزان دمای هوای خنک‌کن رادیاتور ۳۰ سلسیوس است. شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-حرارتی رادیاتور توسط نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شده است. نتایج نشان داد که نانوسیال‌های هیبریدی علی‌رغم افزایش میزان ضریب انتقال حرارت (CHTC) نسبت به نانوسیال‌های ساده، سبب افزایش نرخ افت فشار سیستم نیز می‌گردند. با بررسی پارامتر ضریب عملکرد حرارتی (TPE) مشاهده شد که نانوسیال‌های هیبریدی شامل Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال‌های ساده شامل Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 داشتند، به طوریکه بیشترین میزان ضریب عملکرد حرارتی (TPE) برای نانوسیال‌های هیبریدی Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 به ترتیب ۱/۵ و ۱/۴۲ و درحالی‌که برای نانوسیال‌های ساده Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 به ترتیب ۱/۳۰، ۱/۳۲ و ۱/۰۹ بوده است. نتایج نشان داد که برای نانوسیال TiO_2 اثرگذاری پایینی در افزایش عملکرد حرارتی رادیاتور دارد.

۶- فهرست علائم

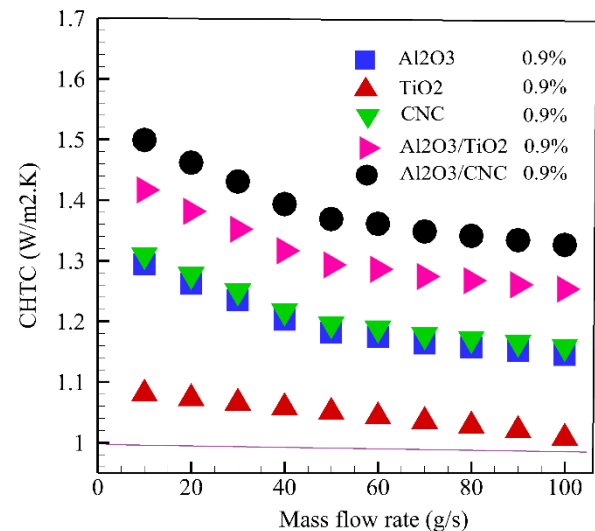
علائم انگلیسی	
TPE	ضریب عملکرد حرارتی
C_p	حرارت مخصوص ($kJ/kg.K$)
k	هدایت حرارتی ($kJ/m^2.K$)
\dot{m}	نرخ جریان جرمی (kg/s)
T	دما (K)
u	سرعت (m/s)
k	انرژی جنبشی اغتشاشی ($kJ/kg.K$)
علائم یونانی	
ρ	دانشسته سیال (kg/m^3)
μ	لزجت ($Pa.s$)
ε	انرژی استهلاك اغتشاشی ($kJ/kg.K$)
زیرنویس‌ها	
f	سیال پایه
p	نانوذره
nf	محللول نانوسیال
in	ورودی
out	خروجی
t	اغتشاش

۷- منابع

[1] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, and R. Saidur, "Hybrid nanocoolant for enhanced heat transfer performance in vehicle cooling system," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 133, p. 105922, Apr. 2022. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922)



شکل ۹: ضریب عملکرد حرارتی برای درصد حجمی ۰/۱ درصد



شکل ۱۰: ضریب عملکرد حرارتی برای درصد حجمی ۰/۹ درصد

این مقادیر بیشترین مقادیر TPE می‌باشند. برای نانوسیال TiO_2 در مقادیر دبی جرمی بالاتر از 10 g/s مقدار TPE حتی در کسر حجمی ۰/۹ درصد به مقدار یک نزدیک شده که نشان دهنده اثرگذاری پایین این نانوذره است.

۵- نتیجه‌گیری

در کار حاضر یک مقایسه عملکردی بر روی نانوسیال‌های ساده و هیبریدی در افزایش نرخ خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل انجام شد. نانوسیال‌های ساده شامل Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 و نانوسیال‌های هیبریدی شامل Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 هستند. دبی آب داغ ورودی به رادیاتور در محدوده 10 g/s تا 100 g/s و دمای آن 45

103, pp. 556–592, Apr. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2018.12.057](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057)

[10] S. P. C. Amit Gulhane, "Experimental investigation of convective heat transfer coefficient of Al₂O₃/water nanofluid at lower concentrations in a car radiator," *Heat Transf.*, vol. 46, pp. 1119–1129, Apr. 2017. [Online]. Available: doi: [10.1002/htj.21264](https://doi.org/10.1002/htj.21264)

S. S. Hojjat, A. Sarlak, and A. A. Ranjbar, "Performance evaluation of a car radiator using Al₂O₃ nanofluid and comparison with numerical methods," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, pp. 163–170, Jan. 2017, doi: [10.1007/s12206-016-1206-y](https://doi.org/10.1007/s12206-016-1206-y).

[12] M. N. Esfahani, B. Ghasemi, and M. Afrand, "A new hybrid nanofluid based on Ag–MgO/water: Synthesis, thermophysical properties and heat transfer performance evaluation," *J. Mol. Liq.*, vol. 253, pp. 217–228, Mar. 2018, doi: [10.1016/j.molliq.2017.11.063](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.063).

[13] K. A. Hamid, W. H. Azmi, M. F. Nabil, R. Mamat, and K. V. Sharma, "Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO₂–SiO₂ nanofluids," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 110–120, Jan. 2016, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.002](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.002).

[14] R. Khedkar, N. Khedkar, R. Sonawane, M. Bhave, and S. Wagh, "Thermal performance of automobile radiator using CNT–water nanofluids," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 7701–7709, Sep. 2017, doi: [10.1016/j.matpr.2017.07.104](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.104).

[15] A. Kumar, A. Sharma, and S. Kumar, "Experimental analysis of CuO and Al₂O₃-based nanofluids in automotive radiator using Taguchi approach," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1680–1685, 2020, doi: [10.1016/j.matpr.2019.11.261](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.261).

[16] M. F. Nabil, W. H. Azmi, K. A. Hamid, R. Mamat, and M. Yusof, "Experimental study on the thermal conductivity and dynamic viscosity of TiO₂-SiO₂ nanofluids in water: Ethylene glycol mixture," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 124, pp. 1361–1376, Jan. 2018, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.105](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.105).

[17] M. Afrand, A. Toghraie, and M. Sina Nia, "Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A

[2] R. Cong, Y. Ozaki, B. S. Machado, and P. K. Das, "Constructal Design of a Rectangular Fin in a Mixed Convective Confined Environment," *Inventions*, vol. 3, no. 2, Jun. 2018. [Online]. Available: doi: [10.3390/inventions3020027](https://doi.org/10.3390/inventions3020027)

[3] K. Ting, A. K. Mozumder, and P. K. Das, "Effect of surface roughness on heat transfer and entropy generation of mixed convection in nanofluid," *Phys. Fluids*, vol. 31, no. 9, 2019. [Online]. Available: doi: [org/10.1063/1.5111104](https://doi.org/10.1063/1.5111104)

[4] J. Philip, P. D. Shima, and B. Raj, "Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids," *Nanotechnology*, vol. 19, no. 30, p. 305706, Jul. 2008. [Online]. Available: doi: [10.1088/0957-4484/19/30/305706](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/30/305706)

[5] M. Afrand, D. Toghraie, and B. Ruhani, "Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe₃O₄–Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 77, pp. 38–44, Oct. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007)

[6] M. Bahrami, M. Akbari, A. Karimipour, and M. Afrand, "An experimental study on rheological behavior of hybrid nanofluids made of iron and copper oxide in a binary mixture of water and ethylene glycol: Non-Newtonian behavior," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 79, pp. 231–237, Dec. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.07.015](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.015)

[7] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, and S. Wongwises, "Entropy generation analysis of graphene–alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 103, pp. 1084–1097, Dec. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070)

[8] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, and G. Najafi, "Recent state of nanofluid in automobile cooling systems," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, no. 2, pp. 981–1008, Jan. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1007/s10973-018-7477-3](https://doi.org/10.1007/s10973-018-7477-3)

[9] M. U. Sajid and H. M. Ali, "Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.

- for the direct absorption solar collector (DASC) application," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 206, p. 110323, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.solmat.2019.110323](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110323).
- [26] A. M. Hussein, "Thermal performance and thermal properties of hybrid nanofluid laminar flow in a double pipe heat exchanger," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 88, pp. 37–45, Nov. 2017, doi: [10.1016/j.expthermflusci.2017.05.015](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.05.015).
- [27] F. Shabani, A. Khosravi Farsani, and B. Asadi Boroujeni, "Experimental solution and numerical simulation of flow and heat transfer in car radiators in forced and natural flows," *Karafan Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 71–95, 2022, doi: [10.48301/kssa.2022.336734.2061](https://doi.org/10.48301/kssa.2022.336734.2061). (in Persian)
- [28] B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, and B. Mohammadi Alasti, "Redesign of engine radiator based on number of optimal fans using a genetic algorithm," *Karafan Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 99–118, 2021, doi: [10.48301/kssa.2021.128398](https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128398). (in Persian)
- [29] B. Rahmatinejad, H. Rahimi Asiabaraki, F. Azimpour Shishevan, and M. A. Mohtadi Bonab, "Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator," *The Journal of Engine Research*, vol. 70, no. 2, pp. 66–79, 2023, doi: [10.22034/er.2023.2011671.1015](https://doi.org/10.22034/er.2023.2011671.1015). (in Persian)
- [30] B. Rahmatinejad, H. Rahimi Asiabaraki, and F. Azimpour Shishevan, "Investigation of the effect of AL₂O₃ nanofluid in M13NI engine cooling system," *The Journal of Engine Research*, vol. 70, no. 1, pp. 47–65, 2023, doi: [10.22034/er.2023.1975318.0](https://doi.org/10.22034/er.2023.1975318.0). (in Persian)
- [31] B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, and B. Mohammadi Alasti, "Experimental evaluation of heat transfer of MF 285 tractor radiator, using nanofluid AL₂O₃+Water," *J. Agric. Mach.*, vol. 12, no. 3, pp. 281–299, 2022, [https://doi: 10.22067/jam.2020.58870.0](https://doi.org/10.22067/jam.2020.58870.0). (in Persian)
- [32] D. G. Charyulu, G. Singh, and J. K. Sharma, "Performance evaluation of a radiator in a diesel engine—a case study," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 19, no. 6, pp. 625–639, Jun. 1999, doi: [10.1016/S1359-4311\(98\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00064-7).
- review," *J. Mol. Liq.*, vol. 265, pp. 271–288, Jan. 2018, doi: [10.1016/j.molliq.2018.05.029](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.029).
- [18] A. A. Ranjbar, A. Sarlak, and S. S. Hojjat, "Numerical study of nanofluid effect on automotive radiator performance," *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 53–63, 2016. (in Persian)
- [19] A. Akbari, A. Ashjaee, and M. Hormozi, "Experimental investigation of the heat transfer performance of car radiator using ZnO/EG–water nanofluid," *Heat Mass Transf.*, vol. 53, pp. 1835–1842, May 2017, doi: [10.1007/s00231-017-1940-2](https://doi.org/10.1007/s00231-017-1940-2).
- [20] A. Zeinali Heris, S. Ghaffari, and M. M. Mahyari, "Experimental investigation of forced convective heat transfer of a hybrid nanofluid in a car radiator," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 57, pp. 40–47, Feb. 2014, doi: [10.1016/j.expthermflusci.2014.05.006](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.05.006).
- [21] V. Kumar and J. Sarkar, "Experimental hydrothermal behavior of hybrid nanofluid for various particle ratios and comparison with other fluids in minichannel heat sink," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 110, p. 104397, Jan. 2020, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104397](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104397).
- [22] J. Qu, R. Zhang, Z. Wang, and Q. Wang, "Photo-thermal conversion properties of hybrid CuO-MWCNT/H₂O nanofluids for direct solar thermal energy harvest," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, pp. 390–398, Jan. 2019, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2018.10.094](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.094).
- [23] T. Ambreen, A. Saleem, H. M. Ali, S. A. Shehzad, and C. W. Park, "Performance analysis of hybrid nanofluid in a heat sink equipped with sharp and streamlined micro pin-fins," *Powder Technol.*, vol. 355, pp. 552–563, Oct. 2019, doi: [10.1016/j.powtec.2019.07.087](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.087).
- [24] A. Bhattad, J. Sarkar, and P. Ghosh, "Experimentation on effect of particle ratio on hydrothermal performance of plate heat exchanger using hybrid nanofluid," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 162, p. 114309, Nov. 2019, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2019.114309](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114309).
- [25] X. Li, G. Zeng, and X. Lei, "The stability, optical properties and solar-thermal conversion performance of SiC-MWCNTs hybrid nanofluids

[34] A. A. Minea, "Pumping power and heat transfer efficiency evaluation on Al₂O₃, TiO₂ and SiO₂ single and hybrid water-based nanofluids for energy application," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 139, no. 2, pp. 1171–1181, Jan. 2020, doi: [10.1007/s10973-019-08510-3](https://doi.org/10.1007/s10973-019-08510-3).

[33] F. Benedict et al., "Thermal performance of hybrid-inspired coolant for radiator application," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6, Jun. 2020, doi: [10.3390/nano10061100](https://doi.org/10.3390/nano10061100).



The Effect of Aluminum Porous Network Characteristics on the Complete Melting Time of Coconut Oil and the Temperature Uniformity of the Wall

Seyyed Ali Naghedifar¹, Mohammad Moghiman^{2*}, Mojtaba Mamourian³

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2 Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

In enclosures containing phase change materials (PCMs), walls subjected to a constant heat flux experience localized temperature rise. The objective of this study is to minimize the complete melting time while ensuring uniform temperature distribution on the heated wall, while maintaining the thermal capacity of the enclosure. In this study, an aluminum porous network occupies half of the enclosure containing coconut oil as the PCM. The effects of porous network placement, enclosure inclination angle relative to the horizontal, aspect ratio of the enclosure, and pore density of the porous structure on the complete melting time of the PCM, the maximum temperature deviation of the wall from the mean temperature, and the uniformity of the temperature distribution on the heated wall are numerically analyzed using ANSYS Fluent.

The results indicate that increasing the pore density from 5 to 20 pores per inch enhances temperature uniformity but increases the complete melting time by up to 12.6%. When the metallic network is positioned in the lower half of the enclosure, the shortest melting time of 2340 seconds is achieved. Increasing the aspect ratio from 2 to 1 and then to 0.5 improves temperature uniformity but has minimal impact on the complete melting time. The enclosure inclination angle has a significant influence on the complete melting time but a negligible effect on temperature uniformity. Specifically, at an inclination of -30 degrees, the melting time is 39% shorter than at +30 degrees. Finally, the optimal combination of these parameters is determined using the Taguchi method.

Keywords

Semi-porous aluminum cavity
Taguchi
Temperature uniformity index
Complete melting time
Coconut oil .

Received: 01.09.2025

Revised: 03.09.2025

Accepted: 04.14.2025

*Corresponding Author

Mohammad Moghiman

Email

moghiman@um.ac.ir

1- Introduction

Phase change materials (PCMs) are widely used for thermal energy storage due to their ability to store and release large amounts of latent heat [1]. Despite their advantages, the main limitation of pure PCMs is their low thermal conductivity, which slows heat transfer and delays the phase transition process.

Research has shown that embedding PCM within metallic structures such as aluminum foams can significantly improve thermal performance. Atal et

al. [2] demonstrated that using paraffin saturated in aluminum foam inside a shell-and-tube TES unit reduced the melting and freezing cycle times, with lower foam porosity leading to faster phase transitions.

The geometry of the PCM container also plays a crucial role. Poran and Ahmad [3] numerically examined seven different configurations and concluded that a circular heat source substantially



increases the melting rate. Meanwhile, Hu et al. [4] studied 3D-printed thermal conductivity enhancers, including fins and porous structures, across 15 cooling system designs. Their results showed that porous structures outperformed traditional fins, achieving up to 3.5 times better cooling performance at 20 W. In a follow-up study, Hu et al. [5] further demonstrated that porous media-filled coolers provided up to 78.8% improvement at a 1.0 fill ratio under 10 W and 70°C conditions, with higher thermal input further enhancing performance.

The efficiency of TES units is highly dependent on both PCM conductivity and container design. Ghalambaz et al. [6] numerically modeled petal-shaped tubes enhanced with copper (Cu) and graphene oxide (GO) nanoparticles and found optimized designs that significantly improved heat transfer. A subsequent study by the same group [7] showed that adding copper porous networks into PCM systems reduced charging time, where the height and porosity of the metal network were the most influential factors, while nanoparticle concentration had a lesser effect.

Experimental investigations have also emphasized the advantages of PCM walls in TES units. Kurnia et al. [8] showed that using PCM as a wall material improved both insulation and energy storage capacity, compared to traditional TES units. Additionally, Kotb and Wang [9] analyzed the effect of nonlinear porosity distributions in copper foam, revealing that a positive porosity gradient reduced melting times by up to 22.67% and increased the energy storage rate by 38.32%.

2- The Problem Study

This study examines a phase change thermal storage unit containing coconut oil, partially embedded with an aluminum porous structure. While maintaining constant total thermal capacity, the research aims to reduce melting time and improve temperature uniformity along the heated wall. A numerical index is proposed to evaluate thermal uniformity. Key parameters—container tilt angle, pore density (PPI), aspect ratio, and porous material placement—are

analyzed. Using the Taguchi method, an optimal configuration is identified to maximize performance.

3- Research Methods

A numerical model is developed to study the melting behavior of a phase change material (PCM) embedded in a porous aluminum matrix under natural convection. The model assumes local thermal equilibrium, constant thermophysical properties, and neglects volume expansion. The enthalpy-porosity method is used to simulate the phase change, and the Darcy–Brinkman–Forchheimer model accounts for fluid flow in the porous medium. Permeability and inertia effects are estimated using empirical relations based on pore density and porosity. Effective thermal properties are calculated through volume averaging. This model provides a reliable framework for analyzing and optimizing heat transfer in PCM-metal foam systems.

4- Results

A two-dimensional square cavity (5 cm × 5 cm) was considered, with a uniform heat flux of 3000 W/m² applied on the left wall, representing a constant-flux thermal boundary similar to conditions encountered in thermal management systems for electronics. The baseline case employed a metal foam region with a porosity of 0.9 and a pore density of PPI = 10, located adjacent to the heated wall. The results indicated that the complete melting of the PCM occurred after 2780 seconds, with a maximum deviation of 1.31 °C between the wall's peak and average temperatures during the process. Initially, heat transfer was dominated by conduction, but as melting progressed, natural convection intensified, accelerating the melting rate. Toward the end, conduction again became dominant as the remaining solid PCM resided at the bottom of the cavity.

To assess the impact of foam placement, four configurations—foam located on the left (hot wall), top, right, and bottom—were evaluated. Temperature uniformity, quantified via a

Temperature Uniformity Index (TUI), was found to be most stable and closest to unity when the foam was placed adjacent to the hot wall, indicating a more even temperature distribution. However, this configuration did not significantly reduce the total melting time. In contrast, foam placed at the bottom minimized the melting duration due to a reduced PCM volume in that region, but resulted in higher peak wall temperatures and greater thermal gradients. These findings reveal a design trade-off between achieving uniform temperature distribution and minimizing the total melting time.

Further analysis explored the effect of varying the pore density (PPI) of the foam. Increasing PPI improved the TUI due to enhanced thermal conduction through the foam structure. However, higher PPI values also suppressed natural convection within the PCM, resulting in longer melting durations. Maximum temperature differences between the wall's peak and average temperatures decreased with increasing PPI, owing to the enhanced heat spreading ability of denser foam structures.

The influence of cavity geometry was investigated by altering the aspect ratio (AR) while maintaining constant cavity volume and total thermal input. An increase in AR led to a reduction in TUI and an increase in peak temperature differences, due to variations in boundary layer thickness along the extended vertical heated wall and associated changes in thermal resistance. Nonetheless, the total melting time remained relatively constant, highlighting the importance of wall geometry in temperature regulation rather than melting efficiency.

Finally, the effect of tilting the cavity with respect to the horizontal axis was studied for inclination angles of $+30^\circ$, 0° , and -30° . While the TUI remained largely unaffected by inclination due to minimal changes in thermal resistance or heat flux distribution, the total melting time was significantly influenced. A downward tilt of -30° enhanced natural convection, reducing the full melting time by approximately 40% compared to the $+30^\circ$ case.

This was attributed to earlier and stronger activation of buoyancy-driven flow within the cavity.

5- Conclusion

In this study, the influence of metal foam characteristics on the melting rate of a phase change material (PCM) and the temperature uniformity of the heated wall was numerically investigated. The key findings are summarized as follows:

1 -Foam Position: Among the various locations of the porous medium within the cavity, placing the metal foam at the bottom results in the shortest melting time but yields the poorest temperature uniformity index (TUI). Conversely, positioning the foam at the top leads to the widest variation in both TUI and melting time.

2 -Pore Density (PPI): Increasing the foam's pore density (PPI) improves the temperature uniformity index, but also increases the total time required for complete PCM melting. Furthermore, a higher PPI reduces the maximum difference between the instantaneous peak and average wall temperatures.

3 -Aspect Ratio (AR): As the cavity's aspect ratio increases, TUI decreases, indicating reduced temperature uniformity. However, the melting time remains relatively unaffected. Additionally, higher aspect ratios lead to larger peak-to-average temperature differences on the heated wall.

4 -Inclination Angle: Varying the inclination angle of the cavity has minimal impact on temperature uniformity but significantly affects the total PCM melting time.

Optimal Configuration: Based on a Taguchi method optimization, the best configuration for minimizing both the total melting time and TUI occurs when the porous medium is placed adjacent to the heated (left) wall, the PPI is 5, the aspect ratio is 1, and the inclination angle is -30° . In this optimal case, the total melting time is 2440 seconds, and the maximum temperature difference between the wall's instantaneous peak and average is 1.56°C .

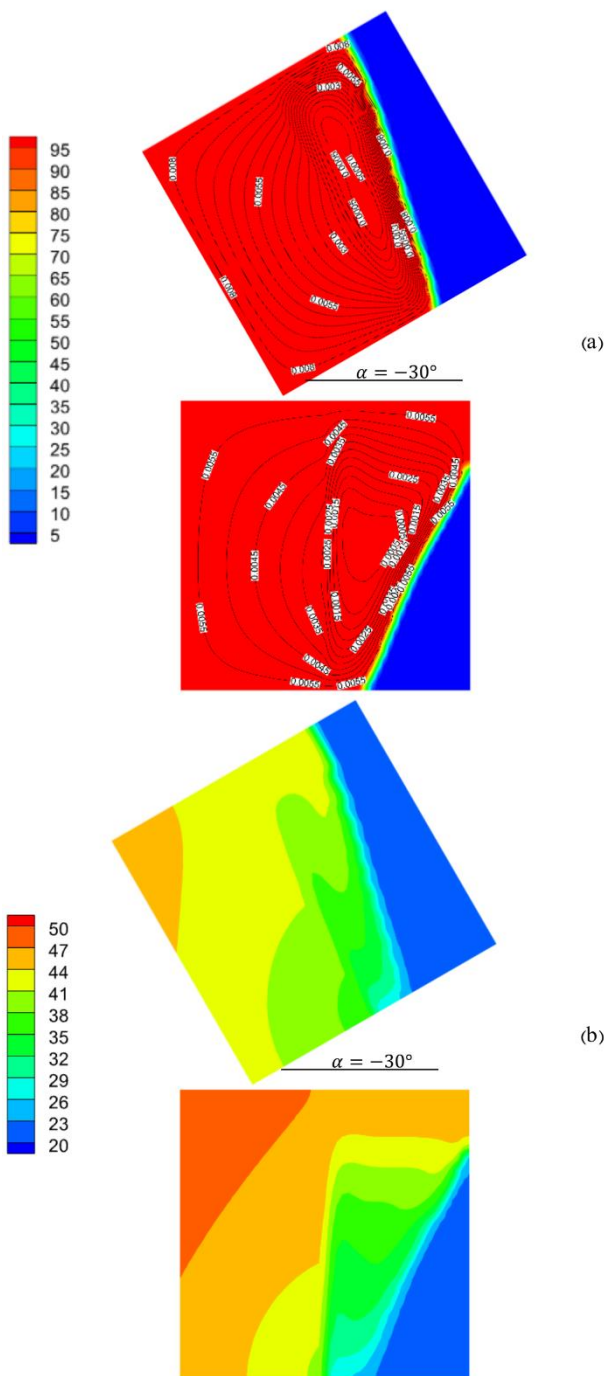


Figure 1: (a) Contour of liquid phase volume fraction (%) and streamlines, (b) Temperature distribution (°C) for the optimized case and the baseline case at the time corresponding to the minimum TUI for each case (1660 seconds for the optimized case and 1980 seconds for the baseline case)

6- References

[1] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*, Springer Berlin Heidelberg, 2008. [Online]. Available:

<https://books.google.com/books?id=N8LGwUNYWX8C>

[2] A. Atal, Y. Wang, M. Harsha, and S. Sengupta, "Effect of porosity of conducting matrix on a phase change energy storage device," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 93, pp. 9–16, 2016. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033)

[3] S. Poran and D. H. Ahmed, "Effect of cavity shape and heat source/sink orientation on PCM melting," *J. Therm. Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324219075>

[4] X. Hu, P. Chen, X. Guo, and X. Zhang, "Comparative studies on the thermal performance of novel PCM-based heat sinks using 3D-printed thermal conductivity enhancers," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 162, p. 108613, 2025. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613)

[5] X. Hu *et al.*, "Comparative studies on thermal management performance of PCM-based heat sinks filled with various height structured porous materials," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 263, p. 125376, 2025. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.125376](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125376)

[6] M. Ghalambaz *et al.*, "Melting process of the nano-enhanced phase change material (NePCM) in an optimized design of shell and tube thermal energy storage (TES): Taguchi optimization approach," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 193, p. 116945, 2021. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.116945](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116945)

[7] M. Ghalambaz *et al.*, "Phase-transition thermal charging of a channel-shape thermal energy storage unit: Taguchi optimization approach and copper foam inserts," *Molecules*, vol. 26, no. 5, p. 1235, 2021. doi: [10.3390/molecules26051235](https://doi.org/10.3390/molecules26051235)

[8] J. C. Kurnia *et al.*, "Optimization of an innovative hybrid thermal energy storage with phase change material (PCM) wall insulator utilizing Taguchi method," *J. Energy Storage*, vol. 49, p. 104067, 2022. doi: [10.1016/j.est.2022.104067](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104067)

[9] A. Kotb and S. Wang, "Enhanced thermal storage performance with non-linear porosity distribution in copper foam-PCM composites," *J. Energy Storage*, vol. 105, p. 114612, 2025. doi: [10.1016/j.est.2024.114612](https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114612)



تأثیر ویژگی‌های شبکه متخلخل آلومینیومی بر زمان ذوب کامل روغن نارگیل و یکنواختی دمای دیواره

سید علی ناقدی فرا^۱، محمد مقیمان^{۲*}، مجتبی مأموریان^۳

۱- دانشجوی دکتری مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

کلمات کلیدی	چکیده
محفظه نیمه متخلخل آلومینیومی تاگوچی شاخص یکنواختی دما زمان ذوب کامل روغن نارگیل.	در محفظه‌های حاوی ماده تغییرافزدهنده، دیواره‌های با شار گرمایی ثابت، افزایش دمای موضعی را تجربه می‌کنند. هدف پژوهش حاضر این است که با ثابت نگه‌داشتن ظرفیت گرمایی محفظه، زمان ذوب کامل کمینه شده و توزیع دما در دیواره گرم، یکنواخت باشد. در این مطالعه، شبکه متخلخل آلومینیومی، نیمی از محفظه حاوی روغن نارگیل به عنوان ماده تغییرافزدهنده را پر کرده است. تأثیر مکان قرارگیری شبکه متخلخل، زاویه محفظه نسبت به افق، نسبت منطری محفظه، تراکم حفره‌های شبکه متخلخل، بر زمان ذوب کامل ماده تغییرافزدهنده، اختلاف دمای حداکثر دیواره با دمای میانگین و یکنواختی توزیع دما در دیواره گرم، به صورت عددی با نرم‌افزار ANSYS Fluent بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش تراکم حفره‌ها از ۵ تا ۲۰ حفره در اینچ، شاخص یکنواختی دما بیشتر می‌شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرافزدهنده تا ۱۲/۶٪ افزایش می‌یابد. چنانچه مکان شبکه فلزی در نیمه پایینی محفظه باشد، کمترین زمان ذوب، معادل ۲۳۴۰ ثانیه را داراست. با افزایش نسبت منطری از ۲ به ۱ و سپس ۵/۰، شاخص یکنواختی دما بیشتر می‌شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرافزدهنده تغییر چندانی نمی‌کند. تغییر زاویه محفظه نسبت به افق، تأثیر بسزایی بر شاخص یکنواختی توزیع دما ندارد اما بر زمان ذوب کامل بسیار مؤثر بوده به طوری که زمان ذوب در زاویه ۳۰- درجه در مقایسه با ۳۰+ درجه، ۳۹٪ کمتر است. در نهایت، ترکیب بهینه این پارامترها، با روش تاگوچی تعیین شده است.
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵	
*نویسنده مسئول محمد مقیمان ایمیل moghiman@um.ac.ir	

۱- مقدمه

استفاده از مواد تغییرافزدهنده به صورت خالص محدودیت‌هایی دارد. یکی از این محدودیت‌ها، هدایت گرمایی پایین آن‌ها است که منجر به کند شدن فرآیند پخش گرما و تغییر فاز می‌شود. یکی از روش‌های جبران این کاستی، استفاده از محیط‌های متخلخل فلزی است. محیط متخلخل به عنوان پل گرمایی، انتقال گرما را بهبود می‌بخشند. در مقاله‌ای توسط آتال و همکاران [۴]، یک ذخیره‌ساز گرمایی پوسته-لوله مورد بررسی قرار گرفته است که پوسته آن شامل

ماده تغییرافزدهنده (PCM^۱) ماده‌ای است که به‌منظور ذخیره انرژی گرمایی آن هم به صورت گرمای نهان، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. این مواد در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان قرار گرفته و در زمینه‌های بسیاری از جمله واحدهای ذخیره انرژی گرمایی (TES^۲)، بازیابی گرمای اتلافی، سیستم‌های سرمایش و گرمایش، بهبود عملکرد یخچال، ایجاد شرایط آسایش دمایی در ساختمان‌ها و کشاورزی به کار رفته‌اند [۲،۳].

² Thermal energy storage

¹ Phase change material



داد که استفاده از محیط متخلخل باعث بهبود قابل توجه عملکرد حرارتی می‌شود. در توان ۱۰ وات و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، میزان بهبود نسبت پر شدگی ۱، ۰/۵ و ۰/۳ به ترتیب ۰/۵۴/۵، ۰/۷۸/۸ و ۰/۳۰/۳ بود. همچنین مشخص شد که افزایش توان گرمایی باعث بهبود بیشتر عملکرد خنک‌کننده‌ها می‌شود.

عملکرد گرمایی و نرخ ذوب در واحدهای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، به طراحی محفظه و رسانایی گرمایی ماده تغییرفازدهنده بستگی دارد. در پژوهشی توسط قلمباز و همکاران [۱۰]، عملکرد لوله‌های گلبرگی شکل در یک واحد TES پوسته و لوله به صورت عددی مدل‌سازی و تحلیل شده است. تأثیرات نانوذرات مس (Cu) و اکسید گرافن (GO) و همچنین هندسه لوله گلبرگی بر رفتار گرمایی بررسی شده است. آنان به کمک روش تاگوچی، طراحی بهینه لوله گلبرگی به همراه نانوذرات مس را مطالعه کرده و انتقال گرما را نسبت به لوله گرد بدون نانوذرات، بهبود داده‌اند. در پژوهشی دیگر توسط قلمباز و همکاران [۱۱] به کمک روش تاگوچی نشان داده شده است که افزودن شبکه متخلخل مسی به TES حاوی PCM با نانوذرات مس، زمان شارژ را کاهش می‌دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که ارتفاع و تخلخل شبکه فلزی، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار هستند و درصد نانوذرات، اهمیت کمتری دارند.

در باتری‌های لیتیوم-یونی پرتوان، مدیریت گرمایی کارآمد برای ایمنی و جلوگیری از گسترش گرما ضروری است. مطالعه لیو و همکاران [۱۲] یک مدل عددی بر پایه روش حجم محدود برای شبیه‌سازی تولید و گسترش گرما، تغییر فاز و خنک‌سازی مایع ارائه می‌دهد. در این پژوهش، یک سیستم مدیریت گرمایی جدید با ساختاری چندلایه از مواد تغییرفازدهنده، همراه با لوله‌های خنک‌کننده حاوی فوم فلزی متخلخل طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم دما را زیر ۴۰/۶۷ درجه سانتی‌گراد نگه داشته و گسترش گرما را مهار می‌کند. افزایش ضخامت PCM با رسانایی بالا، کنترل دما را بهبود می‌دهد، اما پس از حدی مشخص، تأثیر آن کاهش می‌یابد.

در مطالعه کورنیا^۲ و همکاران [۱۳]، عملکرد یک واحد TES، با دیواره‌ای از PCM که به عنوان عایق گرمایی و ذخیره‌ساز انرژی عمل می‌کند، به صورت تجربی بررسی شده است. تأثیرات نسبت

مواد پارافینی اشباع شده در فوم آلومینیومی است. اثر تخلخل فوم‌های آلومینیومی بر رفتار گرمایی سیستم، به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که استفاده از ماتریس هادی به همراه PCM، به طور قابل توجهی زمان لازم برای یک چرخه ذوب-انجماد را کاهش می‌دهد و فوم فلزی با تخلخل کمتر به دلیل هدایت گرمایی موثر بالاتر، چرخه را کوتاه‌تر می‌کند. در پژوهشی توسط ایرانمش و همکاران [۵]، به بررسی تأثیر جهت و اندازه فین‌های پله‌ای بر بهبود عملکرد یک مبدل گرمایی سه لوله‌ای قائم در حضور محیط متخلخل پرداخته شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد میزان انرژی ذخیره شده در ماده تغییرفازدهنده در بستر محیط متخلخل نسبت به ماده تغییرفازدهنده خالص تا ۱۶۶ درصد افزایش یافته است. در مطالعه بهرامی و صابری [۶]، یک استوانه تو در تو با فضای پر شده از ماده تغییرفازدهنده بررسی شده و تأثیر طول، ضخامت، جنس و نوع پره‌های متخلخل بر انتقال گرما، توسط آن‌ها ارزیابی گردیده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پره‌های متخلخل بهبود قابل توجهی در توزیع گرما ایجاد می‌کنند، به طوری که هندسه با پنج پره متخلخل، زمان ذوب را به یک‌سوم کاهش داده است.

یکی از عوامل مؤثر و تعیین‌کننده در فرآیند ذوب مواد تغییرفازدهنده، شکل محفظه حاوی این ماده است. پوران و احمد [۷] اثر نوع شکل محفظه و راستای چشمه/چاه گرمایی را بر نرخ فرآیند ذوب ماده تغییرفازدهنده بررسی کرده‌اند. آن‌ها در مجموع ۷ نوع چیدمان مختلف را با ثابت نگه‌داشتن طول چشمه/چاه گرمایی و مساحت محفظه، شبیه‌سازی عددی کرده و نتیجه گرفتند که منبع گرمایی دایره‌ای شکل، تأثیر بسزایی در افزایش نرخ ذوب دارد. در پژوهشی هو^۱ و همکاران [۸]، به مطالعه دو نوع افزایش رسانایی گرمایی چاپ‌شده با پرینتر سه‌بعدی، شامل فین‌ها و مواد متخلخل ساختاریافته پرداخته‌اند. ۱۵ نمونه خنک‌کننده با پیکربندی‌های مختلف طراحی و تحت بررسی تجربی و عددی در توان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ وات ارزیابی شده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که خنک‌کننده‌های متخلخل عملکرد بهتری نسبت به فین‌ها دارند و در توان ۲۰ وات بیشترین بهبود تا ۵/۳ برابر مشاهده شده است. در پژوهشی دیگر هو و همکاران [۹]، از مواد متخلخل ساختاریافته به عنوان افزایش رسانایی حرارتی در PCM استفاده کرده‌اند. این خنک‌کننده‌ها، با پرینتر سه‌بعدی ساخته و با نسبت‌های مختلف (۰، ۰/۳، ۰/۵ و ۱) پر شده و تحت توان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ وات بررسی گردیده‌اند. نتایج آن‌ها نشان

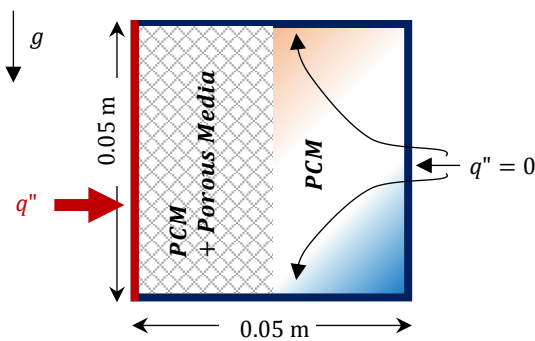
² Kurnia¹ Hu

حجم PCM به سیال انتقال گرما (HTF¹)، دمای ورودی و دبی حجمی HTF به کمک روش تاگوچی، ارزیابی شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد دیواره حاوی PCM عایق گرمایی بهتری ایجاد کرده و ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی گرمایی را نسبت به TES سنتی، افزایش می‌دهد. پژوهش کتب و وانگ^۲ [۱۴] تأثیر توزیع تخلخل غیرخطی شبکه فلزی مس بر ذوب و عملکرد گرمایی اسید پالمیتیک را بررسی می‌کند. نتایج آن دو نشان می‌دهد که توزیع تخلخل مثبت در جهت x زمان ذوب را ۱۰/۴٪ و در جهت y آن را ۱۶/۷۴٪ کاهش می‌دهد. بهینه‌سازی دوبعدی توزیع تخلخل، زمان ذوب را ۲۲/۶۷٪ کاهش داده و نرخ ذخیره انرژی را ۲۸/۳۲٪ افزایش می‌دهد.

در پژوهش حاضر، محفظه حاوی روغن نارگیل، که نیمی از آن دارای شبکه متخلخل آلومینیومی است، مطالعه گردیده است. در این مطالعه ظرفیت گرمایی کل محفظه ثابت نگه داشته شده است و هدف، کاهش زمان ذوب و در عین حال، افزایش یکنواختی توزیع دما در دیواره گرم شار ثابت است. در این راستا، شاخصی عددی جهت شناسایی یکنواختی توزیع دما در دیواره گرم، معرفی گردیده و تأثیرات زاویه محفظه نسبت به افق، تعداد حفره‌های متخلخل در اینچ (PPI³)، نسبت منظری محفظه و محل قرارگیری محیط متخلخل در محفظه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در آخر به کمک روش تاگوچی، ترکیب بهینه این پارامترها تعیین شده است.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی روغن نارگیل و آلومینیوم [۱۵]

خواصیت (واحد)	روغن نارگیل		آلومینیوم
	فاز جامد	فاز مایع	
ρ (kg/m ³)	۹۲۰	۹۱۴	۲۹۷۰
μ (Pa.s)	۰/۰۳۲۶	-	-
C_p ($\frac{J}{kg.K}$)	۳۷۵۰	۲۰۱۰	۷۶۵
β (1/K)	$9/3779 \times 10^{-4}$	-	-
k ($\frac{W}{m.K}$)	۰/۲۲۸	۰/۱۶۶	۴۰
L_f (J/kg)	-	۱۰۳۰۰۰	-
T_{std} (°C)	-	۲۳	-
T_{liq} (°C)	-	۲۵	-



شکل ۱: هندسه مسئله برای حالت پایه

شکل ۱، هندسه مسئله را نمایش می‌دهد. در این پژوهش، محفظه از ماده تغییرفازدهنده پُر شده و نیمی از آن دارای شبکه آلومینیومی متخلخل با تخلخل $\phi = 90\%$ است. دیواره سمت چپ شار ثابت بوده و بقیه دیواره‌ها عایق گرمایی‌اند. محفظه با نسبت منظری یک (مربع)، به عنوان حالت پایه^۴، دارای ابعاد $0.05\text{ m} \times 0.05\text{ m}$ و شار دیواره گرم برابر 3000 W/m^2 است. با تغییر ابعاد محفظه، شار گرمایی به گونه‌ای اعمال شده است که نرخ گرمای ورودی، یکسان باشد. همچنین، به منظور یکسان بودن مقدار ماده تغییرفازدهنده در تمامی موارد، حجم محفظه‌ها با ابعاد گوناگون، برابر حجم مورد پایه، یعنی 0.0025 m^3 در نظر گرفته شده است. بنابراین، برای محفظه‌هایی با نسبت منظری (نسبت ارتفاع به طول محفظه) برابر نیم و ۲، شار گرمایی دیواره گرم، به ترتیب $3000 \times \sqrt{2}\text{ W/m}^2$ و

۲- توصیف مسئله

۱ Heat transfer fluid
۲ Pore per inch

³ Pore per inch

⁴ Base case

۳- مدل عددی و معادلات حاکم

مدل عددی با در نظر گرفتن همرفت طبیعی برای توصیف فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در شبکه متخلخل آلومینیومی، ارائه شده است. این مدل، با استفاده از فرضیات زیر توسعه یافته است:

۱- خواص ترموفیزیکی PCM و شبکه متخلخل آلومینیومی در هر فاز ثابت فرض می‌شوند.

۲- انبساط حجمی PCM در طول فرآیند تغییر فاز نادیده گرفته می‌شود.

۳- PCM و شبکه متخلخل آلومینیومی در تعادل گرمایی محلی فرض شده‌اند [۱۶].

۴- شبکه فلزی متخلخل، به صورت ایزوتروپیک، ساختاریافته و همگن فرض می‌شود.

۵- PCM مایع به صورت آرام، ناپایا، نیوتنی، ایزوتروپیک و غیرقابل تراکم در نظر گرفته شده و از تقریب بوزینسک برای

جمله شناوری، پیروی می‌کند؛

۶- اثر اتلاف ویسکوزیته و تابش گرمایی نادیده گرفته می‌شود.

۷- تکنیک آنتالپی-تخلخل برای شبیه‌سازی فرآیند ذوب استفاده شده است [۱۷].

با توجه به فرضیات مذکور، معادلات پیوستگی، مومنتم، و انرژی برای شبکه متخلخل فلزی پر شده با PCM، به صورت زیر ارائه می‌شوند [۱۶، ۱۸، ۱۹]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم

مدل‌های گوناگونی برای معادله مومنتوم در محیط تخلخل ارائه شده است. در مطالعه حاضر، مدل توسعه یافته داریسی - برینکمن - فورچهمر [۲۰] که به طور کامل اثرات اینرسی را در نظر می‌گیرد، اتخاذ شده است. بنابراین، معادلات مومنتوم در امتداد محورهای x و y به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\phi} \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{1}{\phi^2} \left[U \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + V \frac{\partial(\rho U)}{\partial y} \right] \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial y} \right) + S_x + S'_x \\ + \rho g \beta (T - T_f) \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\phi} \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{1}{\phi^2} \left[U \frac{\partial(\rho V)}{\partial x} + V \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} \right] \\ = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) + S_y + S'_y \\ + \rho g \beta (T - T_f) \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن S و S' به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S_x = \frac{(1 - \xi)^2}{\xi^3 + \delta} A_{msh} U, S_y = \frac{(1 - \xi)^2}{\xi^3 + \delta} A_{msh} V \quad (4)$$

$$S'_x = \left(\frac{\mu}{\kappa} + \frac{\rho \epsilon |U|}{\sqrt{\kappa}} \right) U, S'_y = \left(\frac{\mu}{\kappa} + \frac{\rho \epsilon |U|}{\sqrt{\kappa}} \right) V \quad (5)$$

جملات چشمه در معادله (۴) مربوط به منطقه نیمه جامد است، جایی که PCM تغییر فاز را تجربه می‌کند. δ مقداری بسیار کوچک، برابر 10^{-3} در نظر گرفته می‌شود تا از هرگونه تقسیم بر صفر جلوگیری شود. A_{msh} نمایانگر ثابت منطقه نیمه جامد است و ξ کسر حجمی فاز مایع را نشان می‌دهد. مقدار A_{msh} برابر با 10^8 و ثابت فرض می‌شود تا تطابق خوبی میان نتایج محاسباتی و تجربی برای انتقال گرما ماده تغییر فاز دهنده در محیط متخلخل حاصل شود [۱۶]. عبارات چشمه در معادله (۵)، اثرات داریسی و برینکمن - فورچهمر را نشان می‌دهند، که در آن ϵ ، ضریب اینرسی و κ ، نفوذپذیری^۱ محیط متخلخل است.

معادله‌ای که کسر حجمی فاز مایع را به دما مرتبط می‌کند برای حل معادله انرژی استفاده می‌شود و به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۱]:

$$\xi = \begin{cases} 0 & \text{اگر } T < T_{std} \\ \frac{T - T_{std}}{T_{liq} - T_{std}} & \text{اگر } T_{std} \leq T \leq T_{liq} \\ 1 & \text{اگر } T > T_{liq} \end{cases} \quad (6)$$

¹ Permeability

فلزی پُر شده با PCM، پارامترهای حیاتی برای مدل‌سازی دقیق انتقال گرما و تغییر فاز در این مواد هستند. روابط تحلیلی و تجربی متعددی بر اساس ساختار شبکه‌های فلزی توسعه یافته‌اند. برخی مقالات پژوهشی خلاصه‌ای از روابط موجود برای رسانایی گرمایی مؤثر را ارائه داده‌اند [۲۴، ۱۹]. در مطالعه حاضر، مدلی برای پارامترهای مؤثر انتخاب شده است که تطابق بسیار خوبی میان نتایج عددی و داده‌های تجربی ارائه شده در مرجع [۱۵] حاصل می‌کند. روابط مربوط به رسانایی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$(\rho C_p)_{eff} = \phi(\rho C_p)_{PCM} + (1 - \phi)(\rho C_p)_{Mtlf} \quad (11)$$

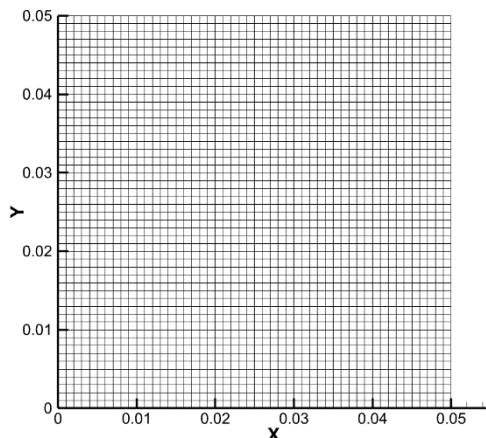
$$k_{eff} = \phi k_{PCM} + (1 - \phi)k_{Mtlf} \quad (12)$$

که در آن $0 < \phi < 1$ است.

۴- حل عددی و بررسی استقلال از گام زمانی و تعداد

گره محاسباتی

شکل ۳، بررسی استقلال از شبکه را نشان می‌دهد. شبکه‌های محاسباتی ساختاریافته دارای توزیع یکنواخت با تعداد سلول ۴۹۰۰، ۳۶۰۰، ۲۵۰۰ و ۱۶۰۰، تولید و تغییرات زمانی کسر حجمی فاز مایع و همچنین حداکثر دمای دیواره گرم، مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که شبکه با تعداد سلول ۳۶۰۰ (شکل ۲) جواب‌های قابل قبول و در عین حال تعداد حداقل سلول محاسباتی را داراست. علاوه بر این، در شکل ۴، استقلال از گام زمانی بررسی و گام زمانی برابر ۰/۴ ثانیه، انتخاب شده است.



شکل ۲: شبکه محاسباتی با ۳۶۰۰ سلول

شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent صورت گرفته است. این نرم‌افزار از روش حجم محدود بهره می‌گیرد. به منظور

مدل‌ها و روابط موجود برای پیش‌بینی نفوذپذیری شبکه متخلخل فلزی محدود هستند. در واقع، به دلیل توزیع فضایی پیچیده اتصالات شبکه فلزی، پیش‌بینی نفوذپذیری دشوار است. در مطالعه حاضر، نفوذپذیری شبکه متخلخل، با استفاده از رابطه تجربی پرکاربرد ارائه شده در مرجع [۲۲] مدل‌سازی می‌شود. این رابطه به صورت زیر قابل بیان است:

$$\kappa = 0.00073 d_p^2 (1 - \phi)^{-0.224} \left(\frac{d_{Mtlf}}{d_p} \right)^{-1.11} \quad (7)$$

مقاومتی که در برابر حرکت سیال، توسط شبکه متخلخل، به دلیل مسیرهای پیچیده و نامنظم ایجاد می‌گردد، به‌عنوان اثر اینرسی شناخته می‌شود. این اثر با افزایش سرعت PCM مایع بیشتر می‌شود. ضریب اینرسی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\epsilon = 0.00212 (1 - \phi)^{-0.132} \left(\frac{d_{Mtlf}}{d_p} \right)^{-1.63} \quad (8)$$

که در آن d_p قطر حفره و d_{Mtlf} قطر الیاف شبکه متخلخل هستند و آن‌ها را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\begin{cases} d_p = \frac{0.0254}{\omega} \\ \frac{d_{Mtlf}}{d_p} = 1.18 \left(\frac{1 - \phi}{3\pi} \right)^{0.5} \left[1 - \exp \left(\frac{\phi - 1}{0.04} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

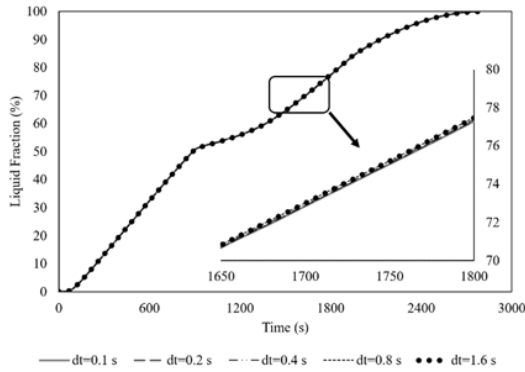
که در آن ω ، تعداد حفره‌های متخلخل در اینچ (PPI) است.

معادله انرژی:

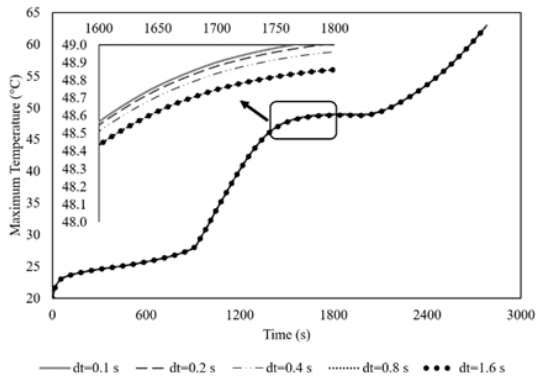
تعداد گرمایی محلی بین شبکه متخلخل فلزی و PCM فرض شده است. بنابراین، معادله انرژی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۳]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial ((\rho C_p)_{eff} T)}{\partial t} + \frac{\partial ((\rho C_p)_{eff} UT)}{\partial x} + \frac{\partial ((\rho C_p)_{eff} VT)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (\phi \rho_{PCM} \xi L_f)}{\partial t} \end{aligned} \quad (10)$$

در اینجا، L_f ، k_{eff} و $(\rho C_p)_{eff}$ به ترتیب بیانگر گرمای نهان ذوب/انجماد PCM و پارامترهای ترموفیزیکی مؤثر شبکه متخلخل فلزی پُر شده با PCM هستند. خواص ترموفیزیکی مؤثر شبکه متخلخل



(الف)



(ب)

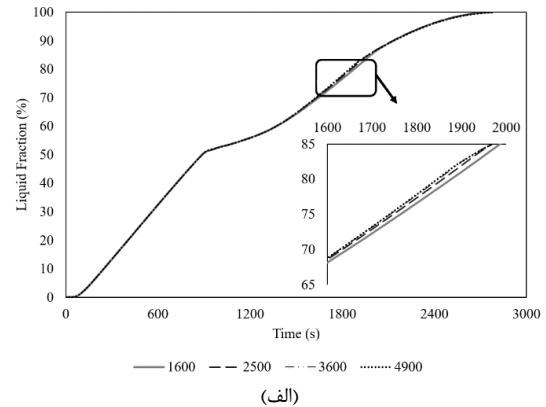
شکل ۴: بررسی استقلال از گام زمانی (الف) تغییرات زمانی کسر حجمی فاز مایع (ب) تغییرات زمانی حداکثر دمای دیواره گرمکن

۵- اعتبارسنجی نتایج

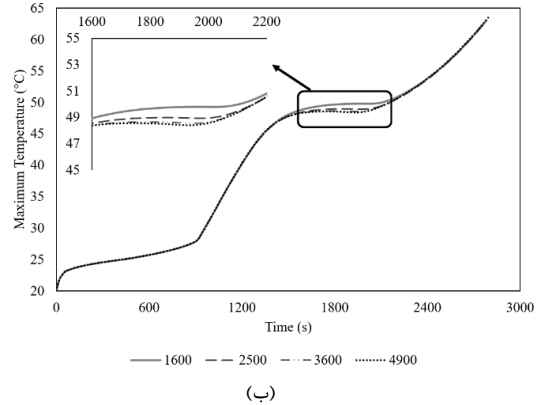
به منظور ارزیابی صحت نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر، نتایج این پژوهش با نتایج گزارش شده در مطالعه تجربی الجتلاح^۳ و همکاران [۱۵] و مطالعه عددی یاچاچنه^۴ و همکاران [۲۲] مقایسه شده است. در این پژوهش‌ها، فرآیند تغییر فاز روغن نارگیل، درون شبکه متخلخل آلومینیومی بررسی شده است. ابعاد حفره مستطیلی به صورت دوعبده، برابر با $5 \text{ cm} \times 7/2 \text{ cm}$ بوده است. دیواره عمودی تحت شارهای گرمایی 1814 W/m^2 و 2835 W/m^2 قرار گرفته و سایر دیواره‌ها، آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند. شبکه فلزی دارای تخلخل 0.92 و تراکم حفره ΔPPI است.

شکل ۵ تغییرات کسر حجمی مذاب (فاز مایع)، روغن نارگیل خالص را در دو حالت، با شارهای گرمایی متفاوت نشان می‌دهد.

تعیین خواص محیط متخلخل، از تابع‌نویسی در نرم‌افزار MS Excel استفاده شده است. روش فشار-مبنا^۱ برای حل معادلات حاکم استفاده گردید. برای حل معادلات مومنتوم و انرژی از روش بالادست مرتبه اول و برای معادله تصحیح فشار از روش PRESTO! استفاده شده به‌منظور کوپل معادلات فشار-سرعت از روش PISO بهره گرفته شده است. ضرایب تخفیف^۲ برای مؤلفه‌های سرعت، تصحیح فشار و انرژی به ترتیب 0.7 ، 0.3 و 1 در نظر گرفته شدند. معیارهای همگرایی برای معادلات بقای جرم و مومنتوم 10^{-3} و برای معادله انرژی 10^{-6} تنظیم شدند.



(الف)



(ب)

شکل ۳: بررسی استقلال از شبکه محاسباتی (الف) تغییرات زمانی کسر حجمی فاز مایع (ب) تغییرات زمانی حداکثر دمای دیواره گرمکن

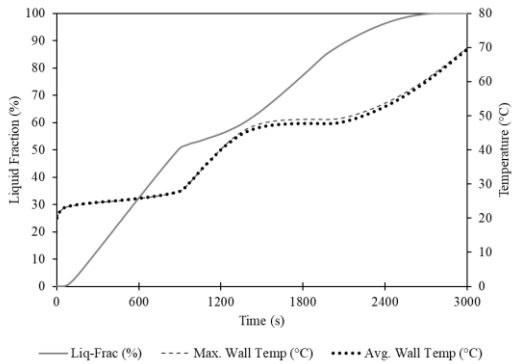
³ Al-jethelah

⁴ Iachachene

¹ Pressure-based

² Relaxation factors

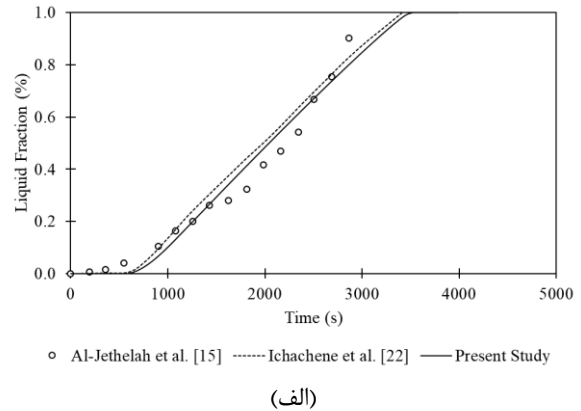
تمام ماده تغییرفازدهنده، ترسیم شده است. برای حالت پایه، حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم و دمای میانگین، برابر $1/31^{\circ}\text{C}$ بوده که بین ثانیه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۸۰ رخ داده است. در این حالت، زمان لازم برای ذوب تمام ماده تغییرفازدهنده درون محفظه برابر ۲۷۸۰ ثانیه است.



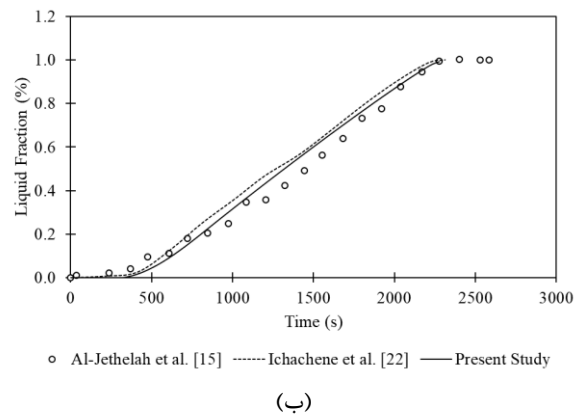
شکل ۶: تغییرات کسر حجمی فاز مایع، دمای حداکثر و دمای میانگین دیواره گرم در طول زمان تا ذوب تمام ماده تغییرفاز دهنده برای حالت پایه

در شکل ۷، سه لحظه از فرآیند ذوب، لحظات ابتدایی، لحظات میانی و لحظات پایانی به تصویر کشیده شده است. این لحظات نقاط تغییر شیب دمای ماکزیمم نمودار شکل ۶ نیز هستند. در لحظات ابتدایی، انتقال گرما، بیشتر بر اساس مکانیزم رسانش رخ می‌دهد اما رفته‌رفته با گسترش جبهه مذاب، مکانیزم همرفت قالب شده و انتقال گرما و در نتیجه سرعت فرآیند ذوب افزایش می‌یابد. در لحظات پایانی فرآیند ذوب، با توجه به اینکه فاز جامد در پایین محفظه قرار گرفته است، دوباره، رسانش گرمایی نقش بیشتری ایفا می‌کند. بر این اساس، با مقایسه شکل ۶ و شکل ۷، تغییرات شیب خط کسر حجمی مذاب در طول زمان قابل توجیح است. بر اساس نتایج این بخش، لازم است محل قرارگیری شبکه فلزی متخلخل، مورد مطالعه قرار گیرد زیرا محیط متخلخل تأثیرات گوناگونی بر روند انتقال گرما دارد. از یک‌سو، این شبکه فلزی دارای نقش پُل گرمایی است و همچنین مقدار جرم ماده تغییرفازدهنده را در آن ناحیه کمتر می‌کند و از سوی دیگر، وجود شبکه متخلخل فلزی می‌تواند منجر به یکنواخت‌تر شدن توزیع دما در آن ناحیه گردد. اما محیط متخلخل، تضعیف‌کننده مکانیزم همرفت نیز هست. لذا اگر محیط متخلخل در نزدیکی دیواره گرم باشد، می‌تواند منجر به کاهش دمای حداکثر دیواره گردد و اما اگر ناحیه پایینی محفظه را پوشش دهد، منجر به کاهش جرم ماده تغییرفازدهنده در آن ناحیه و در نتیجه کوتاه‌تر شدن زمان کل فرآیند ذوب می‌گردد. بنابراین در بخش بعد به بررسی اثر محل قرارگیری شبکه فلزی متخلخل، اعم از چپ، بالا، راست و پایین پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که هدف، ذوب تمام ماده تغییرفازدهنده در محفظه است.

مشاهده می‌شود که نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج مراجع [۱۵] و [۲۲] مطابقت خوبی دارد.



(الف)



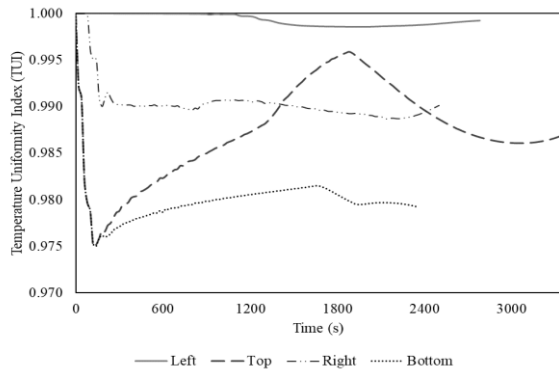
(ب)

شکل ۵: مقایسه تغییرات زمانی کسر حجمی فاز مایع حاصل از شبیه‌سازی پژوهش حاضر با مراجع [۲۲] و [۱۵] (الف) به‌ازای شار 1814 W/m^2 و (ب) به‌ازای شار 2835 W/m^2

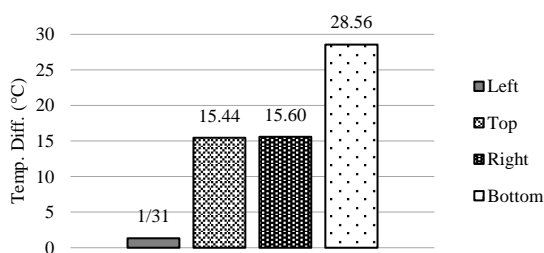
۶- نتایج

۶-۱- بررسی حالت پایه

به منظور مقایسه اثر پارامترهای مختلف، هندسه‌ای دوبعدی با مشخصات $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ، شار دیواره گرم (دیواره سمت چپ محفظه) برابر 3000 W/m^2 ، تخلخل $\phi = 0/9$ با $\text{PPI} = 10$ و محل قرارگیری شبکه فلزی متخلخل در سمت چپ، به عنوان حالت پایه در نظر گرفته شده است. در محفظه‌های با دیواره شار ثابت، تمام دیواره گرم، دارای توزیع دمای یکسانی نیست لذا چنانچه از ماده تغییرفازدهنده به عنوان سیال خنک‌کاری استفاده شود (مانند چاه گرمایی برای CPU [۲۵] یا لپ‌تاپ [۲۶])، دمای برخی از نقاط دیواره گرم می‌تواند از حد مجاز فراتر روند. در این پژوهش، مطابق شکل ۶، دمای میانگین دیواره گرم و دمای ماکزیمم آن در طول زمان، تا ذوب

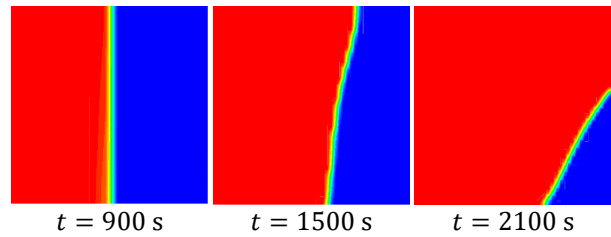
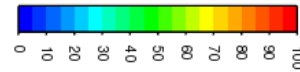


شکل ۸: تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) به ازای مکان‌های مختلف قرارگیری محیط متخلخل در طول زمان



شکل ۹: حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای به ازای مکان‌های مختلف قرارگیری محیط متخلخل

چنانچه محیط متخلخل نزدیک به دیواره شار ثابت (سمت چپ) باشد، مقدار TUI تقریباً ثابت و نزدیک به ۱ است، به این معنی که توزیع دما در این ناحیه در طول زمان، تقریباً یکنواخت باقی مانده است. موقعیت بالا برای محیط متخلخل، بیشترین تغییرات در TUI را نشان می‌دهد. ابتدا کاهش داشته و سپس روند افزایشی داشته است. همچنین زمان ذوب نیز به شدت افزایش یافته است. حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای، در این حالت مقدار متوسط را در بین این چهار حالت داشته و برابر ۱۵/۴۴ درجه سانتی‌گراد است. موقعیت راست برای محیط متخلخل، تغییرات متوسطی در TUI دارد و نسبت به دیواره بالا یکنواخت‌تر باقی می‌ماند. موقعیت پایین و بالا، کمترین مقدار TUI را در کل زمان‌ها دارند، اما موقعیت بالا، این غیریکنواختی را در طول زمان جبران می‌کند در عوض موقعیت پایین، کمترین زمان ذوب را دارد اما طبق بیشترین حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم و دمای میانگین را داراست.



شکل ۷: کانتور کسر حجمی مذاب در سه زمان مختلف برای حالت پایه

۲-۶- بررسی اثرات محل قرارگیری شبکه فلزی متخلخل

نیمی از هندسه دارای شبکه فلزی متخلخل پُر شده از ماده تغییرفازدهنده و نیمی دیگر تماماً از ماده تغییرفازدهنده پُر شده است. برای آنکه جرم ماده تغییرفازدهنده در تمامی موارد ثابت بماند، شبکه فلزی در تمامی حالات، دارای تخلخل ۰/۹۰ است. در این قسمت به بررسی اثرات محل قرارگیری شبکه فلزی، اعم از چپ (نزدیک به دیواره گرم)، بالا، پایین و راست پرداخته شده است. یکی از ملاک‌های عملکرد مطلوب محیط متخلخل در این پژوهش، بر اساس هرچه یکنواخت‌تر بودن توزیع دما در دیواره گرم با شار ثابت است. برای این منظور "شاخص یکنواختی توزیع دما" به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$TUI = 1 - \frac{\int_A |T - T_{avg}| dA}{\int_A T_{avg} dA} \quad (13)$$

لذا هرچه این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، توزیع دما یکنواخت‌تر و عملکرد محیط متخلخل در این زمینه مطلوب‌تر است.

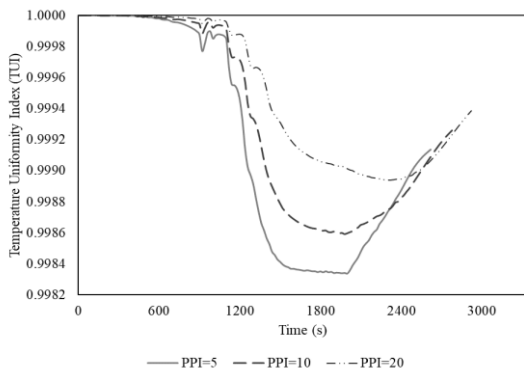
شکل ۸ تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) را به ازای مکان‌های مختلف قرارگیری محیط متخلخل، اعم از چپ، بالا، راست و پایین، در طول زمان، تا ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده، نشان می‌دهد. در شکل ۹، تأثیر محل قرارگیری محیط متخلخل بر روی حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای دیواره گرم، بررسی شده است.

¹ Temperature Uniformity Index

شکل ۱۰، کانتور توزیع دما (°C) و خطوط تابع جریان را به‌ازای مکان قرارگیری مختلف شبکه متخلخل، در زمانی نشان می‌دهد که شاخص TUI دارای حداقل مقدار خود است. این زمان به‌ازای محل قرارگیری چپ، بالا، راست و پایین به‌ترتیب ثانیه ۱۹۴۰، ۱۶۰، ۸۰۰ و ۲۳۰۰ است. از آن‌جایی که محل قرارگیری پایین در زمان دیرتری به TUI حداقل رسیده است، دمای دیواره بیشترین مقدار را داراست.

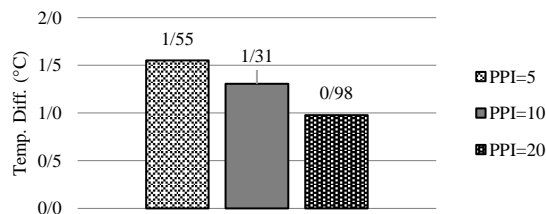
۶-۳- بررسی اثرات تعداد حفره‌های متخلخل در اینچ (PPI)

در این بخش به اثرات تغییر PPI پرداخته می‌شود. هندسه همان هندسه حالت پایه است اما در این بخش افزایش و کاهش دوبرابری PPI، نسبت به نمونه شاهد، بررسی شده است. شکل ۱۱ به بررسی این عامل بر روی TUI می‌پردازد.

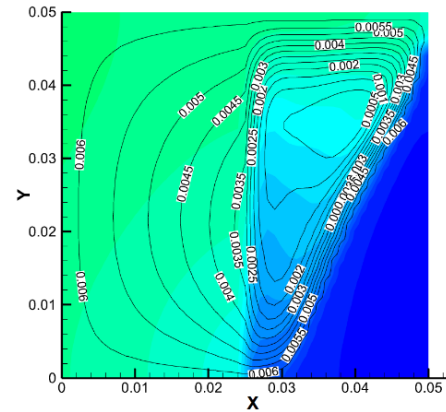


شکل ۱۱: تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) به ازای PPI مختلف در طول زمان

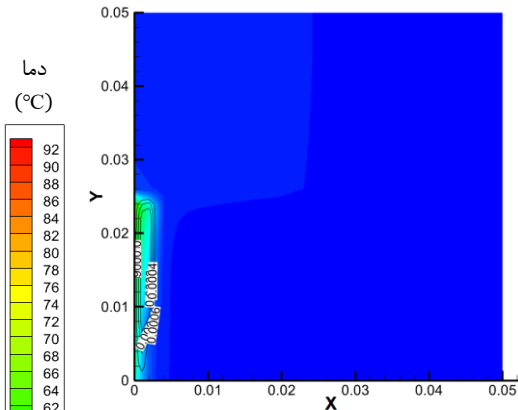
مشهود است با افزایش PPI، شاخص یکنواختی دما بیشتر می‌شود اما از طرفی زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرافزاینده افزایش می‌یابد که مطلوب نیست. علت را می‌توان در تضعیف مکانیزم همرفت با افزایش PPI دانست. همچنین بر اساس شکل ۱۲، با افزایش PPI، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای، کاهش می‌یابد زیرا عملکرد محیط متخلخل به عنوان پل گرمایی، با افزایش PPI، تقویت می‌شود.



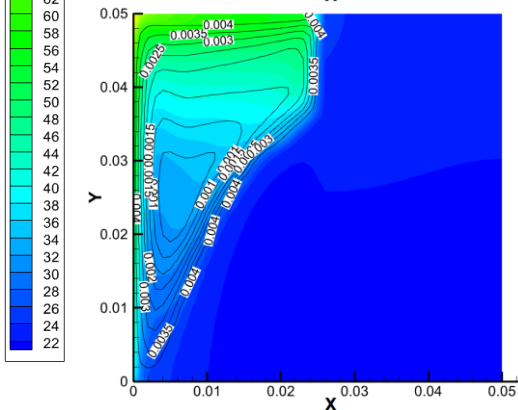
شکل ۱۲: حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای به ازای PPI مختلف



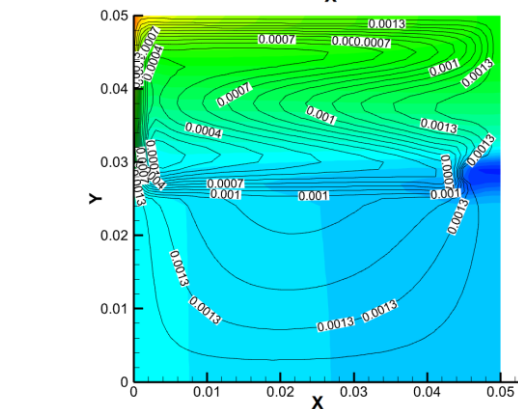
چپ (ثانیه ۱۹۴۰)



بالا (ثانیه ۱۶۰)



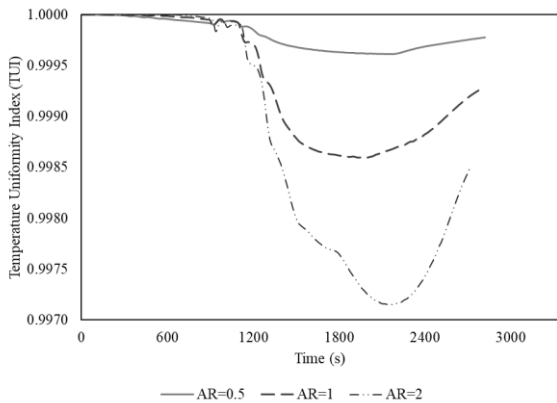
راست (ثانیه ۸۰۰)



پایین (ثانیه ۲۳۰۰)

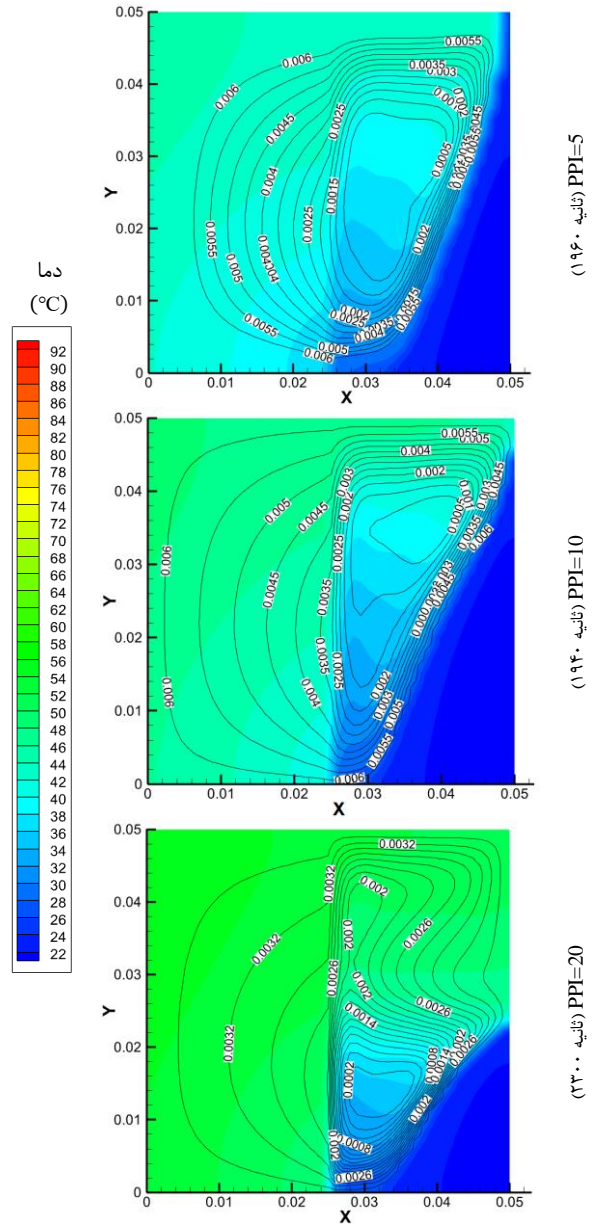
شکل ۱۰: کانتور توزیع دما (°C) و خطوط تابع جریان به‌ازای کمترین TUI برای مکان‌های قرارگیری مختلف شبکه متخلخل

با حالت پایه یکسان باشد، ابعاد محفظه با نسبت منظری ۲ و ۰/۵ به ترتیب برابر $۷/۰۷۱۱ \text{ cm} \times ۳/۵۳۵۵ \text{ cm}$ و $۷/۰۷۱۱ \text{ cm} \times ۳/۵۳۵۵ \text{ cm}$ در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به تغییر ابعاد دیواره گرم در دو نسبت منظری مختلف، برای یکسان بودن نرخ گرمای ورودی به سیستم، شار گرمایی برای نسبت منظری ۰/۵ و ۲، به ترتیب $۳۰۰۰ \times \sqrt{۲} \text{ W/m}^2$ و $۳۰۰۰/\sqrt{۲} \text{ W/m}^2$ اعمال شده است.



شکل ۱۴: تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) به ازای نسبت منظری مختلف در طول زمان

در شکل ۱۴، مشهود است با افزایش AR، شاخص یکنواختی دما کمتر می شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییر فزاینده تغییر چندانی نمی کند. همچنین بر اساس شکل ۱۵، با افزایش AR، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه ای، افزایش می یابد. با افزایش AR، طول دیواره گرم بیشتر می شود. از طرفی، مکانیزم مهم انتقال گرما از دیواره (خنک کاری آن) جابجایی آزاد است. لذا با افزایش AR، اختلاف ضخامت لایه مرزی بین بالا و پایین دیواره بیشتر گردیده لذا مقاومت حرارتی در نزدیک دیواره بیشتر شده پس با توجه شار ثابت بودن دیواره، اختلاف دمای آن بیشتر می گردد و شاخص TUI کاهش می یابد. در تأیید این مطلب با مراجعه به شکل ۱۴، از زمانی که مکانیزم جابجایی اطراف دیواره، فعال تر می گردد (حدود ثانیه ۱۲۰۰ به بعد) اختلاف بین شاخص های TUI برای نسبت منظری های مختلف، بیشتر می شود. در مجموع میزان گرمای ورودی ثابت است (تغییر شار گرمایی متناسب با تغییر مساحت دیواره) بنابراین، نرخ کلی انتقال حرارت به PCM چندان تغییر نکرده و زمان لازم برای ذوب کامل تقریباً ثابت می ماند.

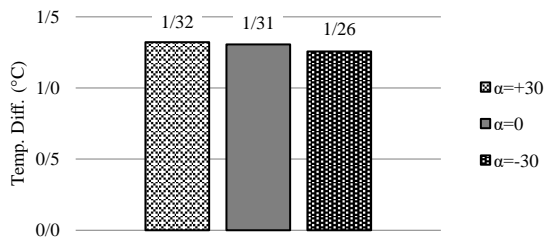


شکل ۱۳: کانتور توزیع دما (°C) و خطوط تابع جریان به ازای کمترین TUI برای محل مقادیر مختلف PPI

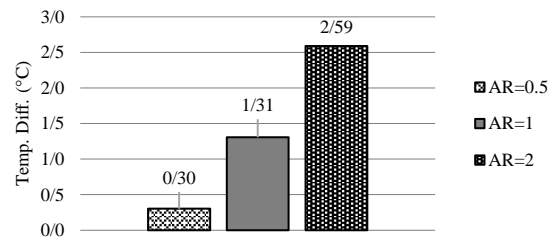
شکل ۱۳، کانتور توزیع دما (°C) و خطوط تابع جریان را به ازای مقادیر مختلف PPI، در زمانی نشان می دهد که شاخص TUI دارای حداقل مقدار خود است. این زمان به ازای PPI برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ به ترتیب ثانیه ۱۹۶۰، ۱۹۴۰ و ۲۳۰۰ است. از آنجایی که مورد با PPI=20 در زمان دیرتری به TUI حداقل رسیده است، دمای دیواره بیشترین مقدار را داراست و جبهه مذاب بیشترین پیشروی را داشته است.

۶-۴- بررسی اثرات نسبت منظری محفظه

نسبت منظری (AR) به صورت حاصل تقسیم ارتفاع محفظه به طول ضلع دیگر، تعریف می گردد. برای آنکه جرم داخل محفظه در مقایسه



شکل ۱۷: حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای به ازای زاوایای صفر، +۳۰ و -۳۰- محفظه نسبت به افق



شکل ۱۵: حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای به ازای نسبت منظری مختلف

۶-۶-۱- بهینه‌یابی به کمک روش تاگوچی

از آنجایی که برخی از پارامترهای بررسی شده در بخش‌های قبل، دارای اثر دوگانه بودند، یعنی برخی از آن‌ها به‌طور همزمان باعث افزایش/کاهش زمان ذوب و شاخص یکنواختی دما می‌شدند و از طرفی حالات ترکیبی آن‌ها می‌تواند منجر به نتایج جدید شود، لذا برای یافتن مورد بهینه از بین ترکیب $۸۱ = ۳^۴$ حالت موجود، از روش تاگوچی بهره جسته شده است. هدف، کاهش زمان ذوب کل ماده تغییرفازدهنده و در عین حال یکنواخت نگه‌داشتن توزیع دما در دیواره گرم شار ثابت است. از آنجایی نتایج بخش‌های قبل نشان داد که کاهش حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم با دمای میانگین لحظه‌ای با شاخص توزیع یکنواخت دما، رابطه‌ای مستقیم دارد، به جای TUI، حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم با دمای میانگین لحظه‌ای به عنوان دومین شاخص انتخاب شده است. بدین منظور زمان‌ها به صورت $\tau = t/3600$ ، نُرمال شده و اختلاف دماها بر حسب کلون به صورت $\theta = \Delta T_{max}/T_0$ نُرمال شده‌اند که در آن ΔT ، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای و T_0 دمای اولیه بر حسب کلون است. بنابراین هدف، کمینه‌کردن حاصل $\theta \times \tau$ خواهد بود.

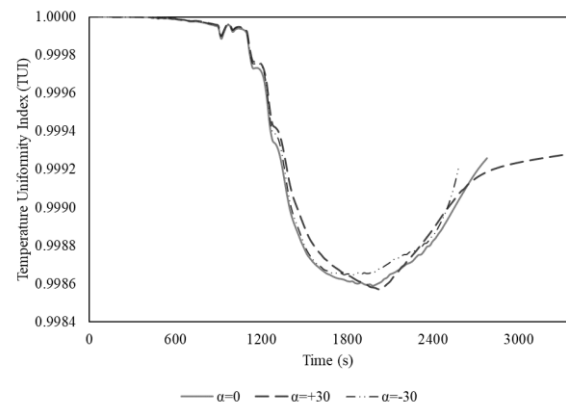
روش تاگوچی، یک تکنیک طراحی آزمایش است که به‌طور سیستماتیک تأثیر عوامل مختلف و سطوح آن‌ها را بر یک خروجی (پاسخ) بررسی می‌کند. این روش از نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای تحلیل عملکرد تحت شرایط مختلف استفاده می‌کند و با استفاده از آرایه‌های متعامد، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز را کاهش می‌دهد. رابطه S/N بسته به هدف آزمایش (کوچکتر بهتر، بزرگتر بهتر، اسمی بهترین است)، تغییر می‌کند. با توجه به توضیحات فوق، در پژوهش حاضر، رویکرد "کوچکتر بهتر" انتخاب شده است. لذا داریم [۲۷]:

$$S/N = -10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (14)$$

۶-۶-۲- بررسی اثرات زاویه محفظه نسبت به افق

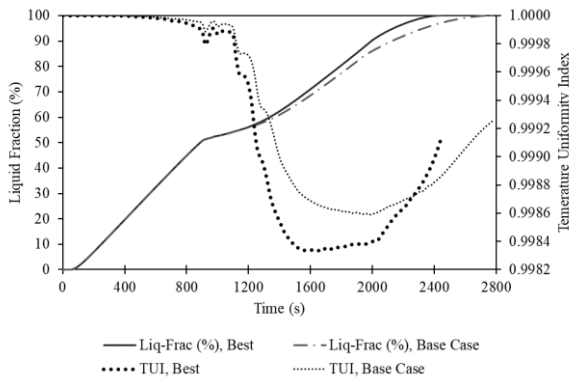
در این پژوهش، زاویه نسبت به افق (α) چنانچه ساعتگرد باشد، مثبت، و چنانچه پادساعتگرد باشد، منفی بیان می‌گردد. اثرات تغییر زاویه صفر درجه، +۳۰° و -۳۰° نسبت به افق مطالعه شده است.

بر اساس شکل ۱۶، تغییر زاویه تأثیر بسزایی بر شاخص یکنواختی توزیع دما ندارد اما بر زمان ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده بسیار مؤثر است به‌طوری که زمان ذوب کامل به ازای زاویه $\alpha = -30^\circ$ حدود ۴۰٪ کمتر نسبت به زاویه $\alpha = +30^\circ$ است. علت این امر، زودتر فعال شدن مکانیزم جابجایی آزاد و تقویت این مکانیزم در طول مدت ذوب به‌ازای $\alpha = -30^\circ$ است. با توجه به شکل ۱۷، تغییر زاویه محفظه نسبت به افق، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای را تغییر چشمگیری نمی‌دهد با این حال باز هم این اختلاف، به ازای زاویه $\alpha = -30^\circ$ از دو مورد دیگر کمتر است. شاخص TUI بیشتر تحت تأثیر ضخامت لایه مرزی اطراف دیواره (مقاومت حرارتی) و شار دیواره است. با توجه به اینکه این دو مورد با تغییر زاویه، چندان تغییر نمی‌کنند لذا شاخص TUI به α وابستگی اندکی دارد.



شکل ۱۶: تغییرات شاخص یکنواختی توزیع دما (TUI) به ازای زاوایای صفر، +۳۰ و -۳۰- محفظه نسبت به افق در طول زمان

نسبت منظری برابر یک و زاویه نسبت به افق برابر $\alpha = -30^\circ$ باشد. با توجه به اینکه مورد فوق در ۹ مورد جدول روش تاگوچی نبود، برای بررسی صحت، این مورد شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در این حالت زمان لازم برای ذوب کل ماده تغییرنازدهنده برابر ۲۴۴۰ ثانیه و حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای برابر $1/56^\circ\text{C}$ است لذا مقدار تابع هدف برای این مورد برابر $\theta \times \tau = 0.6351$ است که کمترین مقدار در بین تمامی موارد شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱۹: مقایسه تغییرات کسر حجمی فاز مایع و شاخص یکنواختی توزیع دما در طول زمان برای نمونه بهینه و حالت پایه

شکل ۱۹، تغییرات کسر حجمی فاز مایع و شاخص یکنواختی توزیع دما را در طول زمان برای نمونه بهینه و نمونه شاهد نشان می‌دهد. در این حالت TUI نسبت به حالت پایه، کمتر از 0.03% بدتر شده اما زمان ذوب $13/9\%$ کاهش یافته است. تا حدود ثانیه ۱۲۰۰، عملکرد هر دو مورد چه از نظر کسر حجمی مایع و چه از منظر TUI، مشابه است. حالت پایه حوالی ثانیه ۱۹۸۰ و مورد بهینه حوالی ثانیه ۱۶۶۰ کمترین مقدار TUI را دارد.

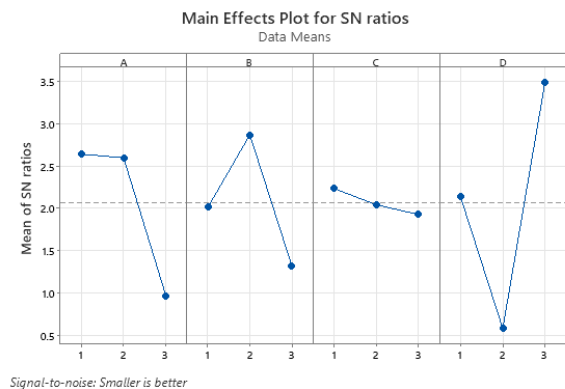
در شکل ۲۰، برای این دو لحظه مذکور، توزیع دما، تابع جریان و کسر حجمی مایع بین حالت پایه و مورد بهینه مقایسه شده است. مشاهده می‌شود در مورد بهینه، با اینکه زمان کمتری گذشته است اما مکانیزم همرفت قدرت بیشتری دارد لذا این امر موجب اختلاط بهتر و در نتیجه کاهش TUI و حتی کاهش دمای کل فاز مایع و دیواره شده است. این نتیجه در نمودار شکل ۲۱، کاملاً مشهود است

که در آن γ_i مقدار پاسخ در تکرار i و n تعداد آزمایش‌ها برای هر سطح است.

جدول ۲: سطوح مختلف متغیرهای مورد مطالعه برای روش تاگوچی برای آنالیز L9 و مقادیر تابع هدف

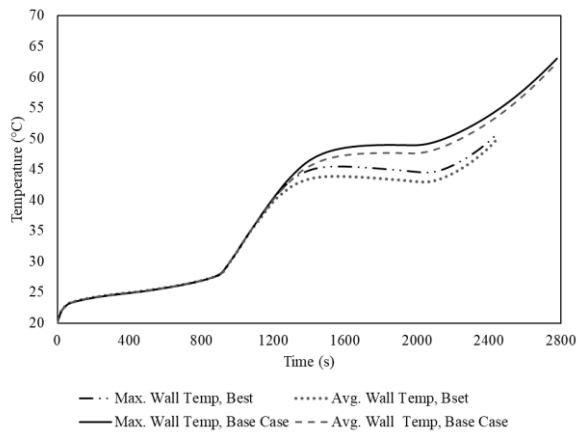
ردیف	محل محیط متخلخل	PPI	AR	α	$\tau \times \theta$
۱	چپ	۱۰	۱	صفر	۰/۷۲۳۰
۲	چپ	۵	۲	+۳۰	۰/۸۰۱۳
۳	چپ	۲۰	۰/۵	-۳۰	۰/۶۹۳۹
۴	راست	۱۰	۲	-۳۰	۰/۶۳۵۷
۵	راست	۵	۰/۵	صفر	۰/۶۸۲۲
۶	راست	۲۰	۱	+۳۰	۰/۹۴۰۷
۷	بالا	۱۰	۰/۵	+۳۰	۱/۰۸۶۰
۸	بالا	۵	۱	-۳۰	۰/۶۷۹۶
۹	بالا	۲۰	۲	صفر	۰/۹۶۹۹

جدول ۲ سطوح مختلف متغیرهای مورد مطالعه را برای روش تاگوچی برای آنالیز L9 را به همراه مقادیر تابع هدف ($\tau \times \theta$) نشان می‌دهد. لازم به ذکر است بر اساس آنچه که در بخش‌های پیشین بیان شد، چنانچه محیط متخلخل در پایین محفظه باشد، نه از نظر زمان کل ذوب ماده تغییرنازدهنده و نه از منظر حداکثر اختلاف دمای ماکزیمم با دمای میانگین لحظه‌ای، عملکرد مناسبی را به دست نمی‌دهد لذا به علت محدودیت روش تاگوچی و به منظور برابری سطوح تمام متغیرها، سطح محل قرارگیری پایین محیط متخلخل، در مطالعه با روش تاگوچی در نظر گرفته نشده است.



شکل ۱۸: مقادیر نسبت سیگنال به نویز

بر اساس نتایج مندرج در شکل ۱۸، روش تاگوچی موردی را که از منظر کاهش زمان ذوب کل ماده تغییرنازدهنده و کمینه حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای باشد، حالتی می‌داند که محیط متخلخل در سمت چپ محفظه بوده، $PPI=5$ ،



شکل ۲۱: مقایسه تغییرات کسر دمای ماکزیمم و دمای میانگین دیواره گرم در طول زمان برای نمونه بهینه و حالت پایه

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر ویژگی‌های شبکه نیمه‌متخلخل فلزی بر نرخ ذوب ماده تغییرفازدهنده و یکنواختی دمای دیواره، به روش عددی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. خلاصه نتایج عبارتند از:

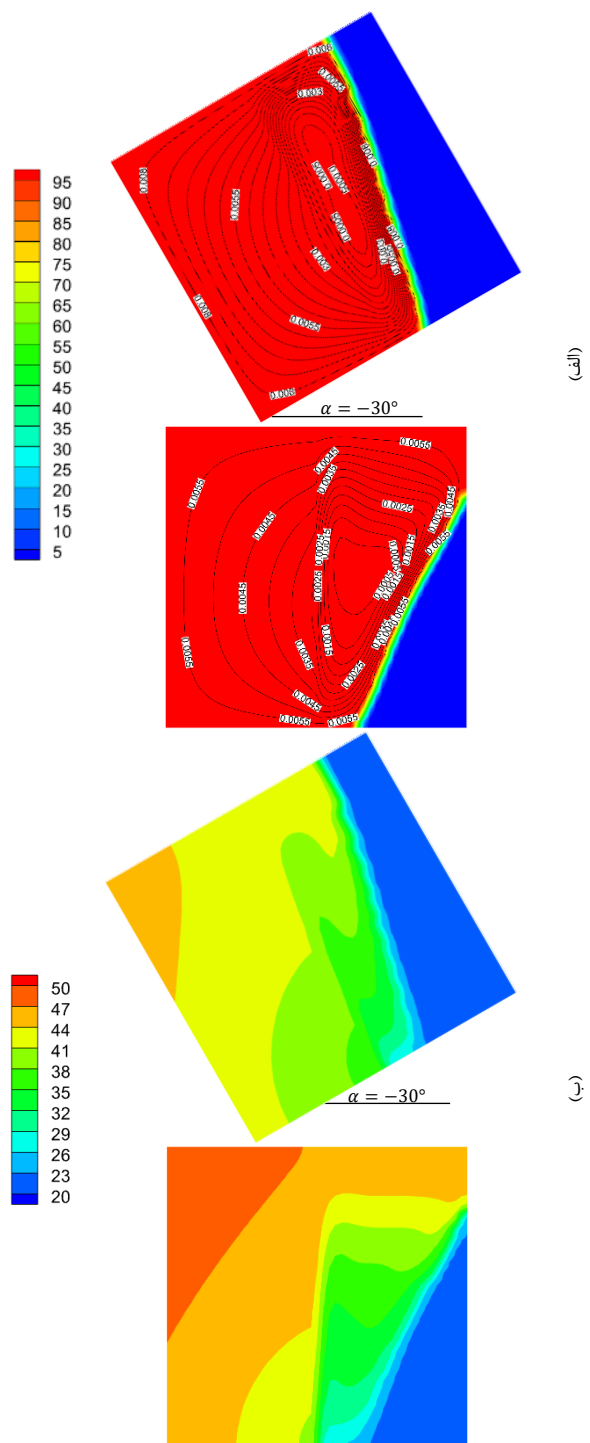
۱- از منظر محل قرارگیری محیط متخلخل، چنانچه این شبکه فلزی در پایین محفظه باشد، از نظر TUI بدترین عملکرد را دارد اما از نظر زمان ذوب، نسبت به بقیه محل‌های قرارگیری کمترین زمان را داراست. چنانچه محیط متخلخل سمت بالای محفظه باشد، بیشترین بازه تغییر TUI و زمان ذوب را شاهد خواهیم بود.

۲- با افزایش PPI، شاخص یکنواختی دما بیشتر می‌شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش PPI، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای، کاهش می‌یابد.

۳- با افزایش AR، شاخص یکنواختی دما کمتر می‌شود اما زمان لازم برای ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین با افزایش AR، حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای، افزایش می‌یابد.

۴- تغییر زاویه تأثیر بسزایی بر شاخص یکنواختی توزیع دما ندارد اما بر زمان ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده بسیار مؤثر است.

۵- بر اساس روش تاگوچی، مورد بهینه از منظر کاهش زمان ذوب کل ماده تغییرفازدهنده و کمینه TUI، حالتی است که محیط متخلخل در سمت چپ محفظه بوده (نزدیک به دیواره گرم)، $PPI=5$ ، نسبت منظری برابر یک و زاویه نسبت به افق برابر $\alpha = -30^\circ$ باشد. در این حالت زمان لازم برای ذوب کل ماده تغییرفازدهنده برابر ۲۴۴۰ ثانیه



شکل ۲۰: (الف) کانتور کسر حجمی فاز مایع (%) و خطوط تابع جریان (ب) توزیع دما (°C) برای نمونه بهینه و حالت پایه در زمان کمترین مقدار TUI برای هر نمونه (مورد بهینه در ثانیه ۱۶۶۰ و حالت پایه در ثانیه ۱۹۸۰)

<https://books.google.com/books?id=N8LGwUNYWX8C>

[2] H. Mehling, M. Brütting, and T. Haussmann, "PCM products and their fields of application—An overview of the state in 2020/2021," *J. Energy Storage*, vol. 51, p. 104354, 2022. doi: [10.1016/j.est.2022.104354](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104354)

[3] V. Goel *et al.*, "PCM-assisted energy storage systems for solar-thermal applications: Review of the associated problems and their mitigation strategies," *J. Energy Storage*, vol. 69, p. 107912, 2023. doi: [10.1016/j.est.2023.107912](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107912)

[4] A. Atal, Y. Wang, M. Harsha, and S. Sengupta, "Effect of porosity of conducting matrix on a phase change energy storage device," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 93, pp. 9–16, 2016. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.033)

[5] A. Iranmanesh, A. Ghorbani, and H. Farzan, "Numerical study of the effect of stepped fins on improving the performance of a thermal storage system in the presence of an intermediate plate and porous medium," *Eng. Energy Manage.*, vol. 2345–2951, 2025. (in Persian). doi: [10.22052/eem.2025.255727.1093](https://doi.org/10.22052/eem.2025.255727.1093)

[6] H. Bahrami and M. Saberi, "Numerical investigation of the use of solid or porous fins to improve heat transfer in a two-tube heat exchanger containing PCM, suitable for satellite thermal management," *Aerospace Knowledge and Technology*, vol. 93, pp. 9–16, 2025. (in Persian). [Online]. Available: https://www.astjournal.ir/article_711413_7eb5cd6882c7fcf4d5c20dca365d64dc.pdf

[7] S. Poran and D. H. Ahmed, "Effect of cavity shape and heat source/sink orientation on PCM melting," *J. Therm. Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324219075>

[8] X. Hu, P. Chen, X. Guo, and X. Zhang, "Comparative studies on the thermal performance of novel PCM-based heat sinks using 3D-printed thermal conductivity enhancers," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 162, p. 108613, 2025. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613)

و حداکثر اختلاف بین دمای ماکزیمم و دمای میانگین لحظه‌ای برابر $1/56^{\circ}\text{C}$ است.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A	مساحت، m^2
AR	نسبت منظری
C_p	گرمای ویژه، $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
d	قطر، m
g	شتاب جاذبه، m/s^2
k	ضریب رسانش گرمایی، $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
L_f	گرمای نهان ذوب، J/kg
P	فشار، Pa
q"	شار گرمایی، W/m^2
t	زمان، s
T	دما، K
TUI	شاخص یکنواختی توزیع دما
U و V	سرعت به ترتیب در راستاهای x و y، m/s
x و y	جهات مختصات، m

علائم یونانی

α	زاویه ساعتگرد محفظه نسبت به افق، Deg
β	ضریب انبساط گرمایی، $1/\text{K}$
ϵ	ضریب اینرسی محیط متخلخل
θ	دمای بی‌بعد
κ	ضریب تراوایی محیط متخلخل، m^2
μ	لزجت دینامیکی، Pa.s
ξ	کسر حجمی فاز مایع (مذاب)
ω	تعداد حفره‌های شبکه متخلخل در یک اینچ
ρ	چگالی، kg/m^3
τ	زمان نُرمال شده
ϕ	تخلخل

زیرنویس

0	اولیه
avg	میانگین
eff	خاصیت مؤثر
max	حداکثر
MtLF	الیاف فلزی شبکه متخلخل
liq	فاز مایع ماده تغییرفازدهنده
p	حفره شبکه متخلخل
pcm	ماده تغییرفازدهنده
sld	فاز جامد ماده تغییرفازدهنده

۹- منابع

[1] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*, Springer Berlin Heidelberg, 2008. [Online]. Available:

- [17] A. Martínez *et al.*, “Experimentally based testing of the enthalpy-porosity method for the numerical simulation of phase change of paraffin-type PCMs,” *J. Energy Storage*, vol. 69, p. 107876, 2023. doi: [10.1016/j.est.2023.107876](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107876)
- [18] Y. Xu, M.-J. Li, Z.-J. Zheng, and X.-D. Xue, “Melting performance enhancement of phase change material by a limited amount of metal foam: Configurational optimization and economic assessment,” *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 868–880, 2018. doi: [10.1016/j.apenergy.2017.12.082](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.082)
- [19] P. Zhang, X. Xiao, and Z. Ma, “A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement,” *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 472–510, 2016. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.12.043](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.043)
- [20] P. Knupp and J. Lage, “Generalization of the Forchheimer-extended Darcy flow model to the tensor permeability case via a variational principle,” *J. Fluid Mech.*, vol. 299, pp. 97–104, 1995. doi: [10.1017/S0022112095003430](https://doi.org/10.1017/S0022112095003430)
- [21] B. J. Jones, D. Sun, S. Krishnan, and S. V. Garimella, “Experimental and numerical study of melting in a cylinder,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 15–16, pp. 2724–2738, 2006. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.006](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.006)
- [22] F. Iachachene, Z. Haddad, E. Abu-Nada, and M. A. Sheremet, “Natural convection melting of phase change material in corrugated porous cavities,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 53, p. 102734, 2022. doi: [10.1016/j.seta.2022.102734](https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102734)
- [23] J. Guo, Z. Du, G. Liu, X. Yang, and M.-J. Li, “Compression effect of metal foam on melting phase change in a shell-and-tube unit,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 206, p. 118124, 2022. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2022.118124](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118124)
- [24] H. M. Ali, M. M. Janjua, U. Sajjad, and W.-M. Yan, “A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 135, pp. 649–673, 2019. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.001)
- [9] X. Hu *et al.*, “Comparative studies on thermal management performance of PCM-based heat sinks filled with various height structured porous materials,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 263, p. 125376, 2025. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.125376](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125376)
- [10] M. Ghalambaz *et al.*, “Melting process of the nano-enhanced phase change material (NePCM) in an optimized design of shell and tube thermal energy storage (TES): Taguchi optimization approach,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 193, p. 116945, 2021. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.116945](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116945)
- [11] M. Ghalambaz *et al.*, “Phase-transition thermal charging of a channel-shape thermal energy storage unit: Taguchi optimization approach and copper foam inserts,” *Molecules*, vol. 26, no. 5, p. 1235, 2021. doi: [10.3390/molecules26051235](https://doi.org/10.3390/molecules26051235)
- [12] Y. Liu *et al.*, “Role of porous metal foam on temperature control and thermal runaway propagation of integrated battery thermal management systems,” *Appl. Therm. Eng.*, p. 125712, 2025. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2025.125712](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125712)
- [13] J. C. Kurnia *et al.*, “Optimization of an innovative hybrid thermal energy storage with phase change material (PCM) wall insulator utilizing Taguchi method,” *J. Energy Storage*, vol. 49, p. 104067, 2022. doi: [10.1016/j.est.2022.104067](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104067)
- [14] A. Kotb and S. Wang, “Enhanced thermal storage performance with non-linear porosity distribution in copper foam-PCM composites,” *J. Energy Storage*, vol. 105, p. 114612, 2025. doi: [10.1016/j.est.2024.114612](https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114612)
- [15] M. Al-Jethelah *et al.*, “Charging nanoparticle enhanced bio-based PCM in open cell metallic foams: An experimental investigation,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 148, pp. 1029–1042, 2019. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2018.11.121](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.121)
- [16] S. Zhang *et al.*, “A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials (ss-PCMs) based on porous supports for thermal energy storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, p. 110127, 2021. doi: [10.1016/j.rser.2020.110127](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110127)

[27] A. Freddi and M. Salmon, "Introduction to the Taguchi method," in *Design principles and methodologies: from conceptualization to first prototyping with examples and case studies*, Springer, pp. 159–180, 2019. doi: [10.1007/978-3-319-95342-7_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95342-7_7)

[25] R. Sinaga *et al.*, "CPU cooling system based on phase changing material (PCM): Parafin wax," *AIP Conf. Proc.*, 2024. doi: [10.1063/5.0201066](https://doi.org/10.1063/5.0201066)

[26] F. Farhan, R. M. Gul, and K. Akhtar, "Passive Cooling System for Laptop Computers using Phase Change Materials," 2024. doi: [10.21203/rs.3.rs-4139275/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4139275/v1)



Numerical Study of the Effect of Peak Cooler Structure on Airflow and Efficiency of Dry Cooling Tower

Mohammad Reza Zangoee¹, Seyyed Mohammad Javadi^{*2}

1. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran.
2. Assistant professor Department of Mechanical Engineering, Faculty of advanced technologies, Quchan university of technology, Quchan, Iran.

Abstract

In dry cooling towers of power plants, the presence of a peak cooler is essential to increase the efficiency of cooling systems and improve thermal performance in high-temperature conditions. Also reversing the flow, protect the surrounding heat exchangers from freezing in winter. The appropriate position of this structure and its effect on performance has the particular importance. In this paper, the effect of the peak cooler structure on airflow and the efficiency of the dry cooling tower has been studied. For this purpose, buoyancy-driven flow considering heat transfer from the tower radiators for two cases, with and without a peak cooler, was simulated using ANSYS Fluent 22 software. In this paper, the turbulence and buoyancy effects is considered using k- ϵ model, as well as with using radiator boundary condition, the effect of pressure drop and heat transfer of the radiator is considered. The results show that the peak cooler structure has a significant negative impact on the flow rate inside the tower and consequently reduces heat transfer from the delta-shaped heat exchangers around the tower (excluding heat transfer from the heat exchangers inside the peak cooler). Also, due to vortex flows around the peak cooler, the flow rate over the delta-shaped heat exchangers decreases approximately 8%. With despite of the decrease in flow rate and heat transfer from the delta-shaped radiators due to the structure of peak cooler, the total flow rate of the tower and its heat transfer increases because of the using the fan inside the peak cooler and increasing 10% in the radiator surface area. The negative effects can be reduced by moving them towards the center of the tower.

Keywords

Cooling Tower
Airflow
Buoyancy
Peak Cooler
Simulation.

Received: 01.13.2025

Revised: 03.16.2025

Accepted: 04.14.2025

*Corresponding Author

Seyyed Mohammad Javadi

Email

Mohammad.javadi@qiet.ac.ir

1- Introduction

The Heller cooling tower was first used and operated by the Enixio company in Hungary in 1950 and was introduced as the best dry cooling tower with acceptable costs. This cooling tower has a coil (condenser) through which water flows, and at the same time, air passes over it by natural suction, causing it to cool down.

Numerous studies have been conducted regarding the efficiency of Heller cooling towers. In 2011, Reuter and his colleague developed a 2D (axisymmetric) computational fluid dynamics

model using the commercial code ANSYS Fluent to simulate flow patterns, loss coefficients, and effective flow diameter of circular natural draft cooling tower inlets. They proposed simple relationships for determining the cooling tower inlet loss coefficient and the ratio of the effective flow diameter of the inlet to full-scale cooling towers, excluding the effect of rain zones and structural supports around the cooling tower inlet [1].

In 2022, Malek Mohammadi and his colleagues investigated the replacement of wet cooling towers



at the Isfahan thermal power plant with Heller natural draft dry cooling towers. They simulated the thermodynamic cycle of the power plant and evaluated the effect of condenser temperature on the power plant's efficiency and output power. Their results showed that this replacement leads to an increase in condenser temperature by removing the last row of low-pressure turbine blades. However, by replacing the cooling tower without removing the last row of turbine blades, the power plant's output power and efficiency decrease by approximately 12.4 MW and 1.68%, respectively [2].

By reviewing the previously published studies, it can be seen that the majority of them focus on the effect of wind on the efficiency of Heller cooling towers, and no research is found regarding the effect of internal equipment on the efficiency of the cooling tower. Therefore, in this article, the effect of the peak cooler structure on airflow and cooling tower efficiency is investigated

2- Numerical Modeling

The governing equations for steady, incompressible, buoyant, and turbulent airflow include equations for modeling the conservation of mass, momentum, energy, and turbulence [3]. In this paper, the concept of a porous medium is used to simulate the radiators around the tower, which utilizes the Forgo model. The following equation is used for the pressure drop of the flow passing through the radiators [4]:

$$\Delta P = \frac{1}{2} k_v \rho V_n^2 \quad (1)$$

where the pressure drop coefficient is based on experimental data [5]:

$$k_v = 13.03 V_n^{-0.24} + 0.436 \quad (2)$$

For discretizing the governing equations in the present numerical study, a second-order upwind scheme is used. The final discretized algebraic equations are solved using the Simple algorithm [6] in the commercial CFD code Fluent.

3- Geometry and Boundary Conditions

As shown in Figure 1, the tower includes 12 peak coolers in 6 sectors, each sector including 60 degrees and a pair of peak coolers with a 24-degree angle. On the other hand, the two peak coolers in two different sectors have a 36-degree angle with each other. In each 60-degree sector of the tower, there are 16 triangular deltas, and in total around the tower circumference, there are about 96 deltas with a height of 15 meters.

At the top of the tower, the Pressure outlet boundary condition is used, and in the delta sections, the Radiator boundary condition is used. In the Radiator boundary condition, the inlet pressure drop can be entered as a coefficient of the fluid's kinetic energy, which based on the values available in articles, this pressure drop coefficient is used from equations 8 to 10 and heat transfer from it is used from equations 9 to 11.

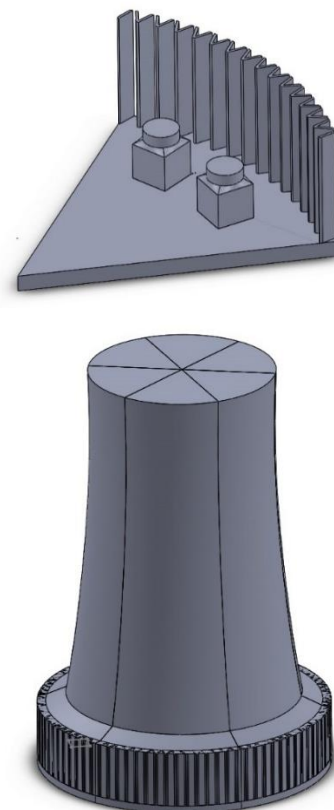


Figure 1: Geometric model of the tower and a tower sector with two peak coolers

4- Mesh Independency

To investigate the effect of meshing on the solution results, the variable of air flow rate exiting the tower (under free convection) was examined for several regular and irregular meshes. As shown in the table below, the calculation of the tower air flow rate in the computational domain for different meshes is less than 10%, and for meshes 2 and 3, the changes are below 1% and are acceptable. Therefore, simulations continued with mesh number 2.

Table 1: pid control coefficients for pitch and yaw at three input angles

Mesh number	Number of cells	Number of planes	Number of nodes	Inlet mass flow (kg/s)
1	1781841	4028367	663617	2605
2	3615478	7621433	844463	2401
3	5268700	12152883	2186882	2396
4	8354215	16853472	3186521	2394

5- Results

Figure 2 and Figure 3 show the velocity distribution of the air flow entering the peak cooler, the velocity distribution from the transverse plane above the peak cooler. Conclusion

The results show that the flow around the peak cooler causes the formation of vortices and a separation zone behind the peak cooler body, which reduces the tower mass flow rate.

Figure 4 shows the temperature contours in the two cases with and without the peak cooler structure. As shown, in the case where the peak cooler structure exists, the temperature of the air entering the peak cooler does not pass over the radiators, and the air temperature in that area is lower.

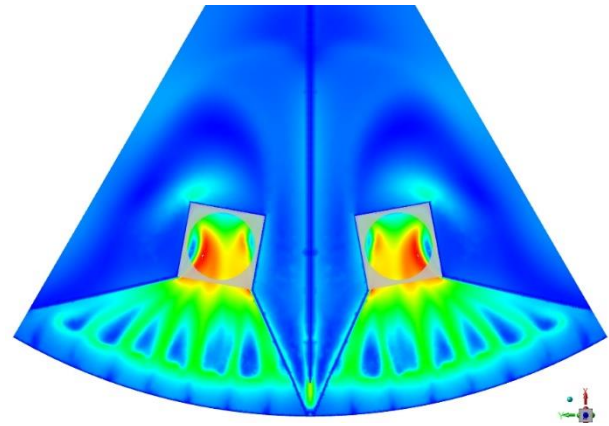


Figure 2: Inlet flow velocity distribution into the peak cooler

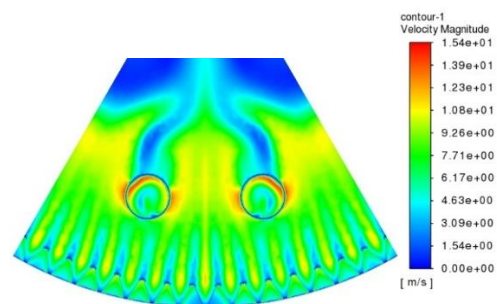
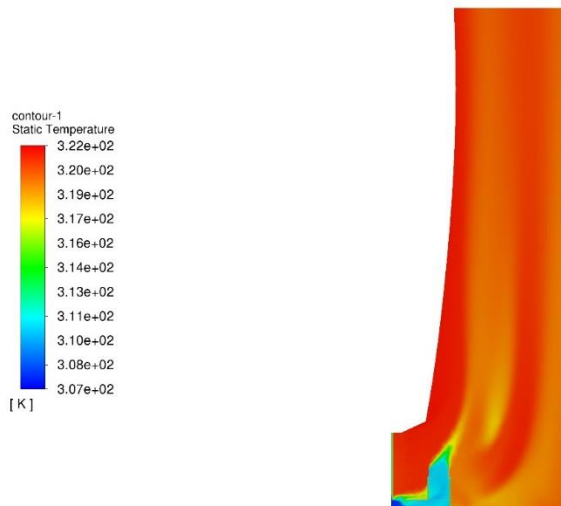


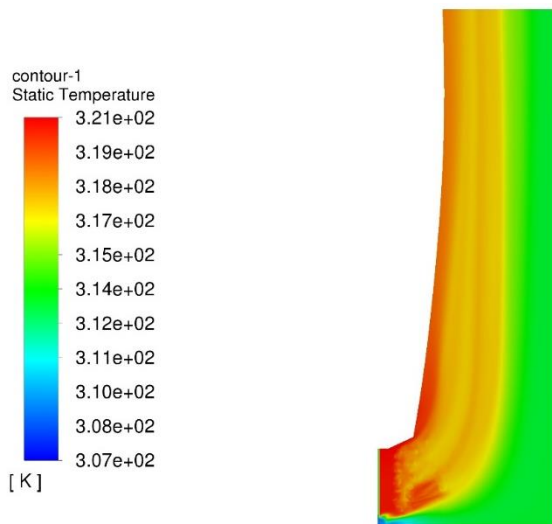
Figure 3: Flow velocity distribution in the cross-sectional plane passing over the peak cooler

The results show that the flow around the peak cooler causes the formation of vortices and a separation zone behind the peak cooler body, which reduces the tower mass flow rate.

Figure 4 shows the temperature contours in the two cases with and without the peak cooler structure. As shown, in the case where the peak cooler structure exists, the temperature of the air entering the peak cooler does not pass over the radiators, and the air temperature in that area is lower.



a) Temperature distribution with the presence of the peak cooler structure



b) Temperature distribution without the presence of the peak cooler structure

Figure 4: Temperature distribution into the tower

6- Conclusion

In this study, the symmetric sector under study, between 844 thousand nodes and 4 million nodes,

or in other words, the entire tower geometry between 12 and 48 million nodes, has been meshed with a hybrid tetrahedral and hexahedral mesh. The peak cooler structure causes the formation of a vortex flow behind the peak cooler and a pressure drop behind it, reducing the tower air flow rate. The results also show that the peak cooler structure, in the fan-off state, reduces the tower air flow rate from 2256 to about 2090 kg/s.

7- References

- [1] H. Reuter and D. Kröger, "Computational Fluid Dynamics Analysis of Cooling Tower Inlets," *J. Fluids Eng.*, vol. 133, p. 081104, 2011, doi: [10.1115/1.4004454](https://doi.org/10.1115/1.4004454).
- [2] M. Malekmohamadi, H. Ahmadikia, S. Golmohamadi, and H. Khodadadi, "Evaluation of wet cooling tower replacement by Heller cooling tower in a power plant," *Arch. Mech. Eng.*, pp. 129–149, 2022, doi: [10.24425/ame.2022.144076](https://doi.org/10.24425/ame.2022.144076).
- [3] A. Barletta, "The Boussinesq approximation for buoyant flows," *Mechanics Research Communications*, 124, 2022.
- [4] EGI, *The Heller System*, EGI, 1984.
- [5] EGI, *Thermo Technical and Aerodynamic Design/Calculation/Characteristics of the Dry Cooling Plant System Heater*, Budapest Institute of Engineering, 1985.
- [6] S. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, CRC Press, 1980



مطالعه عددی تأثیر سازه پیک کولر بر جریان هوا و بازدهی برج خنک کن خشک

محمد رضا زنگوئی مطلق^۱، سید محمد جوادی^{۲*}

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قانان، قانن، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فن آوری های نوین، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.

چکیده

کلمات کلیدی

برج خنک کن

جریان هوا

شناوری

پیک کولر

شبیه سازی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

*نویسنده مسئول

سید محمد جوادی

ایمیل

Mohammad.javadi@qiet.ac.ir

در برج های خنک کن خشک نیروگاهی، وجود پیک کولر به منظور افزایش کارایی سیستم های خنک کننده و بهبود عملکرد حرارتی در شرایط دمای بالا و با معکوس کردن جریان داخل آن در زمستان برای حفاظت از یخ زدن مبدل های اطراف برج ضروری است؛ اما موقعیت مناسب این سازه و اثر آن روی عملکرد از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله، اثر سازه پیک کولر بر جریان هوا و بازدهی برج خنک کن خشک مطالعه شده است. بدین منظور جریان شناوری با در نظر گرفتن انتقال حرارت از رادیاتورهای برج برای دو حالت با و بدون پیک کولر با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent 22 انجام شده است. جهت مدل سازی اثر آشفتگی از مدل k-ε با در نظر گرفتن اثرات شناوری و همچنین اثر افت فشار و انتقال حرارت رادیاتور با استفاده از شرط مرزی رادیاتور و اثر فن پیک کولر نیز با شرط مرزی فن دوبعدی وارد محاسبات شده است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد سازه پیک کولر تأثیر منفی قابل توجهی بر دبی جریان داخل برج و در نتیجه کاهش انتقال حرارت از مبدل های دلتا شکل اطراف برج (با صرف نظر از انتقال حرارت مبدل های داخل پیک کولر) دارد. نتایج نشان می دهد به دلیل جریان های گردابی اطراف سازه پیک کولر و انسداد جریان، دبی جریان روی مبدل های دلتا شکل ۸ درصد کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد علی رغم کاهش دبی و انتقال حرارت از رادیاتورهای دلتا شکل، در مجموع دبی کل برج و انتقال حرارت آن به دلیل استفاده از فن داخل پیک کولر و افزایش ۱۰ درصدی سطح رادیاتورها، در مجموع پیک کولرها اثر مثبتی دارند ولی می توان با انتقال آن ها به سمت مرکز برج این اثرات منفی را کاهش داد.

۱- مقدمه

بلندی را نیز دارا هستند. مطالعات متعددی در ارتباط با راندمان برج های خنک کننده هار انجام شده است.

برای جلوگیری از یخ زدن مبدل های برج و همچنین افزایش سطح تبادل حرارت، پیک کولر که مجموعه ای از یک رادیاتور و فن می باشد در داخل برج قرار گرفته است. به دلیل استفاده از فن در فصل تابستان، با در مسیر قرار گرفتن پیک کولر و پاشش آب روی آن، می توان راندمان برج را افزایش داد.

در سال ۲۰۱۱ رویتر و همکارش، یک مدل دینامیکی سیالات محاسباتی دوبعدی (متقارن محوری) با استفاده از کد تجاری

برج خنک کن هار اولین بار توسط شرکت انکسی و در مجارستان در سال ۱۹۵۰ مورد استفاده و بهره برداری قرار گرفت و به عنوان بهترین برج خنک کننده خشک با هزینه های قابل قبول مطرح شد. این برج خنک کننده دارای یک کویل (کندانسور) است که آب در درون آن جریان دارد و هم زمان هوا به وسیله مکش طبیعی از روی آن عبور کرده و باعث خنک شدن آن می شود. برج های خنک کننده طبیعی، یکی از مهم ترین اجزاء نیروگاه هستند که با مصرف کم انرژی نقش خنک کردن آب را به عهده دارند. برج های خنک کن جریان طبیعی می توانند از جنس بتن و یا استیل و آلومینیوم باشند که البته ابعاد بزرگ و ارتفاع



(AIFR) ناشی از اندرکنش برج‌های خنک‌کننده و همچنین اثرات منفی باد متقاطع در آرایش‌های مختلف برج مورد بررسی قرار گرفت [۵].

در سال ۲۰۱۷ عملکرد حرارتی چهار برج خنک‌کننده طبیعی مختلف در شرایط باد مخالف بررسی شد. بادشکن‌ها و صفحه خروجی مورب به‌طور هم‌زمان در ساختار برج خنک‌کننده جدید گنجانده شده‌اند و روش حجم محدود با استفاده از الگوریتم Simple برای شبیه‌سازی میدان جریان در اطراف هر برج خنک‌کننده استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پروفیل سرعت باد به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد حرارتی و ویژگی‌های استراتژی‌های بازیابی تأثیر می‌گذارد. هنگامی که سرعت باد در پایین برج خنک‌کننده زیاد است، بادشکن‌ها شرایط بهتری را برای افزایش عملکرد حرارتی برج خنک‌کننده انجام می‌دهند [۶]. در سال ۲۰۱۹ ایزدی و همکارانش با استفاده از کد تجاری فلوئنت، شرایط کارکرد واقعی برج در دمای زیاد با فن و بدون فن را شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در صورت استفاده از هواکش. نرخ انتقال گرما، اختلاف دمای آب خروجی و ورودی به رادیاتور و در نتیجه افت فشار در چگالنده افزایش یافته و سبب بهبود کارایی نیروگاه می‌شود [۷]. در سال ۲۰۲۰ بوساک و همکارانش در تحقیقی، سیستم خنک‌کننده آب در گردش واحد برق یک نیروگاه حرارتی با برج خنک‌کننده هلر مورد بررسی قرار دادند. مطالعات تحلیلی بر اساس داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های راه‌اندازی سیستم خنک‌کننده آب در گردش واحد نیروگاه «هرزدان-۵» با ظرفیت ۳۰۰ مگاوات انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین تلفات فشار در توربین‌های آبی (HT) است که بخشی از ایستگاه پمپاژ در گردش هستند؛ بنابراین، با تنظیم بار توربین آبی، با کاهش تلفات فشار آب، می‌توان با پمپ‌های گردشی به‌کندانسور، آب را افزایش داد. داده‌های تجربی و وابستگی‌های نظری برای محاسبه ویژگی‌های هیدرولیکی تغییر یافته سیستم خنک‌کننده آب در گردش استفاده شد. فعال‌سازی بخش‌های پیک کولر برج خنک‌کننده تنها با سیستم پاشش دمای آب خنک شده را ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد کاهش داد [۸]. خداکرم و گل نشان در تحقیقی، اندازه‌گیری‌های تمام‌مقیاس به‌منظور بررسی کاربرد یک روش تحلیلی در پیش‌بینی عملکرد برج خنک‌کننده خشک طبیعی (NDDCT) از نوع هلر واقع در شیراز در شرایط مختلف محیطی انجام دادند. این روش برای سه برج خنک‌کننده خشک طبیعی NDDCT دیگر اعمال شد. تنها پارامتر مشابه بین برج‌های مورد مطالعه، نسبت قطر خروجی به ارتفاع آن‌ها (Do/HT) حدود ۰/۵

برای شبیه‌سازی الگوهای جریان، ضرایب تلفات و قطر جریان مؤثر ورودی‌های برج خنک‌کن طبیعی دایره‌ای توسعه دادند. این مدل پس از اعتبارسنجی، برای بررسی اثرات عدد رینولدز، ضخامت دیواره پوسته، زاویه شیب دیواره پوسته، ضریب تلفات پر، نوع پر، قطر ورودی به ارتفاع ورودی و هندسه ورودی بر روی الگوهای جریان، ضریب تلفات ورودی و قطر مؤثر برج‌های خنک‌کننده در مقیاس کامل استفاده شد. در نهایت، روابط ساده‌ای برای تعیین ضریب تلفات ورودی برج خنک‌کننده و نسبت قطر جریان مؤثر ورودی برج‌های خنک‌کننده در مقیاس کامل به‌استثنای تأثیر مناطق باران و تکیه‌گاه‌های ساختاری در اطراف ورودی برج خنک‌کننده پیشنهاد شده‌اند [۱]. در سال ۲۰۱۳ خاموشی و همکارانش راندمان برج خنک‌کننده خشک طبیعی تحت شرایط باد را بررسی کردند. کار تحقیقی آن‌ها به ارزیابی عملکرد برج خنک‌کننده تحت شرایط باد متقابل زمانی که بادشکن‌ها از همان نوع رادیاتور برج خنک‌کننده ساخته شده‌اند، می‌پردازد. نتایج عددی نشان می‌دهد که بادشکن‌های نوع رادیاتور نسبت به انواع معمولی جامد می‌توانند راندمان خنک‌کننده را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود بخشند [۲]. اردکانی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ تأثیر باد بر عملکرد حرارتی برج خنک‌کننده نیروگاه منتظر قائم بررسی کرده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با وجود مکش هوا، هیچ جدایی در حاشیه برج خنک‌کننده رخ نداده است. بخش‌های خنک‌کننده جلویی که رو به باد هستند و بخش‌های پشتی که مستقیماً با باد روبرو نیستند از نظر حرارتی کارآمدتر بودند. آن‌ها حدود ۶۰ درصد گرمای بیشتری نسبت به بخش‌های خنک‌کننده به موازات جهت باد در حاشیه برج خنک‌کننده منتقل کردند. نتایج همچنین نشان داد که عملکرد حرارتی در بخش‌های خنک‌کننده جلو و عقب با افزایش سرعت باد افزایش یافته و در بخش‌های پیرامونی کاهش می‌یابد [۳]. در تحقیقی دیگر اردکانی و همکارانش با استفاده از یک مدل هم‌دمای برج هلر در تونل باد، تأثیر وجود دیوارهای بادشکن در بهبود دبی ورودی به برج در شرایط وزش باد به‌صورت تجربی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از دیوارهای بادشکن تا ۳۰٪ دبی ورودی به برج را افزایش می‌دهد. همچنین با زیاد شدن سرعت باد، تأثیر طول دیوار بادشکن بر دبی ورودی افزایش می‌یابد [۴].

رشادت جو و همکارانش برج‌های خنک‌کننده نوع هلر در چهار آرایش مختلف در شرایط همرفت آزاد و باد متقاطع شبیه‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده از کار عددی با نتایج تجربی موجود را مقایسه کردند. با مطالعه الگوی جریان، عوامل مؤثر بر کاهش دبی هوای ورودی

است. نتایج نشان داد که همه برج‌ها در شرایط مختلف محیطی رفتار یکسانی دارند؛ بنابراین، آن‌ها یک مدل ریاضی عمومی ساده ایجاد کردند که عملکرد یک NDDCT را در طیف وسیعی از شرایط محیطی پیش‌بینی می‌کند [۹]. پنگ و همکارانش جهت بهبود عملکرد برج خنک‌کننده خشک هلر، یک سیستم یکپارچه شامل مبدل حرارتی اضافی و یک سیکل تبرید تراکمی که توسط یک سیکل رانکین هدایت می‌شود، به برج خنک‌کننده هلر متصل کردند تا قابلیت خنک‌کنندگی برج خنک‌کننده و متعاقباً عملکرد واحد بخار را افزایش دهند. مبدل حرارتی اضافی و چرخه تبرید تراکمی مرتبط به ترتیب از طریق کد ASPEN HTFS و EES معتبر طراحی شد. با توجه به نتایج آن‌ها، سیستم پیشنهادی که توسط گرمای هدر رفته گازهای خروجی انرژی می‌گیرد، می‌تواند در زمان‌های ذکر شده به برج خنک‌کننده کمک کند. همچنین، بهینه‌سازی راندمان اکسرژی را از ۳۳/۶۸٪ به ۳۷/۵۹٪ افزایش می‌دهد و نرخ کل هزینه را از ۳۹۴۵ دلار در ساعت به ۳۳۶۳ دلار در ساعت کاهش می‌دهد [۱۰]. در تحقیقی در سال ۲۰۲۱، مدل ریاضی جدید برای پیش‌بینی عملکرد این برج خنک‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. این مدل فقط برای سرعت بادهای کمتر از سرعت بحرانی که معمولاً زیاد و در شرایط کارکرد، غیرمعمول است، قابل کاربرد است. با استفاده از این مدل، برج‌های خنک‌کننده خشک طبیعی هلر در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس در شرایط مختلف محیطی (دمای محیط و سرعت باد)، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل مشام می‌دهد که وقتی جهت باد بر برج‌ها عمود باشد، راندمان هر برج کمتر از راندمان همان برج در حالت منفرد است. برج در همین وضعیت هنگامی که باد در راستای جهت برج‌ها باشد، کارایی برج‌های عقب از برج در خط حمله باد افزایش می‌یابد [۱۱]. در سال ۲۰۲۲، احمدی کیا و همکارش طراحی برج خنک‌کننده خشک طبیعی در دو بخش طراحی مبدل‌های حرارتی و حل عددی جریان در برج انجام داده است. ابتدا مبدل حرارتی (نوع هلر) به صورت ترمودینامیکی شبیه‌سازی شده و سپس با یک برنامه کامپیوتری که جریان همرفت طبیعی آشفته را از طریق برج محاسبه می‌کند ترکیب شده است. نتایج عددی با داده‌های تجربی نیروگاه حرارتی شهید منتظری در شرایط مختلف محیطی مقایسه شده است. نتایج آن‌ها انطباق خوبی بین نتایج عددی و داده‌های تجربی را نشان داد [۱۲]. ملک محمدی و همکارانش در سال ۲۰۲۲ در تحقیقی به بررسی جایگزینی برج‌های خنک‌کننده مرطوب در نیروگاه حرارتی اصفهان با برج‌های خنک‌کننده خشک طبیعی هلر پرداخت. آن‌ها سیکل ترمودینامیکی نیروگاه را شبیه‌سازی شده و تأثیر

دمای کندانسور بر بازده و توان خروجی نیروگاه را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این جایگزینی باعث افزایش دمای کندانسور با حذف آخرین ردیف پره‌های توربین کم‌فشار می‌باشد؛ اما با تعویض برج خنک‌کننده بدون برداشتن پره‌های ردیف آخر توربین، توان خروجی و راندمان نیروگاه به ترتیب حدود ۱۲/۴ مگاوات و ۱/۶۸ درصد کاهش می‌یابد [۱۳]. در سال ۲۰۲۲، تحقیقی با هدف ارزیابی اثرات وزش باد بر کارایی برج‌های خنک‌کننده (CTs) و پیشنهاد روش‌هایی برای بهبود عملکرد آن‌ها در نیروگاه سیکل ترکیبی منتظر قائم انجام گرفت. برای این منظور، چرخه MGCCPP به‌طور هم‌زمان با استفاده از تجزیه و تحلیل CFD و انرژی-اکسرژی برای اولین بار مدل‌سازی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از دیوارهای بادشکن در باد غالب منجر به حدود ۶/۵ مگاوات مازاد توان در هر واحد می‌شود. همچنین بر اساس تحلیل‌های اقتصادی، دوره بازپرداخت سه طرح پیشنهادی ۱۴، ۱۵/۵ و ۱۶ ماهه است که کاملاً موجه است [۱۴].

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد بیشتر مطالعات انجام‌شده تاکنون بر تأثیر سرعت باد بر راندمان برج‌های خنک‌کن هلر بوده، به همین دلیل بخش اصلی تمرکز آن‌ها بر شبیه‌سازی جریان خارجی اطراف برج بوده و داخل برج با دقت و شبکه کافی مدل‌سازی نشده است و به‌ندرت شکل خاص مبدل‌های دلتا شکل و اثرات فشار و حتی انتقال حرارت آن‌ها را وارد محاسبات نموده است. لذا در این مقاله با مدل‌سازی دقیق اثر افت فشار و انتقال حرارت در رادیاتورهای برج و همچنین در نظر گرفتن پروفیل عملکرد فن پیک کولر، تأثیر سازه پیک کولر بر جریان هوا و راندمان برج خنک‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی عددی

از آنجایی که سرعت هوا در داخل برج خنک‌کننده کم است، تغییرات چگالی هوا در برج خنک‌کننده ناچیز می‌باشد؛ بنابراین، جریان هوا به‌طور کامل جریان تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. البته از تقریب بوسینسک [۱۵] در معادله مومنتم عمودی برای گنجاندن نیروی شناوری در معادله مومنتم عمودی استفاده می‌شود. علاوه بر این، رژیم جریان نیز آشفته در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. نیروی شناوری به‌عنوان عامل اصلی ایجاد جریان داخل برج، وارد شبیه‌سازی‌ها شده است. معادلات حاکم برای جریان هوای پایا، تراکم‌ناپذیر، شناور و آشفته شامل معادلات برای مدل‌سازی بقای جرم، مومنتم، انرژی و آشفستگی هستند [۱۵]. مدل استاندارد شناخته‌شده k-ε [۱۶] برای مواجهه با

$$\Delta P = \frac{1}{2} k_v \rho V_n^2 \quad (۸)$$

که در آن ضریب افت از داده‌های تجربی استفاده شده است [۱۸]:

$$k_v = 13.03 V_n^{-0.24} + 0.436 \quad (۹)$$

همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی، از یک رابطه تجربی به دست آمده است [۱۸]:

$$h = 2035.02 V_n^{0.515} \quad (۱۰)$$

و دمای رادیاتور از متوسط دمای آب ورودی و خروجی محاسبه می‌شود:

$$T_r = \frac{T_{wi} + T_{wo}}{2} \quad (۱۱)$$

که برای محاسبه دمای T_r توسط تکرار در روش عددی محاسبه می‌شود. هنگامی که یک تکرار عددی انجام می‌شود، نرخ انتقال حرارت از رادیاتورها به صورت محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_r = A_r h (T_r - T) \quad (۱۲)$$

که در آن A_r سطح انتقال حرارت است، سپس، دمای آب خروجی (T_{wo}) از بقای انرژی در یک سکتور خاص از رادیاتور محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_w C_w (T_{wi} - T_{wo}) \quad (۱۳)$$

که در آن \dot{m}_w ، C_w ، و T_{wi} به ترتیب دبی جرمی آب، ظرفیت گرمایی آب و دمای آب ورودی هستند.

برای گسسته‌سازی معادلات حاکم در مطالعه عددی حاضر از طرح مرتبه دوم upwind استفاده شده است. معادلات جبری گسسته شده نهایی معادلات با الگوریتم Simple [۱۹] در کد تجاری CFD Fluent حل می‌شوند. محاسبات عددی تا زمانی ادامه می‌یابد که همه متغیرهای وابسته به مقادیر ثابت برسند.

۳- هندسه مورد مطالعه

ارتفاع برج خنک‌کن هلو مورد مطالعه ۱۱۲ متر از زمین و قطر دهانه خروجی ۷۷ متر می‌باشد. قطر گلوگاه برج ۵۰ متر بوده که در ارتفاع

ویژگی‌های آشفتگی استفاده می‌شود و معادلات حاکم بر مسئله به صورت زیر می‌شود:

$$\vec{v} \cdot \vec{v} = 0 \quad (۱)$$

$$\rho (\vec{v} \cdot \vec{v}) \vec{v} = -\vec{v} P + \vec{v} \tau - \rho \beta (T - T_{ar}) \vec{g} + \vec{S}_h \quad (۲)$$

$$\rho (\vec{v} \cdot \vec{v}) T = -\vec{v} [(\Gamma + \Gamma_t) \vec{v} T] + Q_h \quad (۳)$$

$$(\vec{v} \cdot \vec{v}) k = \vec{v} [(v + \frac{v_t}{\sigma_k}) \vec{v} k] + P + G - \varepsilon \quad (۴)$$

$$(\vec{v} \cdot \vec{v}) \varepsilon = \vec{v} [(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}) \vec{v} \varepsilon] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۵)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= (\mu + \mu_t) S_{ij}, P = v_t S_{ij} S_{ij} \\ G &= -g \beta \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial z}, S_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}) \end{aligned} \quad (۶)$$

و مقدار ثابت‌ها به‌قرار زیر هستند

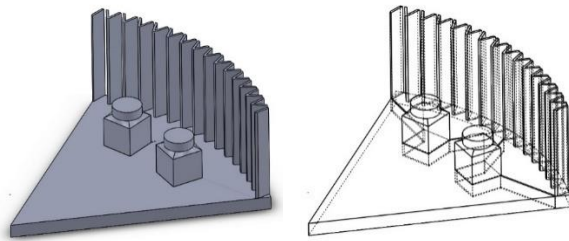
$$\begin{aligned} C_{\mu} &= 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \\ \sigma_k &= 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_t = 1.0, \end{aligned} \quad (۷)$$

در معادلات فوق، \vec{v} ، P ، ρ ، μ و μ_t به ترتیب بردار سرعت، فشار استاتیک، چگالی هوا، لزجت دینامیکی و لزجت آشفتگی را نشان می‌دهند. در همین حال، T و T_{ar} به ترتیب دمای محلی و مرجع هستند. β نشان‌دهنده ضریب تراکم‌پذیری هوا، g بردار شتاب گرانشی و S_{ij} تانسور نرخ تغییر شکل است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از مدل RNG k- ε و k- ω و RSM تأثیر کمی در نتایج حل ندارند.

در این مقاله این از مفهوم محیط متخلخل برای شبیه‌سازی رادیاتورهای اطراف برج که از مدل Forgo استفاده می‌شود. برای افت فشار جریان عبوری از رادیاتورها از معادله زیر استفاده می‌شود [۱۷]:

۹۵ متری از کف زمین قرار گرفته است. است ابعاد فوق ابعاد ناحیه جریان هوا بوده و سازه زیرزمین مدنظر نیست.

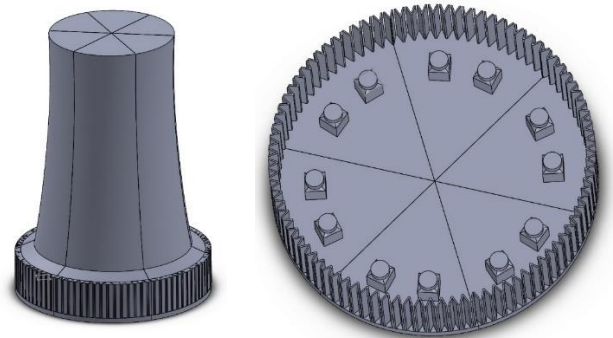
همانطور که در شکل ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است، برج شامل ۱۲ پیک کولر در ۶ سکتور (بخش) که هر سکتور شامل ۶۰ درجه و یک جفت پیک کولر با زاویه ۲۴ درجه می‌باشند. از طرفی هر دو پیک کولر در دو سکتور مختلف، با هم زاویه ۳۶ درجه دارند. در هر سکتور ۶۰ درجه برج، ۱۶ دلتای مثلثی و در مجموع در محیط برج حدود ۹۶ دلتا با ارتفاع ۱۵ متر قرار گرفته است. در قسمت پیک کولرها، رادیاتور با مشخصات رادیاتورهای دلتا شکل اطراف برج قرار گرفته است که ضریب افت و ضریب انتقال حرارت آن از مقالات مختلف در بخش بعدی آورده شده است.



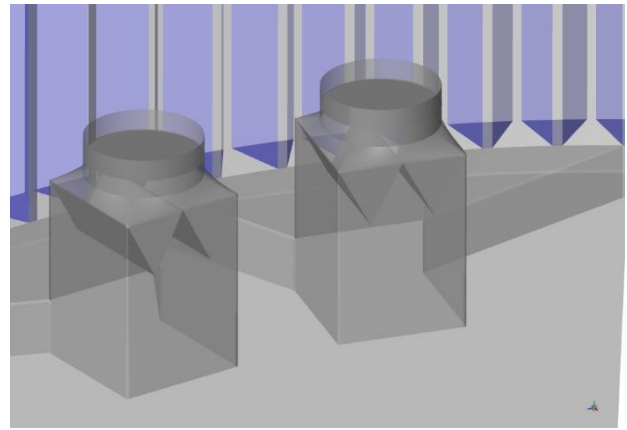
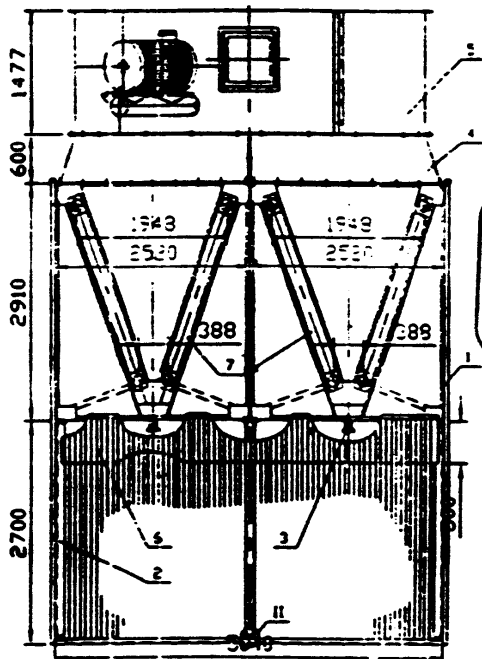
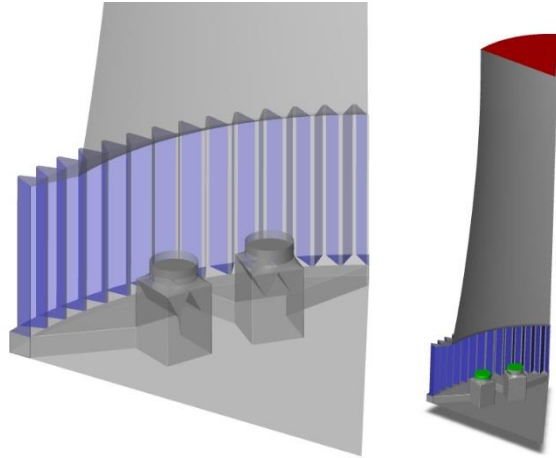
شکل ۲: مدل هندسی یک سکتور برج با دو پیک کولر

۴- شرایط مرزی مورد استفاده

در شکل ۳ ناحیه محاسباتی ۳۰ درجه‌ای اطراف یک پیک کولر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در قسمت بالای برج از شرط مرزی Pressure outlet (ناحیه قرمز رنگ) و در بخش دلتاها از شرط مرزی رادیاتور (Radiator) استفاده شده است. در شرط مرزی Radiator می‌توان افت فشار ورودی را به صورت ضریبی از انرژی جنبشی سیال وارد نمود که بر اساس مقادیر موجود در مقالات این ضریب افت از معادله ۸ تا ۱۰ و انتقال حرارت از آن از معادلات ۹ تا ۱۱ استفاده می‌شود. صفحات خاکستری رنگ شرایط مرزی Wall می‌باشند. همچنین دبی فن در حالت ۵۰٪ کارکرد معادل $53 \text{ m}^3/\text{s}$ و در حالت کارکرد ۱۰۰٪ دبی آن معادل $106 \text{ m}^3/\text{s}$ می‌باشد. همچنین سرعت دورانی فن به ترتیب ۱۲۰ و ۲۴۰ دور بر دقیقه می‌باشد. در شبیه‌سازی فوق فشار فن ۶۰ پاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: مدل هندسی کامل برج بر اساس مشخصات هندسی نقشه‌ها

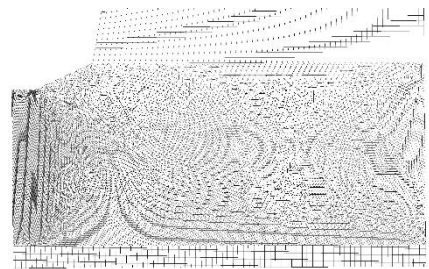
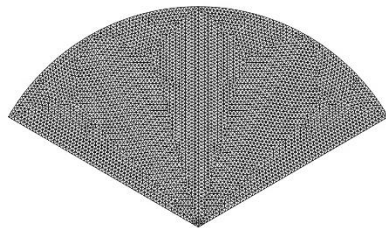


شکل ۳: نقشه و مدل سازی پیک کولر با فن و رادیاتورهای پیک کولر

۵- استقلال از شبکه

در شکل زیر نمونه‌ای از شبکه تولیدشده برای محیط حل از نمای خارجی و دلتاها نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود برای بدنه بالای برج از شبکه منتظم با ابعاد ۲۰ سانتیمتر و برای بخش

پایین برج از شبکه ترکیبی ۶ وجهی-۴ وجهی با ابعاد بیرونی ۲۰ سانتیمتر و ابعاد ۱۰ سانتیمتر برای بخش‌های درونی مانند پیک کولر و دلتاها استفاده شده است. همچنین مرتبه همگرایی معادلات مومنتوم، 0.0001 و معادله انرژی 0.000001 در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: مش بندی عمودی و افقی برج

مقالات مختلف، منطقی می‌باشد. مقایسه نتایج با نتایج نیروگاه‌های مشابه در کشور نشان می‌دهد که محدوده دبی هوای برج‌های مشابه نیز در حدود ۲۴۰۰۰ مترمکعب بر ساعت می‌باشد که به نتایج این تحقیق مشابه می‌باشد.

۶- تحلیل جریان داخل برج با فن خاموش

در این قسمت جهت تعیین اثر سازه پیک کولر بر مکش طبیعی برج، جریان مکش طبیعی داخل برج برای دو حالت با و بدون سازه پیک کولر در حالت فن خاموش مدل‌سازی شده است.

در شکل ۵ مسیر جریان ورودی از دلتاها از دو نمای مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود جریان غالبی در مرکز برج، تا ارتفاع دلتاها) وجود نداشته و جریان چرخشی در آنجا وجود دارد. همچنین جریان ورودی از دلتاها به نرمی و بدون گردابه و چرخش خاصی، بسیار منظم به سمت بالای برج کشیده می‌شوند.

همچنین نتایج نشان می‌دهد یک گردابه کوچک در لبه انحنای برج در محل اتصال به رادیاتورهای وجود دارد که حذف آن می‌تواند سبب افزایش عملکرد برج گردد. ولی به دلیل محدودیت‌های ساخت و سازه در این برج اصلاح نشده است.

شکل ۶ و شکل ۷ توزیع سرعت جریان هوای ورودی به پیک کولر و توزیع سرعت از صفحات میانی پیک کولر، عرضی بالای پیک کولر و توزیع سرعت در خروجی برج را نشان می‌دهد. نتایج بالا نشان می‌دهد که جریان اطراف پیک کولر سبب تشکیل گردابه و ناحیه جدایش پشت بدنه پیک کولر می‌گردد که این سبب کاهش دبی برج می‌گردد. لذا پیش‌بینی می‌شود در حالت بدون سازه برج، دبی آن افزایش یابد.

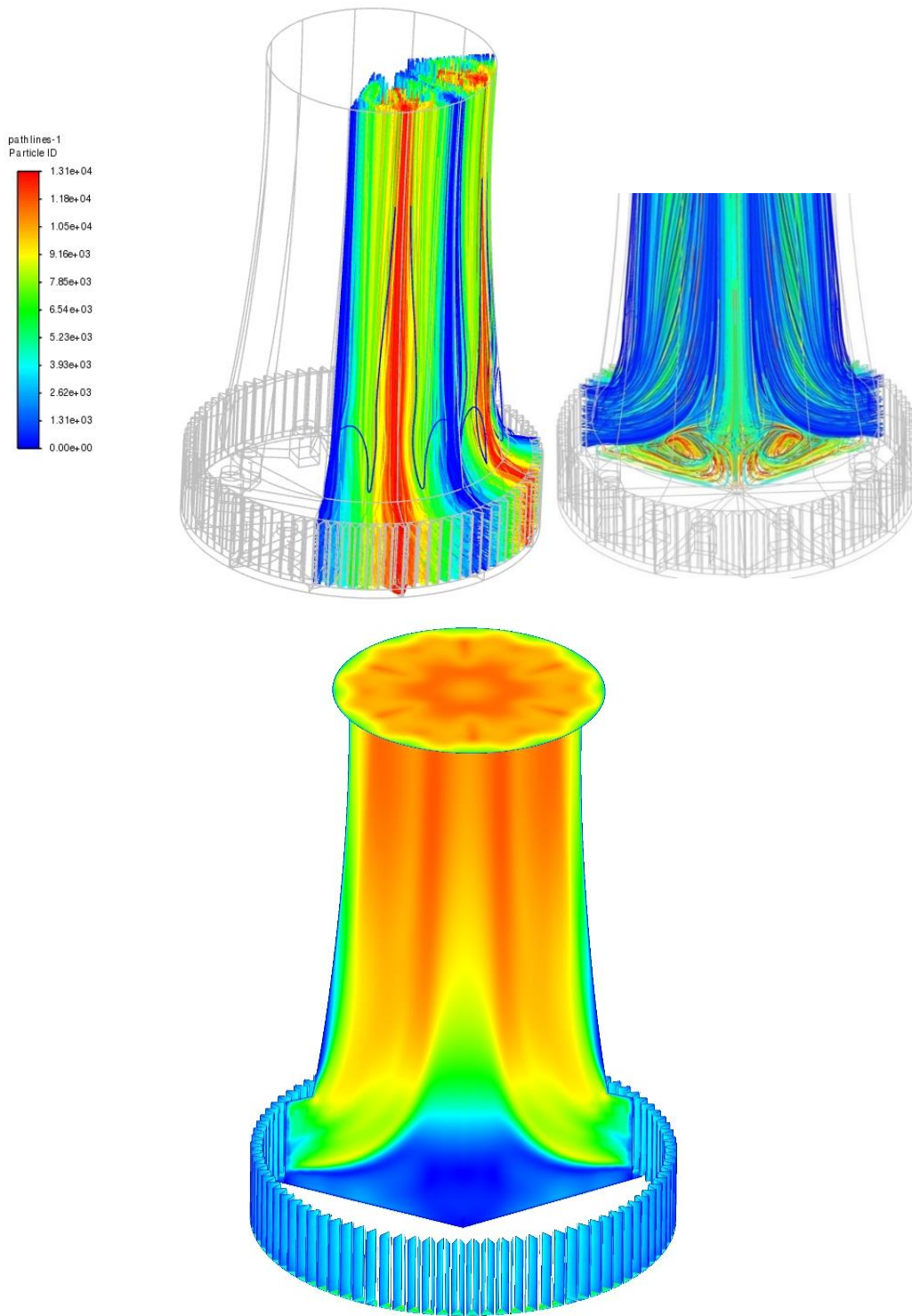
برای بررسی اثر شبکه‌بندی بر نتایج حل، متغیر دبی هوای خروجی از برج (تحت جابجایی آزاد) برای چندین شبکه منظم و نامنظم بررسی گردید که در زیر مقاطعی از شبکه‌های مختلف در خروجی برج و بخش پایینی صفحه تقارن برج نشان داده شده است.

همانطور که در جدول زیر نشان داده شده است، با توجه به نوع سلول (۴ یا ۶ وجهی) تعداد گره‌ها ممکن است در حالت ۴ وجهی افزایش بسیار بیشتری نسبت به تعداد سلول‌ها داشته باشد. ولی در مجموع، محاسبه دبی هوای برج در ناحیه محاسباتی در شبکه‌های مختلف کمتر از ۱۰ درصد و برای شبکه‌های ۲ و ۳ تغییرات زیر ۱ درصد بوده و مورد پذیرش می‌باشند. لذا شبیه‌سازی‌های با شبکه شماره ۲، ادامه یافته است.

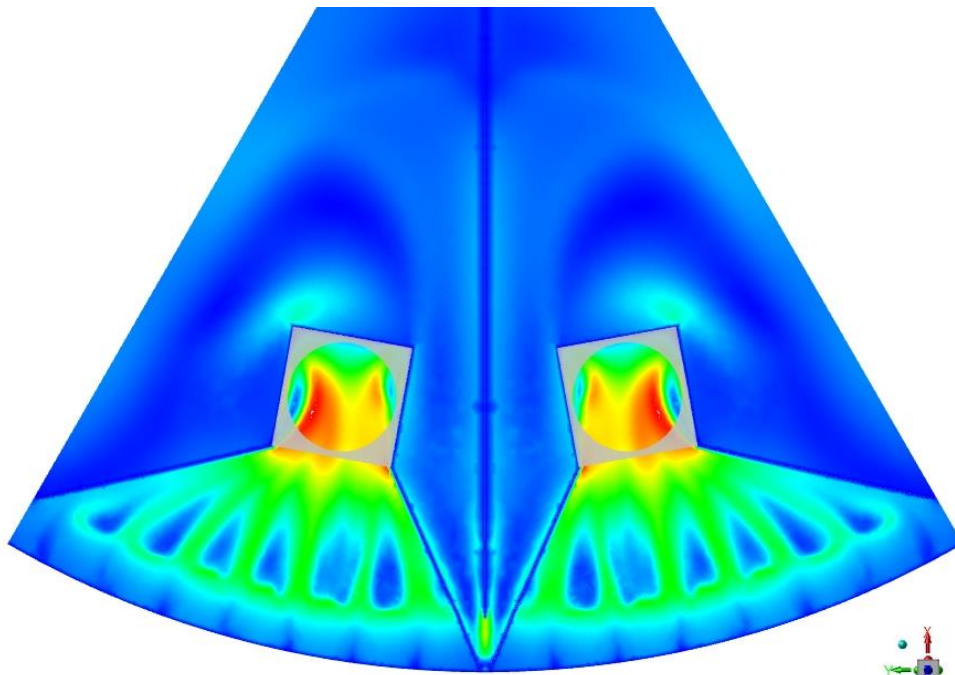
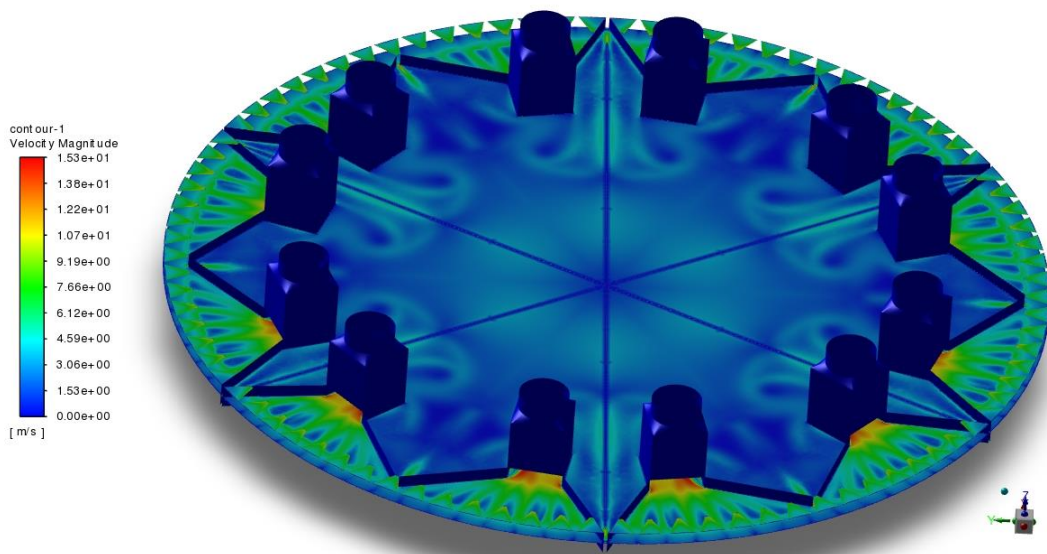
جدول ۱: مشخصات شبکه‌بندی‌های مختلف

تعداد سلول	تعداد صفحه	تعداد گره	دبی هوای ورودی (kg/s)
۱۷۸۱۸۴۱	۴۰۲۸۳۶۷	۶۶۳۶۱۷	۲۶۰۵
۳۶۱۵۴۷۸	۷۶۲۱۴۳۳	۸۴۴۴۶۳	۲۴۰۱
۵۲۶۸۷۰۰	۱۲۱۵۲۸۸۳	۲۱۸۶۸۸۲	۲۳۹۶
۸۳۵۴۲۱۵	۱۶۸۵۳۴۷۲	۳۱۸۶۵۲۱	۲۳۹۴

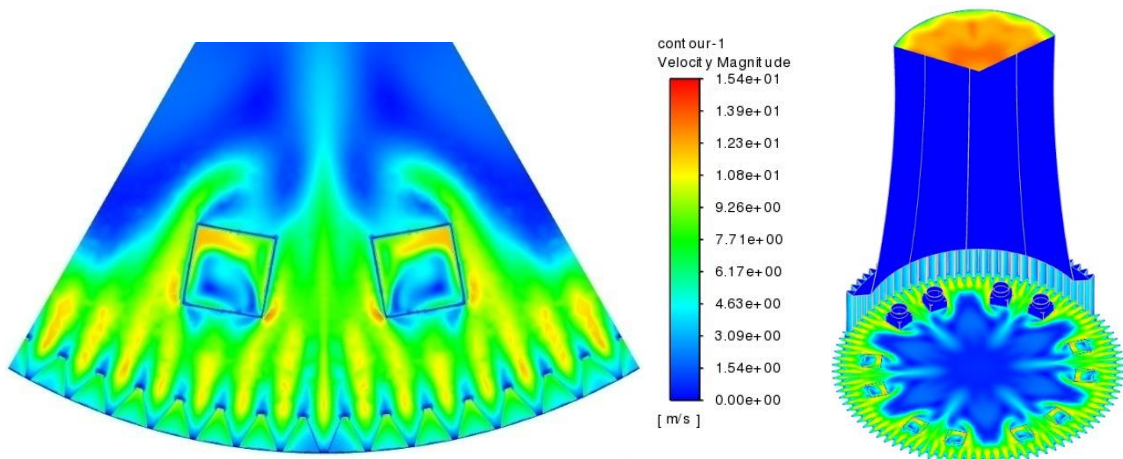
دبی هوای ناحیه محاسباتی بدون در نظر گرفتن افت فشار مبدل‌ها و پیک کولر خاموش، حدود ۲۴۰۰ کیلوگرم بر ثانیه و دبی کل برج ۲۸۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد که با توجه به در نظر گرفتن افت فشار ناشی از مبدل‌ها در این مرحله با اعداد محاسبه شده در



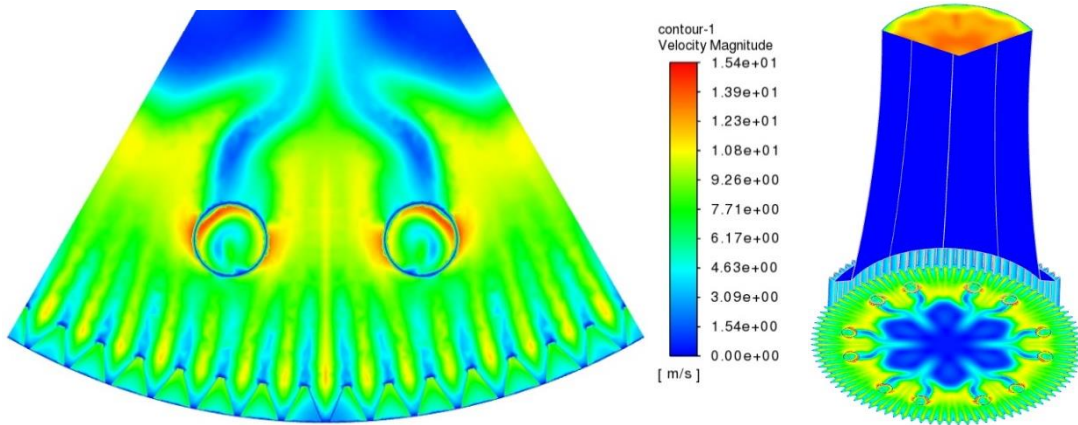
شکل ۵: مسیر جریان ورودی از دلتاها به سمت خروجی برج از دو نمای مختلف



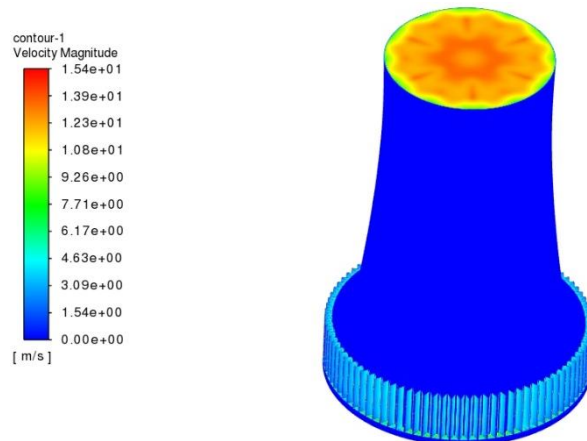
شکل ۶: توزیع سرعت جریان ورودی به پیک کولر با فن خاموش



الف) توزیع سرعت جریان در صفحه میانی پیک کولر با فن خاموش

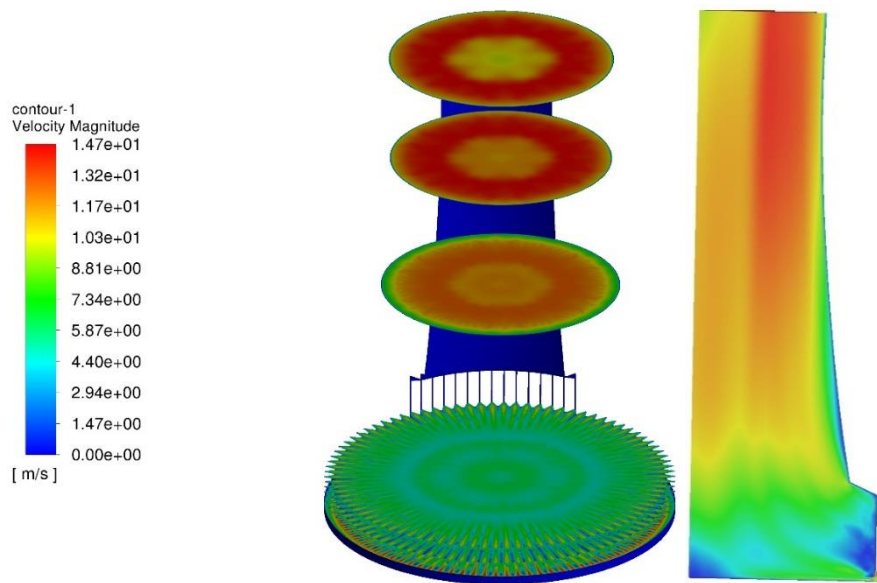


ب) توزیع سرعت جریان در صفحه عرضی عبوری از بالای پیک کولر با فن خاموش

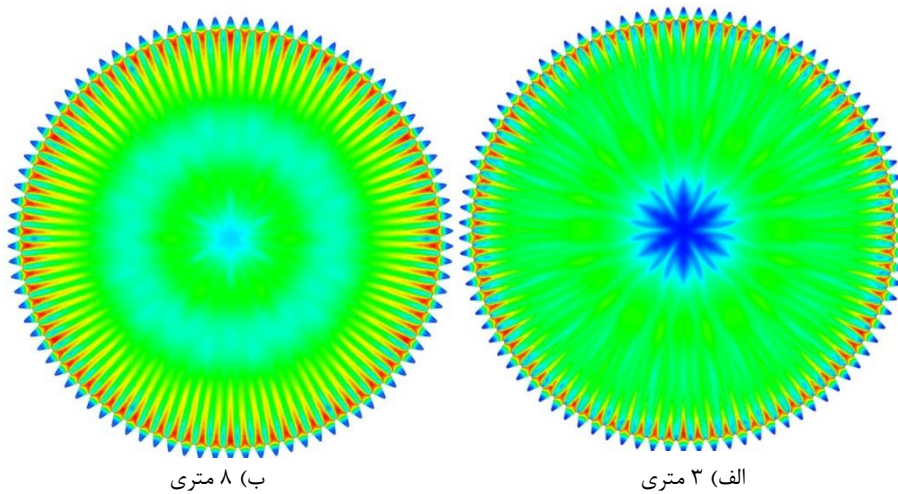


ج) توزیع سرعت جریان در خروجی برج با پیک کولر با فن خاموش

شکل ۷: توزیع سرعت جریان در صفحات عرضی

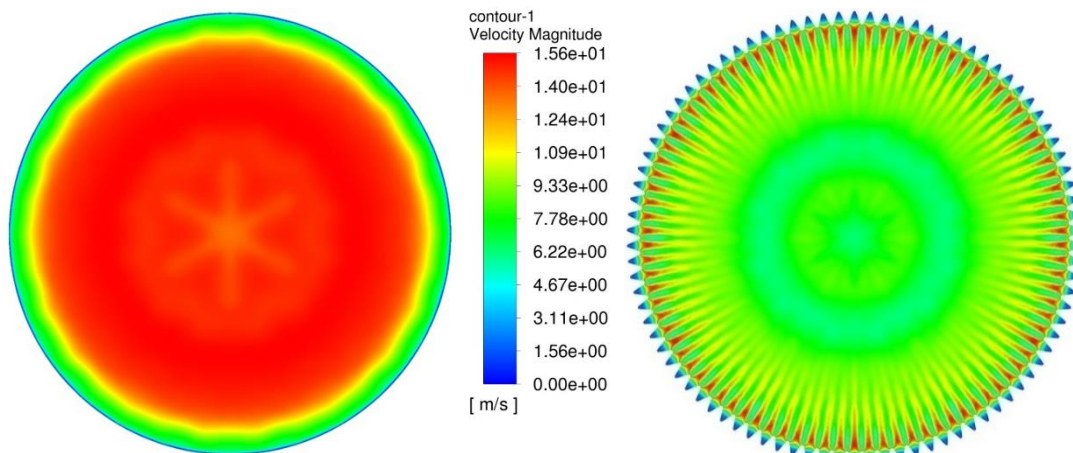


الف) توزیع سرعت جریان در صفحه میانی پیک کولر با فن خاموش
 شکل ۸: توزیع سرعت در حالت عدم وجود سازه پیک کولر در صفحات مختلف و صفحه تقارن برج



ب) ۸ متری

الف) ۳ متری



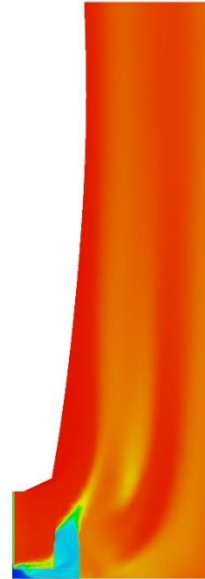
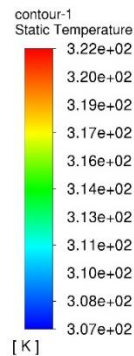
د) ۵۰ متری

ج) ۱۲ متری

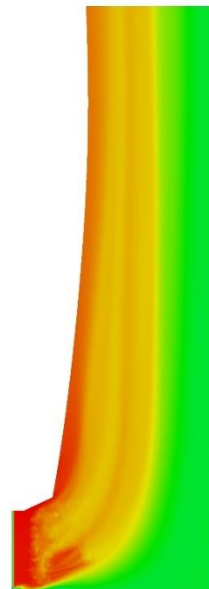
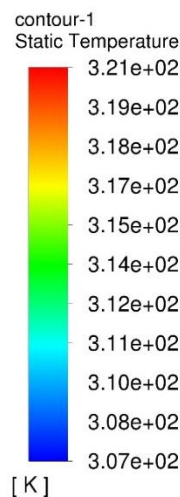
شکل ۹: توزیع سرعت در ارتفاع ۳، ۸، ۱۲ و ۵۰ متری از کف برج بدون وجود سازه پیک کولر

سازه پیک کولر وجود دارد، دمای هوای ورودی به پیک کولر از روی رادیاتورها عبور نمی‌کند و دمای هوا در آن قسمت کمتر می‌باشد. شکل ۱۱ کانتورهای فشار در دو حالت بدون سازه پیک کولر و وجود سازه پیک کولر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است وجود این سازه باعث ایجاد جریان گردابه‌های پشت پیک کولر و افت فشار پشت آن می‌شود.

شکل ۸ و شکل ۹ نتایج جریان و توزیع سرعت در صفحات مختلف داخل برج برای حالت بدون سازه پیک کولر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان داخل برج بسیار منظم می‌باشد و انتظار می‌رود دبی در این حالت بیش از حالتی باشد که سازه پیک کولر وجود دارد. شکل ۱۰ کانتورهای دما در دو حالتی که وجود و عدم وجود سازه پیک کولر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در حالتی که

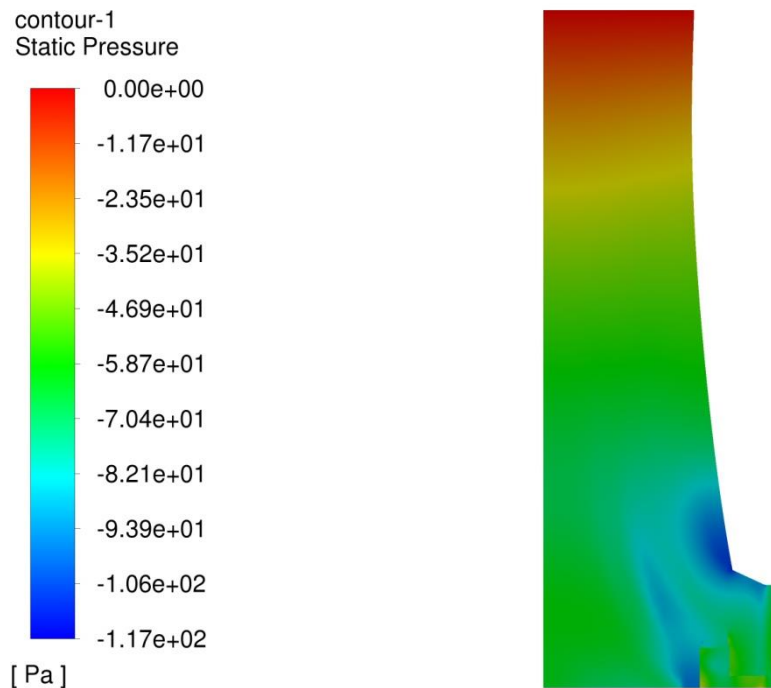


الف) توزیع دما با وجود سازه پیک کولر

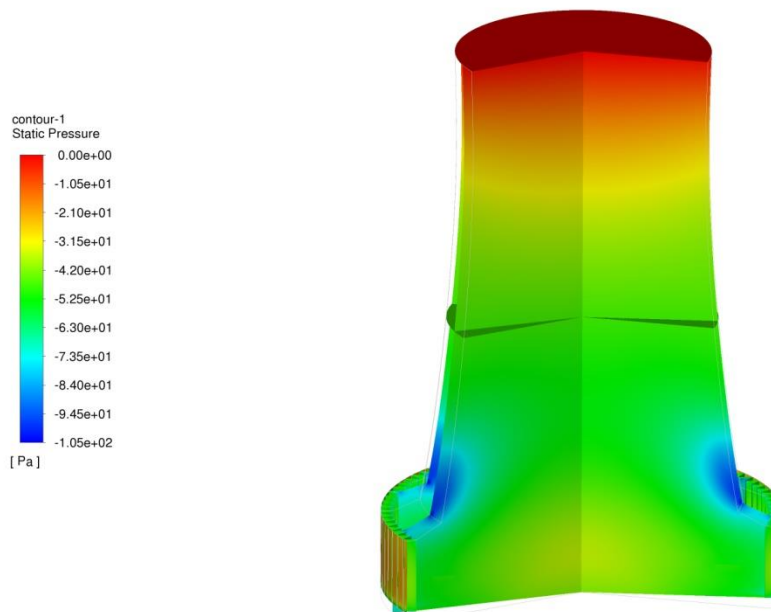


ب) توزیع دما بدون سازه پیک کولر

شکل ۱۰: توزیع دما در برج



الف) توزیع فشار با وجود سازه پیک کولر



ب) توزیع فشار بدون سازه پیک کولر

شکل ۱۱: توزیع فشار در برج

۷- نتیجه گیری

در این مقاله بر اساس ابعاد استخراج شده، مدل هندسی سه بعدی از یک سکتور تولید شده و اثر شبکه بندی ها رو دبی هوای برج به عنوان متغیر هدف، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد در محدوده ابعاد شبکه مورد بررسی، نتایج وابستگی چندانی به

شبکه بندی ندارد. در این پژوهش قطاع متقارن مورد مطالعه، بین ۸۴۴ هزار گره تا ۴ میلیون گره و به عبارتی کل هندسه برج بین ۱۲ تا ۴۸ میلیون گره، شبکه بندی ترکیبی ۴ وجهی و ۶ وجهی شده است. سازه پیک کولر، باعث ایجاد جریان گرداب های پشت پیک کولر و افت فشار پشت آن و کاهش دبی هوای برج می شود. دبی قطاع مورد شبیه سازی

-
- [17] EGI, *The Heller System*, EGI, 1984.
- [18] EGI, *Thermo Technical and Aerodynamic Design/Calculation/Characteristics of the Dry Cooling Plant System Heater*, Budapest Institute of Engineering, 1985.
- [19] S. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, CRC Press, 1980
- [15] A. Barletta, "The Boussinesq approximation for buoyant flows," *Mech. Res. Commun.*, vol. 124, 2022.
- [16] H. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Pearson Higher Ed, 2007.
- 3E (Energy, Exergy and Economical) analysis of using windbreak walls in Heller type cooling towers," *J. Clean. Prod.*, vol. 358, 2022, doi: [10.1016/j.jclepro.2022.131550](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131550).



Design and Simulation of Polycationic Nano-Linkers for Connecting Polyanions Together

Sadegh Dastorani¹, Mahmoud Shariati^{*2}, Reza Hasanzadeh Ghasemi³

1. Ph.D Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Abstract

This study presents the design and molecular dynamics (MD) simulation of novel polycationic nano-linkers for connecting polyanions. Two types of multi-branched linkers were designed, featuring a palmitic acid core and spermidine branches: one with eight spermidine branches and the other with six. The stability of these linkers was assessed over 20 nanoseconds at three different temperatures, confirming their structural integrity. To evaluate their binding capability, two polyanions—DNA origami and heparin—were selected as model systems. Following complex formation between the linkers and these polyanions, MD simulations were performed. The results demonstrated high stability in the complexes, with strong intermolecular interactions, particularly in electrostatic and van der Waals energies. The designed polycationic nano-linkers exhibited robust binding to both DNA origami and heparin, forming stable complexes without significant structural deviations. Root-mean-square deviation (RMSD) analysis confirmed structural stability across varying temperatures (300 K, 310 K, and 320 K), indicating their potential for biomedical applications under physiological conditions. Energy decomposition analysis revealed that the octa-branched linker (Linker 1) exhibited stronger interactions due to its higher number of cationic branches, while the hexa-branched linker (Linker 2) also demonstrated effective binding. These findings suggest that the proposed polycationic nano-linkers are promising candidates for connecting polyanions in applications such as targeted drug delivery, gene therapy, tissue engineering, disease diagnostics, and nanotechnology. The study highlights the importance of computational modeling in optimizing nanoscale molecular interactions for biomedical advancements.

Keywords

Polycationic Nano-Linkers
DNA Origami
Heparin
Molecular Dynamics Simulation
Spermidine.

Received: 02.18.2025

Revised: 04.08.2025

Accepted: 04.14.2025

*Corresponding Author

Mahmoud Shariati

Email

mshariati44@um.ac.ir

1- Introduction

Biological systems are rich in polyanions, including nucleic acids, glycosaminoglycans, and microtubules, which play critical roles in cellular processes. Selective binding of polyanions is essential for regulating molecular interactions, yet their similar charge densities pose challenges. While methods like using dendrimers or self-assembled structures exist, they often face limitations in structural control and tunability. This study introduces novel polycationic nanolinkers,

designed with a palmitic acid core and multiple spermidine arms, as a potential solution for bridging different polyanions. Specifically, we aimed to design and computationally evaluate two such linkers (with 8 and 6 arms) for their ability to connect DNA origami and heparin using molecular dynamics (MD) simulations. These linkers offer potential advantages in controlled architecture and biocompatibility, with prospective applications in



drug delivery, tissue engineering, and nanomedicine.

2- Research Methods

2-1 Modeling

- Linker Design:** Two linkers were designed using Avogadro software: Linker 1 (palmitic acid core, 8 spermidine arms) and Linker 2 (palmitic acid core, 6 spermidine arms). Structures were optimized using the UFF force field with Steepest Descent and Conjugate Gradient algorithms (Figure1, Figure2).

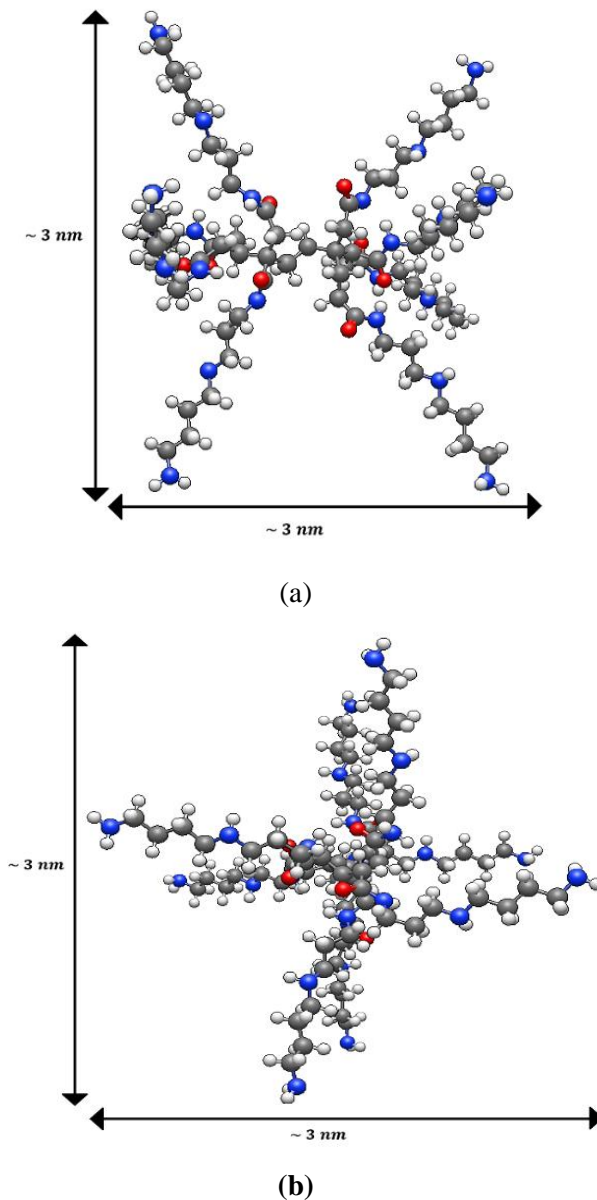


Figure1: Design of Linker 1 with eight spermidine branches in Avogadro software. a) Front view, b) Side view

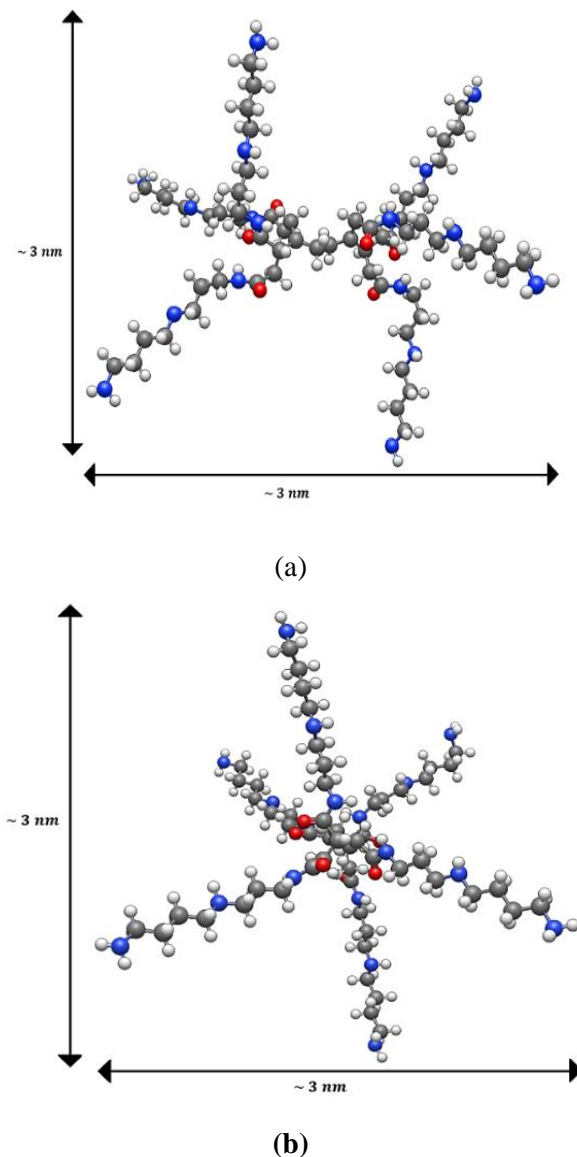


Figure2: Design of Linker 2 with six spermidine branches in Avogadro software. a) Front view, b) Side view

- DNA Origami:** A simple double-stranded DNA structure was designed using caDNAno and converted to PDB format (Figure3).

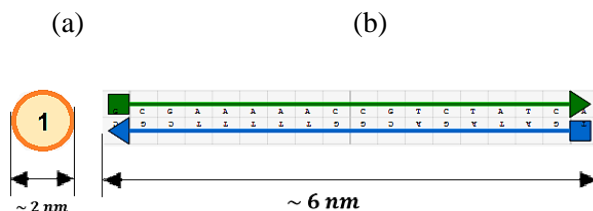


Figure3: Design of double-stranded DNA origami to custom size in caDNAno software. a) Side view, b) Front view

- Heparin:** A heparin fragment structure (PDB ID: 1HPN; $C_{54}H_{75}N_5O_{87}S_{14}$; ~ 4.5 nm) was obtained from the PDB (Figure4).

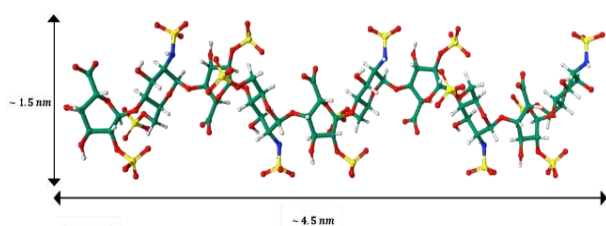
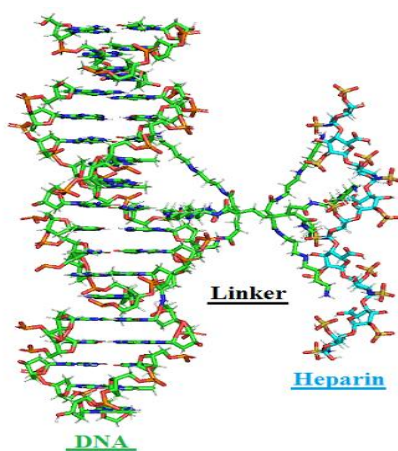
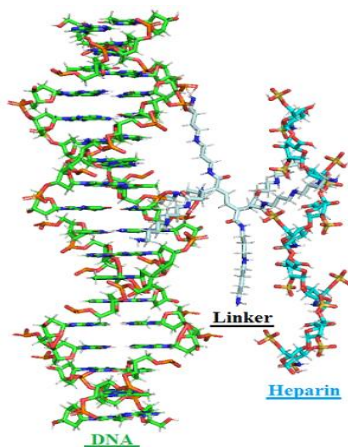


Figure4: Structure of heparin in PyMOL software

- **Complex Formation:** Two complexes were assembled for simulation: Complex 1 (DNA-Linker1-Heparin) and Complex 2 (DNA-Linker2-Heparin) (Figure5)



(a)



(b)

Figure5: Structures of six complex samples, including DNA, linkers, and heparin, before simulation in PyMOL software. a) Structure of Complex 1, b) Structure of Complex 2

2-2 Molecular Dynamics Simulation

Simulations were performed using GROMACS 2018.1 with the CHARMM36 force field. Parameters for the linkers and heparin were

generated via CGenFF. Systems were solvated in TIP3P water, neutralized with ions, and energy minimized. Following NVT/NPT equilibration (500 ps total) at 310 K and 1 bar, production MD runs were conducted for 20 ns at 300 K, 310 K, and 320 K. A 1.2 nm cutoff was used for vdW interactions, PME for electrostatics, and LINCS for bond constraints, with a 2 fs timestep.

3- Results and Discussion

- **Structural Stability:** Visual inspection and RMSD analysis over 20 ns simulations at 300 K, 310 K, and 320 K confirmed the structural stability of both individual linkers and the DNA-linker-heparin complexes. The RMSD values plateaued after initial fluctuations, indicating stable conformations were maintained across the tested temperatures. The linker arms consistently interacted closely with both DNA and heparin in the complexes (Figure6 , Figure7)

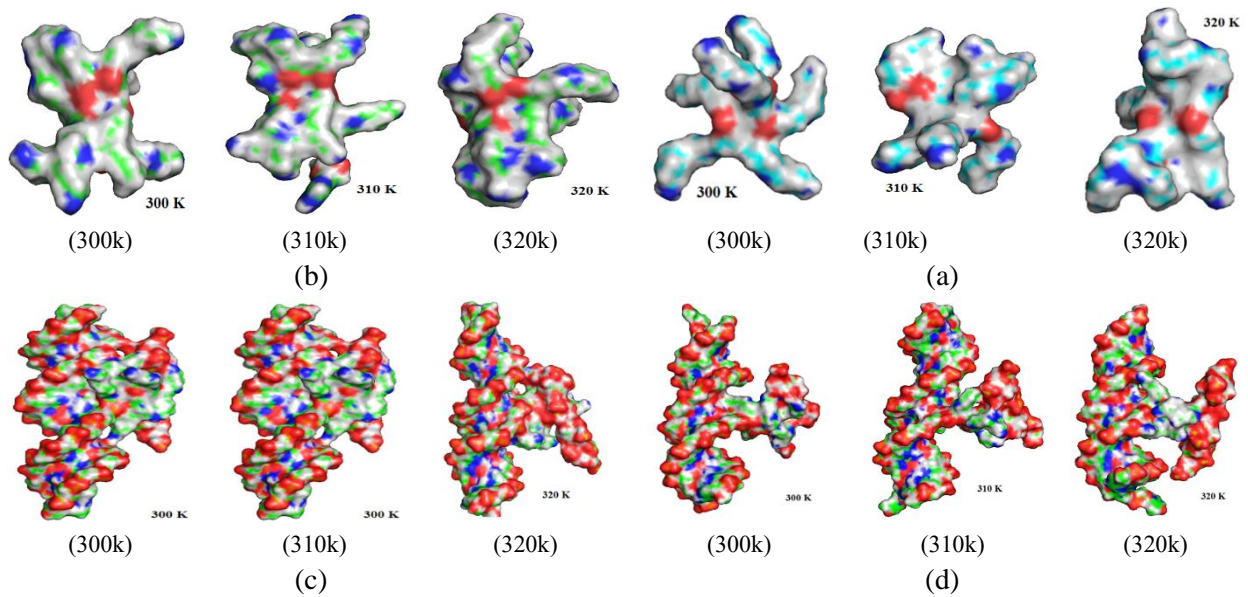


Figure6: Final structures of the complexes and Linkers after 20 ns of simulation at three different temperatures, as visualized using PyMOL software. a) Structure of Linker 1, b) Structure of Linker 2, c) Structure of Complex 1, d) Structure of Complex 2

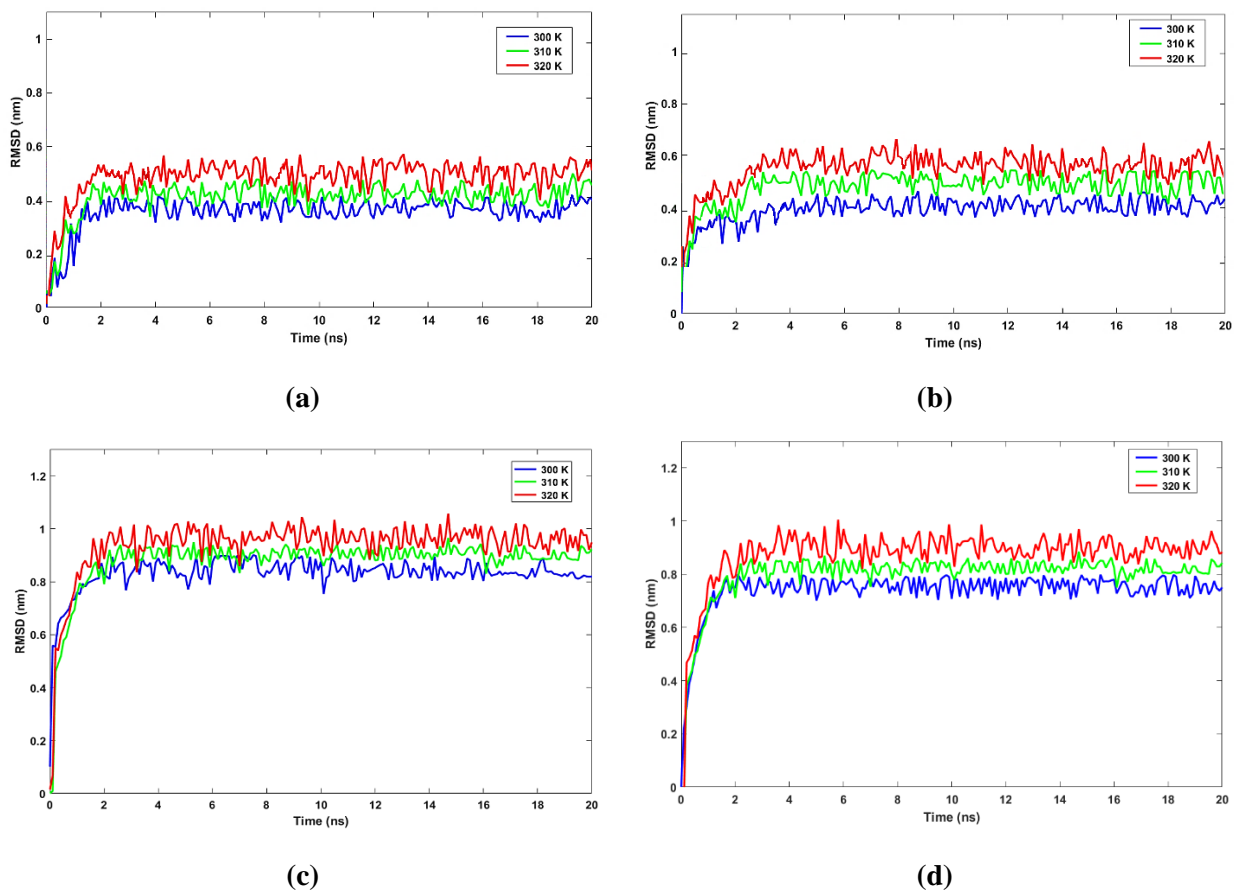
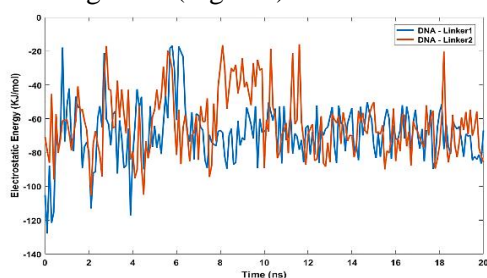


Figure7: RMSD plots of the complex and linkers samples over 20 ns and their comparison at three different temperatures. a) Structure of linker 1, b) Structure of linker 2, c) Structure of Complex 1, d) Structure of Complex 2.

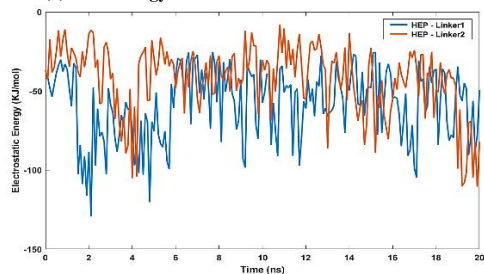
- Intermolecular Interaction Energies:** Calculations of interaction energies between the linkers and the polyanions within the complexes showed consistently negative

values for both electrostatic and van der Waals contributions, indicating strong attractive forces and stable binding. Complex 1 (8-arm linker) exhibited slightly more

negative interaction energies than Complex 2 (6-arm linker), attributable to the higher number of cationic arms, confirming stronger binding. However, both linkers demonstrated effective bridging capabilities, with electrostatic interactions being the dominant driving force (Figure8).



(a) Elec. energy between DNA and Linkers 1 and 2



(b) Elec. energy between Heparin and Linkers 1 and 2

Figure8: Comparison of electrostatic energy diagrams over a 20 ns simulation for complexes 1, 2

- **Comparison with Previous Studies:** The strong, stable binding observed suggests these rationally designed linkers are competitive with other polycationic systems like dendrimers or self-assembled structures used for polyanion binding. The key potential advantages are the defined, tunable architecture and use of biocompatible building blocks (palmitic acid, spermidine)

4- Conclusion and Future Perspectives

This computational study successfully demonstrated the design and stability of novel palmitic acid-spermidine based polycationic nanolinkers capable of stably bridging DNA origami and heparin. MD simulations confirmed

structural integrity and strong intermolecular interactions across relevant temperatures. The 8-arm linker showed slightly stronger binding than the 6-arm linker.

These findings highlight the potential of these nanolinkers as tools for connecting polyanions in various biomedical applications. Future work should involve experimental synthesis and biophysical characterization to validate these results. Potential applications include targeted drug delivery, gene therapy, tissue engineering, and biosensing.

5- References

- [1] L. S. Jones, B. Yazzie, and C. R. Middaugh, "Polyanions and the Proteome," *Mol. Cell. Proteomics*, vol. 3, no. 8, pp. 746–769, 2004, doi: [10.1074/mcp.r400008-mcp200](https://doi.org/10.1074/mcp.r400008-mcp200).
- [2] R. Srinivas, S. Samanta, and A. Chaudhuri, "Cationic amphiphiles: promising carriers of genetic materials in gene therapy," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 38, no. 12, p. 3326, 2009, doi: [10.1039/b813869a](https://doi.org/10.1039/b813869a).
- [3] S. M. Bromfield, E. Wilde, and D. K. Smith, "Heparin sensing and binding – taking supramolecular chemistry towards clinical applications," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 42, no. 23, p. 9184, 2013, doi: [10.1039/c3cs60278h](https://doi.org/10.1039/c3cs60278h).
- [4] T. Sørensen, S. Leeb, J. Danielsson, and M. Oliveberg, "Polyanions Cause Protein Destabilization Similar to That in Live Cells," *Biochemistry*, vol. 60, no. 10, pp. 735–746, 2021, doi: [10.1021/acs.biochem.0c00889](https://doi.org/10.1021/acs.biochem.0c00889).
- [5] "Chapter 4 Negatively Charged Polymers (Polyanions)," in *Developments in Soil Science*, vol. 9, pp. 95–108, 1979, doi: [10.1016/s0166-2481\(08\)70115-6](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)70115-6).
- [6] E. Oduah, R. Linhardt, and S. Sharfstein, "Heparin: Past, Present, and Future," *Pharmaceuticals*, vol. 9, no. 3, p. 38, 2016, doi: [10.3390/ph9030038](https://doi.org/10.3390/ph9030038).



طراحی و شبیه‌سازی نانو لینکرهای پلی کاتیونی برای اتصال پلی آنیون‌ها به یکدیگر

صادق دستورانی^۱، محمود شریعتی^{۲*}، رضا حسن‌زاده قاسمی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

چکیده

در این مقاله، نانولینکرهای پلی کاتیونی جدیدی برای اتصال پلی آنیون‌ها طراحی و با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بررسی شده‌اند. دو نوع لینکر چندشاخه‌ای با هسته مرکزی اسید پالمیتیک و شاخه‌های اسپریمیدین طراحی و بهینه‌سازی شدند: یکی با هشت شاخه و دیگری با شش شاخه اسپریمیدین. پایداری این لینکرها در سه دمای مختلف طی ۲۰ نانوثانیه شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که هر دو ساختار پایدار باقی می‌مانند. به منظور ارزیابی قابلیت اتصال این لینکرها، پلی آنیون‌های DNA اریگامی و هپارین به عنوان نمونه انتخاب شدند. پس از تشکیل کمپلکس میان لینکرها و این ساختارها، شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی انجام شد. نتایج نشان داد که کمپلکس‌ها از پایداری بالایی برخوردارند و تعاملات بین مولکولی قوی، به ویژه در انرژی‌های الکترواستاتیک و واندروالس، مشاهده شد. به طور کلی، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که نانولینکرهای پلی کاتیونی پیشنهادی پتانسیل بالایی برای اتصال و تثبیت پلی آنیون‌ها دارند و می‌توانند در حوزه‌هایی مانند دارورسانی هدفمند، ژن درمانی، مهندسی بافت، تشخیص بیماری و نانو فناوری مورد استفاده قرار گیرند.

کلمات کلیدی

نانو لینکر پلی کاتیونی
DNA اریگامی
هپارین
شبیه‌سازی دینامیک مولکولی
اسپریمیدین.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

*نویسنده مسئول

محمود شریعتی

ایمیل

mshariati44@um.ac.ir

۱- مقدمه

سیگنالینگ سلولی و تشکیل ماتریکس خارج سلولی نقش دارد [۳ و ۲]. با این وجود، گزینش پذیری این برهم‌کنش‌ها به دلیل شباهت بالای چگالی بار و ماهیت الکترواستاتیکی آن‌ها چالش برانگیز است. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که تفکیک و شناسایی پلی آنیون‌های مختلف دشوار باشد [۴ و ۵]. از دیدگاه شیمی فرا مولکولی و مقیاس نانو، توسعه روش‌هایی برای افزایش گزینش پذیری این اتصالات می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌هایی مانند دارورسانی، مهندسی بافت و نانو فناوری داشته باشد.

به عنوان دو نمونه مهم از پلی آنیون‌ها، هپارین و DNA اریگامی توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند. هپارین، که به عنوان یک داروی ضد انعقاد و پلی آنیون زیستی شناخته می‌شود [۸-۶]، کاربرد گسترده‌ای در درمان بیماری‌های قلبی عروقی [۱۱-۹]،

دنیای زیست‌شناسی، دنیایی سرشار از مولکول‌های باردار منفی، یا پلی آنیون‌هاست. این مولکول‌ها، شامل اسیدهای نوکلئیک، گلیکوزآمینوگلیکان‌ها، پروتئوگلیکان‌ها، میکروتوبول‌ها و غشاءها، نقش‌های حیاتی در فرآیندهای بیولوژیکی ایفا می‌کنند [۱]. بنابراین، تمایز دقیق بین این گونه‌های نانومقیاس در تنظیم و کنترل عملکرد دنیای پلی آنیونی از اهمیت بالایی برخوردار است.

با این حال، اتصال گزینشی پلی آنیون‌ها به یکدیگر، با توجه به نقش حیاتی آن‌ها در فرآیندهای بیولوژیکی، اهمیت ویژه‌ای دارد. این اتصالات می‌توانند ساختار و عملکرد مولکول‌ها را تحت تأثیر قرار داده و برهم‌کنش‌های آن‌ها را تنظیم کنند. برای مثال، اتصال DNA، به پروتئین‌های، خاص در تنظیم بیان ژن مؤثر است، درحالی‌که اتصال گلیکوزآمینوگلیکان‌ها مانند هپارین به پروتئین‌ها، در فرآیندهایی مانند



فرا مولکولی، می‌تواند به توسعه سیستم‌هایی منجر شود که با دقت بالاتر در فرآیندهای زیست‌پزشکی مداخله کرده و برای کاربردهای درمانی خاص بهینه شوند [۳۰]. در این راستا، پژوهش حاضر با طراحی نانولینکرهای پلی‌کاتیونی جدید، مبتنی بر هسته اسید پالمیتیک و شاخه‌های کاتیونی اسپرمیدین، رویکردی متفاوت ارائه می‌دهد. این نانولینکرها دارای مزایایی همچون امکان کنترل دقیق تعداد شاخه‌ها، پایداری حرارتی در محدوده دمایی مختلف، قابلیت اتصال هم‌زمان به چندین پلی‌آنیون مختلف (DNA اریگامی و هپارین) و ایجاد برهم‌کنش‌های قوی‌تر (انرژی‌های الکترواستاتیکی و واندروالس منفی‌تر) هستند. چنین سیستم‌هایی می‌توانند در زمینه‌هایی نظیر دارورسانی هدفمند، داروسازی، طراحی مواد زیست‌سازگار و تشخیص بیماری‌های مختلف نقش مهمی ایفا کنند.

بنابراین، در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی نانولینکرهای کاتیونی جدید با هدف اتصال پلی‌آنیون‌ها به یکدیگر انجام شده است. این نانولینکرها با ساختاری بهینه و پایداری بالا طراحی شده‌اند تا بتوانند به‌طور مؤثری پلی‌آنیون‌ها را به هم متصل کنند. در همین راستا، دو نوع نانولینکر جدید با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی طراحی و بررسی شده‌اند. علاوه بر این، برای ارزیابی عملکرد این نانولینکرها در اتصال پلی‌آنیون‌های مختلف، دو کمپلکس جدید نیز ایجاد و شبیه‌سازی شده‌اند که شامل اتصال این نانولینکرها به دو پلی‌آنیون مهم، یعنی هپارین و DNA اریگامی، هستند. نتایج شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی نشان می‌دهد که این نانولینکرها نقش قابل توجهی در اتصال این دو پلی‌آنیون داشته و به تشکیل کمپلکس‌های پایدار کمک می‌کنند. در ادامه مقاله، مدل‌سازی و تحلیل پایداری این نانولینکرها، نحوه اتصال آن‌ها به پلی‌آنیون‌ها، نتایج شبیه‌سازی کمپلکس‌های DNA اریگامی-لینکر-هپارین و بررسی انرژی‌های برهم‌کنش بین مولکولی ارائه خواهد شد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند گامی مؤثر در توسعه سیستم‌های نانو زیستی هوشمند و کاربردهای پیشرفته در پزشکی و مهندسی زیستی باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش به بررسی مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیک مولکولی پرداخته می‌شود.

۲-۱- مدل‌سازی

این بخش شامل چهار قسمت است. در بخش اول، نحوه مدل‌سازی لینکرها تشریح می‌گردد. در بخش دوم، ساختار DNA اریگامی

جلوگیری از لخته شدن خون [۱۲ و ۱۳]، و کاهش التهاب و عفونت دارد [۱۴-۱۷]. علاوه بر این، پتانسیل بالایی برای توسعه روش‌های جدید مقابله با بیماری‌های ویروسی نشان داده است [۲۱-۱۸]. در مقابل، DNA اریگامی یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های مقیاس نانو در سال‌های اخیر محسوب می‌شود که امکان طراحی و ساخت نانوساختارهای پیچیده و دقیق را فراهم می‌کند [۲۲]. این فناوری، به دلیل انعطاف‌پذیری و قابلیت کنترل بالا، در حوزه‌های مختلف علمی و پزشکی کاربرد یافته است [۲۴ و ۲۳]. ویژگی‌های منحصر به فرد DNA اریگامی، از جمله امکان طراحی ساختارهای متنوع، پایداری بالا، و قابلیت بارگذاری مولکول‌های زیستی و دارویی، آن را به ابزاری ارزشمند در تحقیقات زیستی و پزشکی تبدیل کرده است [۲۶ و ۲۵]. ترکیب این دو مولکول، یعنی هپارین و DNA اریگامی، به‌عنوان یک راهکار نوآورانه برای توسعه نانوساختارهای ضدویروسی مطرح شده است [۲۸ و ۲۷]. همچنین، این ترکیب می‌تواند در زمینه‌هایی نظیر دارورسانی هدفمند، داروسازی، ژن درمانی، مهندسی بافت، مهندسی سطح سلولی، تشخیص بیماری‌ها و طراحی مواد زیست‌سازگار مورد استفاده قرار گیرد.

در حال حاضر، بسیاری از مطالعات بر روی اتصال یک پلی‌آنیون خاص برای کاربردهای مشخص، مانند انتقال ژن با DNA یا کنترل انعقاد با هپارین، متمرکز شده‌اند [۲۹]. در این راستا، پژوهش‌های پیشین عمدتاً دو دسته از نانوساختارهای کاتیونی را مورد بررسی قرار داده‌اند: دندیرهای پلی‌آمیدوآمین، که برای خنثی‌سازی هپارین در کاربردهای ضد انعقادی استفاده شده‌اند [۷]، و نانوساختارهای چندظرفیتی خودسامان‌یافته، که تأثیر کایرالیته بر برهم‌کنش با پلی‌آنیون‌ها را بررسی کرده‌اند [۴۵]. اگرچه این مطالعات بینش‌های ارزشمندی ارائه داده‌اند، اما با محدودیت‌هایی همچون تنوع ساختاری محدود دندیرهای متداول، دشواری تنظیم خصوصیات سطحی آن‌ها و کنترل‌پذیری پایین آرایش فضایی در سیستم‌های خودسامان‌یافته مواجه هستند. از این‌رو، توسعه راهکارهای کارآمد در این حوزه‌ها نه تنها از اهمیت بالینی بالایی برخوردار است، بلکه می‌تواند چالش‌های موجود را برطرف کرده و راه را برای بهینه‌سازی کاربردهای زیست‌پزشکی هموار سازد.

باین حال، هنوز به‌خوبی مشخص نیست که چه عواملی بر انتخاب این اتصالات تأثیر دارند و چگونه ویژگی‌های مولکولی پلی‌آنیون‌ها می‌توانند بر تمایل آن‌ها به برهم‌کنش با یک گیرنده خاص اثر بگذارند. بررسی دقیق این عوامل، علاوه بر رفع چالش‌های طراحی در شیمی

آووگادرو^۳ (نسخه ۱/۲/۰) انجام گردید تا ساختار نهایی لینکرها به شکلی مطلوب و بهینه برای کاربردهای موردنظر برسد. بهینه‌سازی ساختارها در آووگادرو امکان انتخاب بهترین پیکربندی‌های ممکن را فراهم آورد که هم از لحاظ انرژی پایدار بوده و هم در فرآیندهای بیولوژیکی کارآمد عمل کنند. هدف از این طراحی، ایجاد لینکرهایی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد و توانایی بالاتر در اتصال به مولکول‌های DNA و هپارین بود.

به‌طور خاص، برای بهینه‌سازی ساختار لینکرها از میدان نیروی UFF^۴ استفاده گردید. این نوع میدان نیرو در مقالات مختلف برای چنین کاربردهایی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۶ و ۳۷]. میدان نیروی UFF یک میدان نیروی محاسباتی همه‌منظوره است که توانایی بازتولید ساختارهای مولکولی و بلوری را برای تقریباً تمام عناصر جدول تناوبی دارد. این میدان نیرو به‌طور خاص برای بهینه‌سازی هندسه مولکولی طراحی شده و در مدل‌سازی مواد معدنی و آلی فلزی عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. برای بهینه‌سازی ساختار هر لینکر، از ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی تندترین شیب^۵ و گرادیان مزدوج^۶ استفاده شد و گام‌های بهینه‌سازی به مدت ۱۵,۰۰۰ سیکل برای هر مدل مولکولی اعمال گردید تا فاصله‌های اتمی نزدیک کاهش یابد و ساختار بهینه‌ای حاصل شود. روش تندترین شیب که سریع‌ترین روش برای شروع فرآیند بهینه‌سازی است، به‌منظور کاهش سریع انرژی سیستم به کار رفت، درحالی‌که روش گرادیان مزدوج برای دستیابی به دقت بیشتر در مراحل بعدی و بهینه‌سازی دقیق‌تر استفاده شد. این ترکیب از روش‌ها به‌منظور دستیابی به نتایج مؤثر در کاهش انرژی پتانسیل سیستم و اصلاح ساختار هندسی مولکول‌ها به کار گرفته شد.

مدل‌سازی می‌شود. در بخش سوم، روش دسترسی به مولکول هپارین شرح داده خواهد شد. در نهایت، در بخش چهارم، نحوه مدل‌سازی کمپلکس این ساختارها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱-۱-۲ مدل‌سازی لینکرها

طراحی لینکرهای پلی‌کاتیونی به دلیل توانایی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها در اتصال و برقراری تعاملات قوی با مولکول‌های باردار منفی مانند DNA و پروتئین‌ها، در سال‌های اخیر به یک حوزه جذاب و موردتوجه محققان تبدیل شده است [۳۵-۳۱]. این لینکرها به‌عنوان پل‌های ارتباطی عمل می‌کنند که قادرند مولکول‌های آنیونی را به یکدیگر متصل کرده و تعاملات مولکولی را تسهیل کنند. با توجه به این قابلیت‌ها، طراحی این لینکرها بر اساس اصول و ساختارهایی که در مقالات علمی مختلف بیان شده‌اند، امکان‌پذیر است. در پژوهش‌های اخیر، ساختارهای متنوعی برای لینکرهای پلی‌کاتیونی ارائه شده که هر کدام با توجه به ویژگی‌های خاص خود، در کاربردهای مختلف بیولوژیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، طراحی لینکرهای پلی‌کاتیونی با الگوبرداری از این مقالات، امکان ایجاد ساختارهایی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد و کاربردهای متنوع را فراهم می‌آورد، که می‌تواند به پیشرفت‌های قابل‌توجهی در حوزه‌های بیوتکنولوژی و داروسازی منجر شود.

در این مقاله، دو لینکر جدید با چندین لیگاند اسپرمیدین^۱ و به مرکزیت لیگاند اسید پالمیتیک^۲ طراحی و بهینه‌سازی شده است. لینکر ۱ از هشت شاخه اسپرمیدین به مرکزیت اسید پالمیتیک (شکل ۱) و لینکر ۲ از شش شاخه اسپرمیدین و به مرکزیت اسید پالمیتیک (شکل ۲) طراحی و بهینه‌سازی شد. این طراحی‌ها با استفاده از نرم‌افزار

^۴ Universal force field

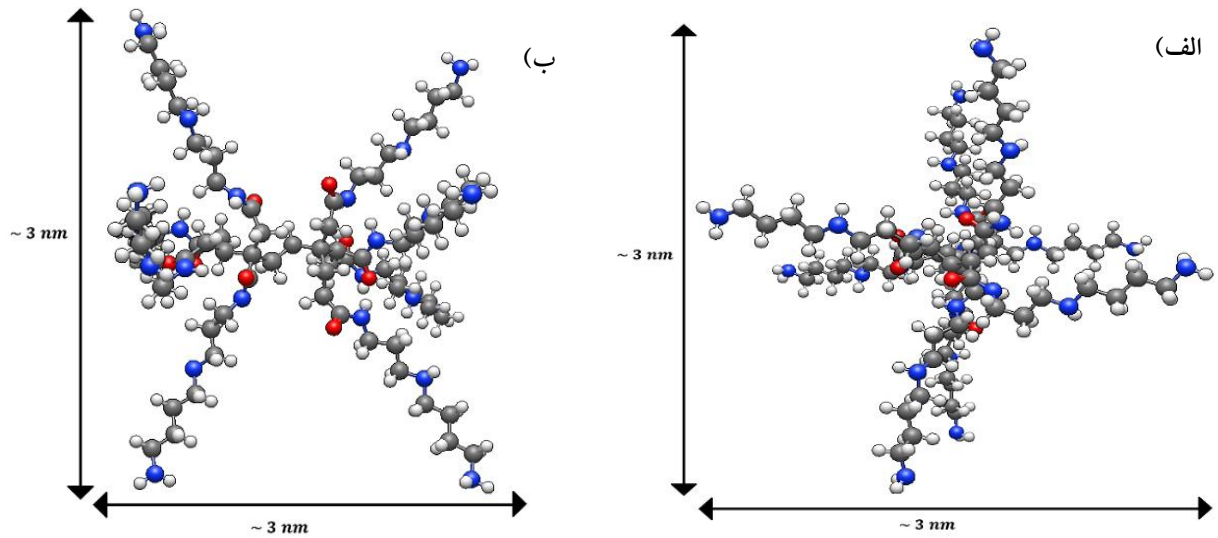
^۵ Steepest descent

^۶ Conjugate gradient

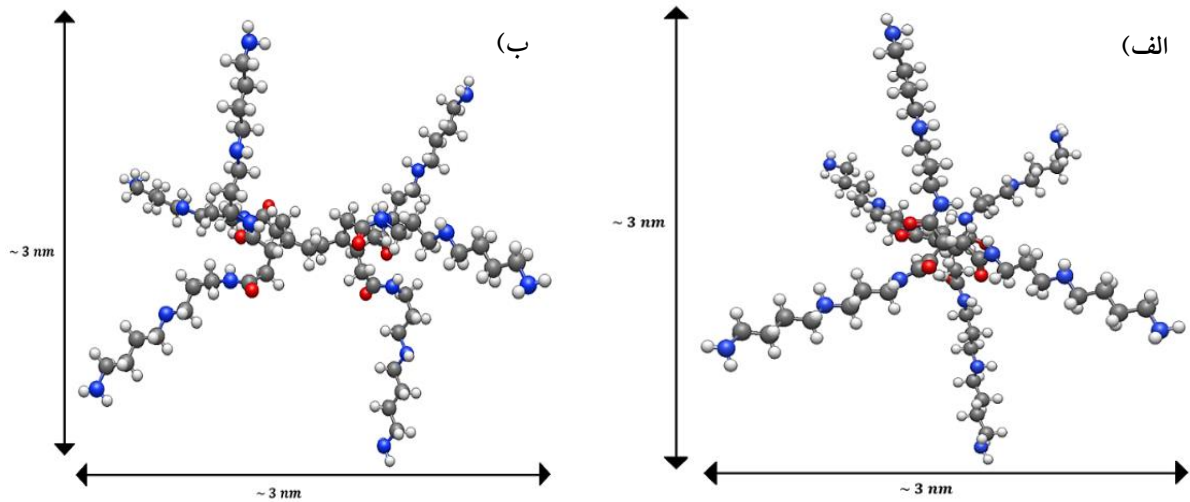
^۱ Spermidine ligand

^۲ Palmitic acid ligand

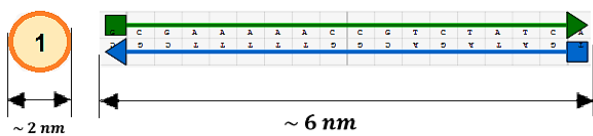
^۳ Avogadro



شکل ۱: طراحی لینکر ۱ با هشت شاخه اسپرمیدین در نرم‌افزار آوگادرو (الف) نمای روبرو (ب) نمای جانب



شکل ۲: طراحی لینکر ۲ با شش شاخه اسپرمیدین در نرم‌افزار آوگادرو (الف) نمای روبرو (ب) نمای جانب



شکل ۳: طراحی DNA اریگامی دو رشته‌ای به سبب دلخواه در نرم‌افزار کدنانو. (الف) نمای روبرو (ب) نمای جانب

۲-۱-۳- مولکول هپارین

در این مقاله مولکول هپارین از سایت PDB² و با کد 1HPN دانلود شده است [۴۱]. هپارین‌ها پلی‌ساکاریدهای خطی^۳ هستند که از واحدهای تکراری دی‌ساکاریدی^۴ تشکیل شده‌اند. برای بررسی دقیق‌تر

۲-۱-۲- مدل‌سازی DNA اریگامی

ساختار دو رشته‌ای ساده DNA ابتدا در نرم‌افزار کدنانو^۱ [۳۸] مانند شکل ۳ ترسیم شده است و خروجی نهایی این ساختار در این نرم‌افزار به فرمت JSON است. سپس برای ایجاد کمپلکس و انجام شبیه‌سازی نیاز به فرمت PDB می‌باشد. برای تبدیل این ساختار به فرمت PDB از سایت‌های Oxview^{۳۹} [۳۹] و Tacodna^{۴۰} [۴۰] استفاده شده است.

³ Linear polysaccharides

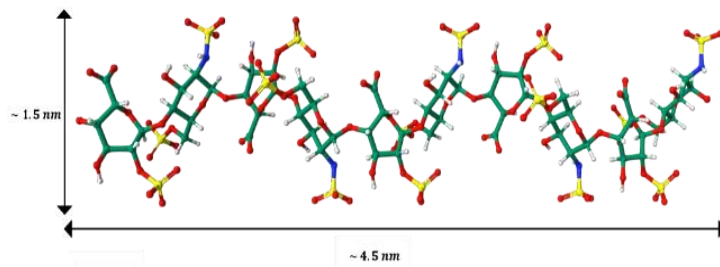
⁴ Disaccharide

¹ Cadnano

² Protein data bank

مقاله، از فرمول $C_{54}H_{75}N_5O_{87}S_{14}$ برای مولکول هپارین استفاده شده است.

تعاملات بین لینکرها و DNA، طول این مولکول هپارین به‌طور تقریبی ۴/۵ نانومتر^۱ در نظر گرفته شده است (شکل ۴). به عبارتی در این

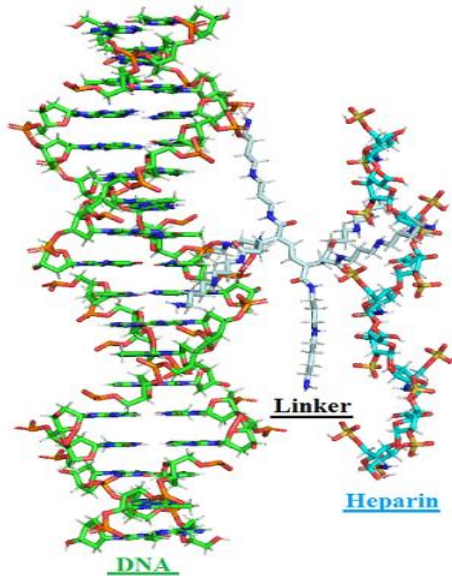


شکل ۴: ساختار هپارین [۴۱] در نرم‌افزار پایمول

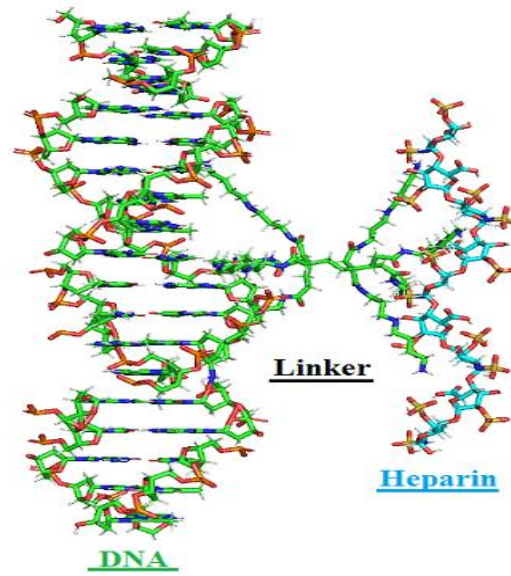
از ترکیب DNA، لینکر ۱ و هپارین (شکل ۵-الف) و کمپلکس ۲ از ترکیب DNA، لینکر ۲ و هپارین (شکل ۵-ب) تشکیل شده است. هدف از ایجاد این دو کمپلکس، بررسی اتصالات لینکرها بین پلی آنیون‌ها و ارزیابی پایداری آن‌ها در دماهای مختلف است.

۲-۱-۴- کمپلکس‌ها

در این مقاله، با ترکیب ساختار ساده DNA اریگامی، لینکرهای متصل‌کننده و هپارین، دو نمونه کمپلکس مختلف برای اتصال این پلی‌آنیون‌ها به یکدیگر ایجاد شده است. به‌طور مشخص، کمپلکس ۱



ب) کمپلکس ۲



الف) کمپلکس ۱

شکل ۵: ساختارهای دو نمونه کمپلکس شامل DNA، لینکرها و هپارین قبل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار پایمول

۲۰۱۸/۱ و میدان نیروی CHARMM36^۳ انجام شد. به خاطر نبود میدان نیروی مناسب برای لینکرهای طراحی شده و هپارین در نرم‌افزار گرومکس، قبل از انجام شبیه‌سازی، فایل‌های مورد نیاز برای میدان نیروی CHARMM36 از سایت CGenFF^۴ [۴۲] استخراج و استفاده شد. میدان نیروی CHARMM36 یکی از مدل‌های پرکاربرد در شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی است که به‌ویژه برای سیستم‌های زیستی شامل پروتئین‌ها، لیپیدها، و اسیدهای نوکلئیک مناسب است.

۲-۲- شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

برای تحلیل ساختاری لینکرها و بررسی تعاملات انرژی‌های الکترواستاتیک و واندروالسی در دو کمپلکس ایجاد شده، از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی استفاده شد. این روش به ما امکان می‌دهد تا رفتار دینامیکی سیستم‌ها را در سطح اتمی بررسی کرده و به درک عمیق‌تری از ارتباطات میان مولکول‌ها دست یابیم. تمام شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی با استفاده از گرومکس^۲ نسخه

³ Chemistry at harvard macromolecular mechanics (version 36)

⁴ Charmm general force field

¹ Nanometer (nm)

² Gromacs

$$E_{\text{angle}} = \sum_{\text{angles}} k_{\theta} (\theta - \theta_0)^2 \quad (4)$$

درنهایت، انرژی کل سیستم به صورت مجموع انرژی‌های الکترواستاتیک، واندروالسی و پیوندی محاسبه می‌شود:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{elec}} + E_{\text{vdw}} + E_{\text{bonded}} + E_{\text{angle}} \quad (5)$$

این روابط برای محاسبه دقیق انرژی‌های مختلف سیستم و تحلیل برهم‌کنش‌های مولکولی به کار می‌روند [۴۴].

ابتدا لینکرها به صورت جداگانه در یک جعبه مکعب مستطیل شکل به ابعاد $6 \times 6 \times 6$ نانومتر قرار گرفتند و سپس کمپلکس‌ها نیز به صورت جداگانه در یک جعبه مکعب مستطیل شکل به ابعاد $10 \times 10 \times 12$ نانومتر قرار گرفتند. برای پر کردن جعبه‌ها از مدل آب TIP3P برای شبیه‌سازی به‌عنوان حلال استفاده شد. سپس جهت حصول اطمینان از خنثی بودن محلول، یون‌های سدیم و کلرید به سیستم‌ها اضافه شدند. انرژی سیستم‌ها با استفاده از تندترین شیب به حداقل رسید. شعاع برش $1/2^3$ نانومتر برای برهم‌کنش‌های واندروالس در نظر گرفته شد. PME^4 برای محاسبه برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک استفاده شد. گام زمانی در تمام شبیه‌سازی‌ها ۲ فمتوثانیه بود. تمامی اتصالات به‌وسیله الگوریتم LINCS محدود شدند. سپس هر سیستم برای مدت ۵۰۰ پیکوثانیه (۲۵۰ پیکوثانیه NVT و ۲۵۰ پیکوثانیه NPT) با استفاده از الگوریتم Vrescale و Parrinello-Rahman در دمای ۳۱۰ کلوین و فشار ۱ بار، با مقید شدن تمام اتم‌های سنگین (تمام اتم‌ها به‌جز هیدروژن) به تعادل رسید. سپس، در گام بعدی شبیه‌سازی دینامیک مولکولی در مدت زمان ۲۰ نانوثانیه و در سه دمای ۳۰۰، ۳۱۰ و ۳۲۰ کلوین برای هر دو لینکر و دو کمپلکس انجام شد.

۳- نتایج و بحث

برای بررسی پایداری ساختاری، لینکرها و کمپلکس‌ها به مدت ۲۰ نانوثانیه در سه دمای مختلف شبیه‌سازی دینامیک مولکولی شدند. ساختار نهایی آن‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که لینکرها و کمپلکس‌ها پایداری ساختاری قابل‌توجهی را نشان می‌دهند و دچار جدایش قابل‌توجهی نشده‌اند. تصاویر نشان‌دهنده فاصله نزدیک بین مولکول‌ها هستند که برهم‌کنش‌های قوی بین اجزای کمپلکس‌ها را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر این

این میدان نیرو به دلیل دقت بالای آن در توصیف برهم‌کنش‌های مولکولی، به‌طور گسترده در مطالعات بیولوژیکی و شبیه‌سازی‌های مولکولی استفاده می‌شود. در این مطالعه، از CHARMM36 برای شبیه‌سازی سیستم‌ها استفاده شد که ویژگی‌های کلیدی آن شامل پارامترهای پیوندی و غیرپیوندی است. انرژی‌های پیوندی شامل پیوندها، زوایا، و پیچش‌های دیهدرال هستند که با معادلات هارمونیک و غیرهارمونیک محاسبه می‌شوند. همچنین، برهم‌کنش‌های غیرپیوندی مانند برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک و واندروالسی با استفاده از پتانسیل لنارد-جونز^۱ و قانون کولن^۲ مدل‌سازی می‌شوند. پارامترهای اختصاصی برای مولکول‌های زیستی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها در میدان نیرو وجود دارد که تعادل ساختاری و دینامیکی آن‌ها را بهبود می‌بخشد. همچنین، این میدان نیرو با مدل حلال ضمنی و صریح مانند TIP3P سازگار است، که به‌ویژه برای شبیه‌سازی‌های زیستی بسیار مفید است. برای محاسبه انرژی‌های برهم‌کنشی در این شبیه‌سازی‌ها، از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های مختلف استفاده می‌شود [۴۳]. انرژی الکترواستاتیک به‌وسیله قانون کولن محاسبه می‌شود که رابطه آن به صورت زیر است:

$$E_{\text{elec}} = \sum_{i < j} \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_{ij}} \quad (1)$$

در این رابطه، q_i و q_j بارهای اتمی هستند، r_{ij} فاصله بین اتم‌ها و ϵ_r ثابت دی‌الکتریک مؤثر است. انرژی واندروالسی نیز با استفاده از پتانسیل لنارد-جونز مدل‌سازی می‌شود که رابطه آن به صورت زیر است:

$$E_{\text{vdw}} = \sum_{i < j} \left(\frac{A_{ij}}{r_{ij}^{12}} - \frac{B_{ij}}{r_{ij}^6} \right) \quad (2)$$

که در آن A_{ij} و B_{ij} پارامترهای میدان نیرو برای هر جفت اتم هستند. انرژی پیوندی نیز شامل انرژی پیوندها، زوایا، و پیچش‌های دیهدرال است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{\text{bond}} = \sum_{\text{bonds}} k_b (r - r_0)^2 \quad (3)$$

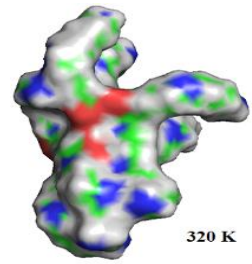
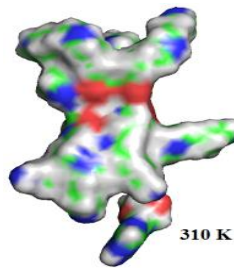
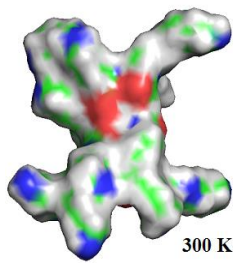
³ Cutoff

⁴ Ewald mesh particle

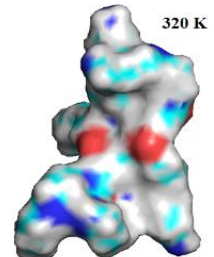
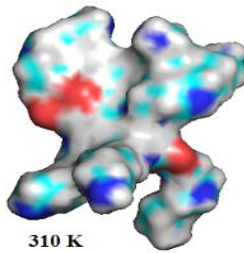
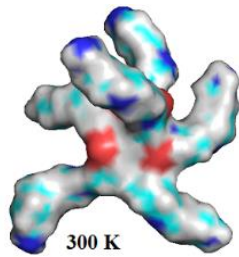
¹ Lennard-jones

² Coulomb's law

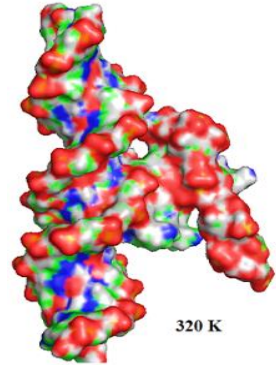
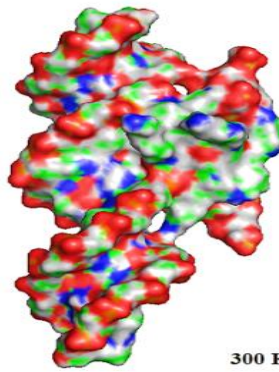
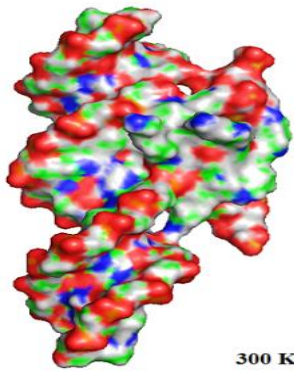
موضوع، تحلیل‌های تعاملی انرژی‌های الکترواستاتیک و واندروالس در ادامه انجام شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌گردد...



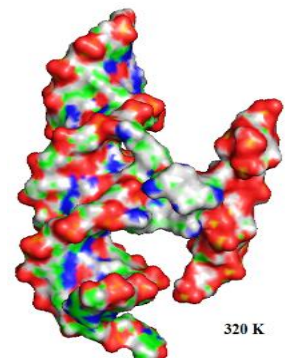
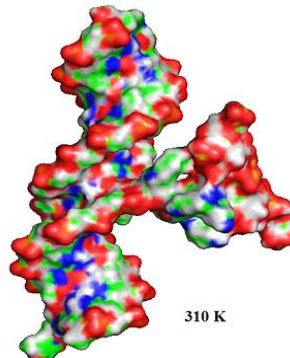
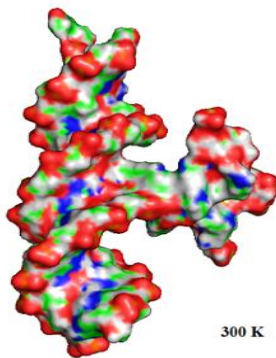
الف) ساختار نهایی لینکر ۱ در سه دمای مختلف



ب) ساختار نهایی لینکر ۲ در سه دمای مختلف



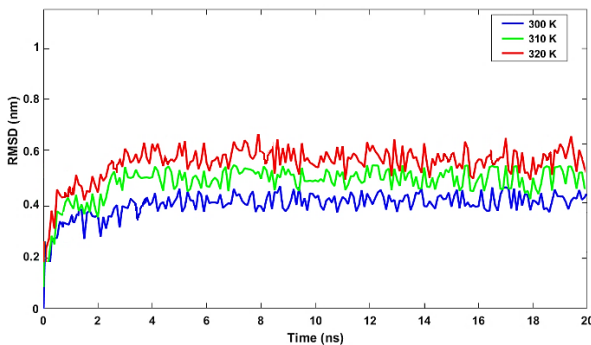
ج) ساختار نهایی کمپلکس ۱ در سه دمای مختلف



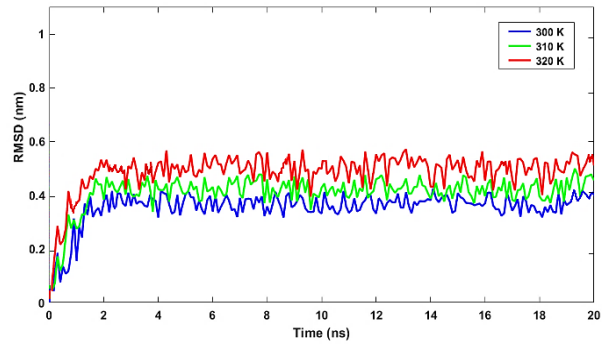
د) ساختار نهایی کمپلکس ۲ در سه دمای مختلف

شکل ۶: ساختار نهایی دو لینکر و دو کمپلکس پس از ۲۰ نانوثانیه شبیه‌سازی، نمایش داده شده در نرم‌افزار پایمول

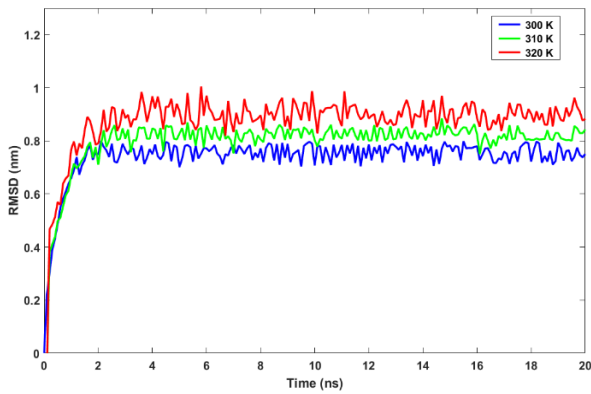
برای ارزیابی بیشتر پایداری، نمودارهای RMSD لینکرها و کمپلکسها در دماهای ۳۰۰، ۳۱۰ و ۳۲۰ کلوین استخراج و مقایسه شدند (شکل ۷، بخش الف تا د). این نمودارها نشان می‌دهند که در طول ۲۰ نانوثانیه، ساختار لینکرها و کمپلکسها در تمامی دماها پایدار باقی‌مانده است. نتایج حاکی از مقاومت این ترکیبات در برابر تغییرات دمایی و حفظ ساختار بدون انحرافات قابل توجه است که بیانگر پایداری بالای آنها تحت شرایط حرارتی مختلف می‌باشد.



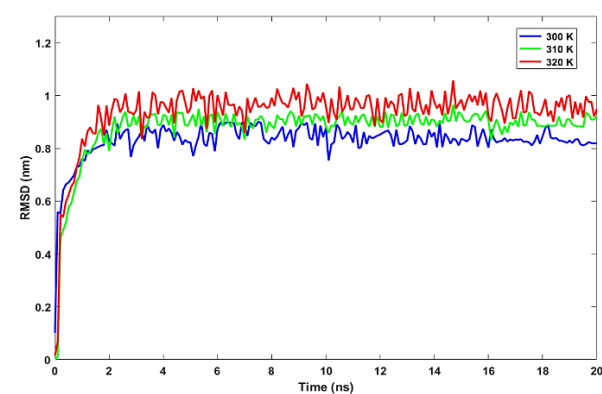
ب) ساختار لینکر ۲ در سه دمای مختلف



الف) ساختار لینکر ۱ در سه دمای مختلف



د) ساختار کمپلکس ۲ در سه دمای مختلف



ج) ساختار کمپلکس ۱ در سه دمای مختلف

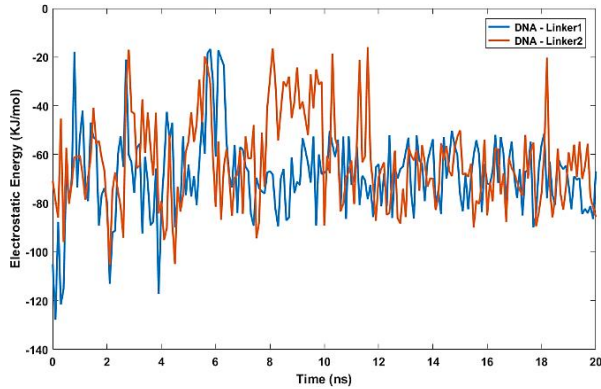
شکل ۷: نمودارهای RMSD لینکرها و کمپلکسها در زمان ۲۰ نانوثانیه و مقایسه آنها در سه دمای مختلف

صنعتی را شبیه‌سازی کرده و اطلاعاتی درباره پایداری حرارتی و مقاومت لینکرها و کمپلکسها در برابر دما ارائه می‌دهد. پس از بررسی پایداری ساختاری لینکرها و کمپلکسها، انرژی‌های الکترواستاتیک و واندروالس بین لینکرها و سایر مولکولها تحلیل شد. این تحلیل به ارزیابی تعاملات مولکولی و پایداری کمپلکسها در طول شبیه‌سازی کمک می‌کند. نمودارهای شکل ۸ تغییرات این انرژی‌ها را در طول شبیه‌سازی نشان می‌دهند. مقادیر منفی این انرژی‌ها نشان‌دهنده جذب مؤثر و پایدار بین مولکولها است که منجر به اتصالات قوی‌تر و پایداری بیشتر می‌شود. همچنین، ثابت ماندن این انرژی‌های منفی در طول شبیه‌سازی نمایانگر برهم‌کنشهای پایدار

در کمپلکسها شاخه‌های لینکرها به‌طور واضح به سمت هیپارین و DNA جذب شده‌اند. این جذب منجر به ایجاد تعاملات پایدار بین این اجزاء می‌شود که در تصاویر گرافیکی به‌خوبی مشهود است. همچنین این تعاملات نشان‌دهنده نقش مهم لینکرها در تقویت پیوندهای میان هیپارین و DNA است و به‌خوبی بیانگر همگرایی مولکولها در جهت بهینه‌سازی برهم‌کنشها و پایداری ساختار کلی کمپلکس می‌باشد.

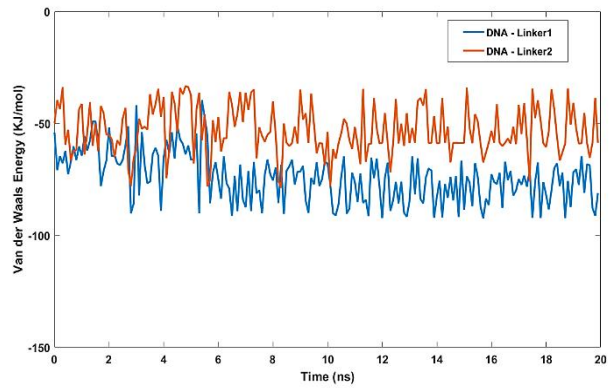
بررسی پایداری در دماهای ۳۰۰، ۳۱۰ و ۳۲۰ کلوین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دمای ۳۰۰ کلوین به‌عنوان دمای آزمایشگاه برای نگهداری این لینکرها و کمپلکسها مناسب است. این دما می‌تواند به‌عنوان یک مرجع برای ارزیابی پایداری لینکرها و کمپلکسها در شرایط نگهداری آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد. دمای ۳۱۰ کلوین، که تقریباً معادل دمای بدن انسان است، امکان ارزیابی پایداری لینکرها و کمپلکسها در شرایط فیزیولوژیکی را فراهم می‌کند و از این‌رو برای کاربردهای بیومولکولی و پزشکی بسیار حائز اهمیت است. همچنین، دمای ۳۲۰ کلوین شرایط مشابه تب بیمار یا محیط‌های

انرژی‌های لینکر ۲ و اختلاف کم آن با لینکر ۱، می‌توان از لینکر ۲ نیز به‌عنوان پل ارتباطی میان DNA و هپارین استفاده کرد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که تعاملات الکترواستاتیک و واندروالس در این سیستم به‌اندازه‌ای قوی هستند که در طول زمان تغییرات چندانی نداشته و موجب حفظ پایداری ساختاری شده‌اند.

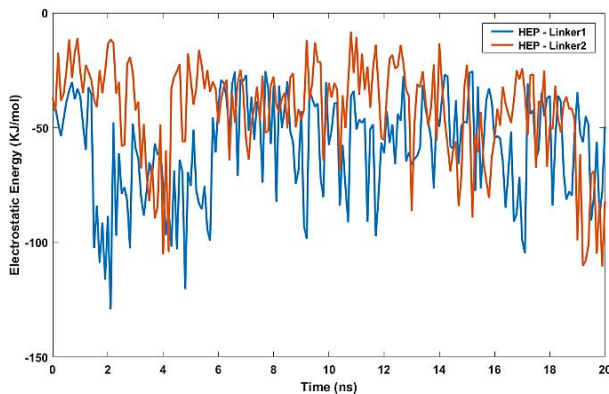


ب) انرژی الکترواستاتیک بین DNA و لینکرهای ۱ و ۲

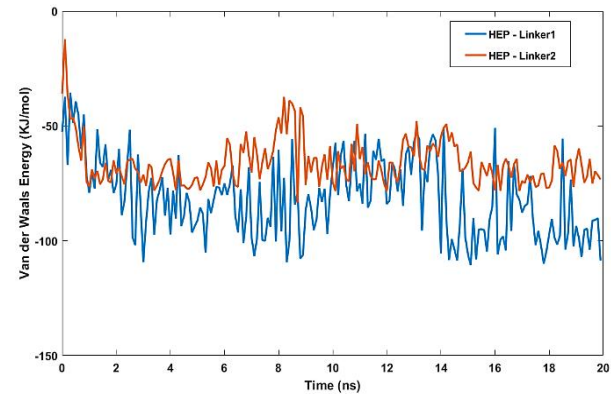
بین لینکرها است. لینکر ۱ در حفظ پایداری و برهم‌کنش نانوساختارها نسبت به لینکر ۲ عملکرد بهتری دارد، زیرا انرژی‌های منفی‌تری نشان می‌دهد. این تفاوت به دلیل وجود دو شاخه بیشتر اسپرمیدینی در لینکر ۱ است که تعاملات قوی‌تری با پلی‌آنیون‌ها ایجاد کرده و انرژی‌های منفی‌تری به‌وجود می‌آورد. با این حال، به دلیل منفی بودن



الف) انرژی واندروالس بین DNA و لینکرهای ۱ و ۲



د) انرژی الکترواستاتیک بین هپارین و لینکرهای ۱ و ۲



ج) انرژی واندروالس هپارین و لینکرهای ۱ و ۲

شکل ۸: مقایسه نمودار انرژی‌های الکترواستاتیک و واندروالس در مدت زمان ۲۰ نانوثانیه برای اجزای کمپلکس‌ها

الکترواستاتیک و واندروالس قابل توجه، قادر به ایجاد اتصال قوی با هپارین و DNA هستند. مقادیر به‌دست‌آمده با داده‌های سیستم‌های مشابه در مطالعات پیشین مقایسه شده است و نشان می‌دهد که ساختارهای پیشنهادی از نظر قدرت اتصال و پایداری، رقابت‌پذیر با سایر روش‌های موجود هستند.

به‌عنوان نمونه، انرژی اتصال و مقدار انرژی الکترواستاتیک هپارین و DNA در سیستم‌های مبتنی بر نانوساختارهای چندظرفیتی خودسامان‌یافته و دندریمرهای خودسامان‌یافته در محدوده‌ای مشخص گزارش شده است. این مقادیر، بسته به نوع ساختار، با مقادیر

در این مطالعه، مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین، به‌ویژه در زمینه روش‌های مختلف اتصال پلی‌آنیون‌ها، مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش‌های گذشته، روش‌های متعددی برای اتصال پلی‌آنیون‌هایی مانند هپارین و DNA به ساختارهای پلی‌کاتیونی بررسی شده‌اند. به‌عنوان نمونه، در یک مطالعه مروری، دندریمرهای خودسامان‌یافته^۱ پلی‌کاتیونی و در پژوهشی دیگر، نانوساختارهای چندظرفیتی خودسامان‌یافته^۲ کاتیونی به‌عنوان سیستم‌های اتصال‌دهنده استفاده شده‌اند [۴۵ و ۷].

در این پژوهش، بر اساس شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، نشان داده شده است که نانولینکرهای پیشنهادی با برخورداری از انرژی‌های

² Self-Assembled Multivalent (samul) Nanostructures

¹ Self-assembled dendrimers

لینکرهای اسپرمیدینی، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی نشان داد که این لینکرها و کمپلکس‌های تشکیل‌شده دارای پایداری ساختاری مطلوب و تعاملات بین‌مولکولی قوی هستند. به‌ویژه، محاسبات انرژی‌های الکترواستاتیک و واندروالس حاکی از برهم‌کنش‌های مؤثر و پایدار بین این مولکول‌ها بود. علاوه بر این، استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی به‌عنوان ابزار تحلیلی اصلی، امکان بررسی دقیق رفتار نانوساختارها را فراهم کرد و به بهینه‌سازی طراحی این لینکرها کمک نمود. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که نانو لینکرهای پلی‌کاتیونی طراحی‌شده، پتانسیل بالایی در اتصال پلی‌آنیون‌ها داشته و می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه اتصالات بین‌مولکولی در سیستم‌های زیستی و نانو فناوری مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، این نانوساختارها می‌توانند در حوزه‌های داروسازی، ژن‌درمانی، دارورسانی هدفمند، مهندسی بافت، حسگری زیستی و نانوپزشکی کاربرد داشته باشند. به‌طور کلی، این پژوهش با تأکید بر اهمیت مدل‌سازی مولکولی در طراحی نانوساختارهای جدید، می‌تواند به پیشرفت‌های علمی و فناوری در حوزه زیست‌فناوری و نانوپزشکی کمک شایانی کند.

۵- فهرست علائم

نمادهای لاتین و اختصارات	
میدان نیروی مکانیک ماکرو مولکولی (نسخه ۳۶)	CHARMM36
دئوکسی ریبونوکلیک اسید	DNA
فرمت خروجی نرم‌افزار کدنانو	JSON
دینامیک مولکولی	MD
نانومتر	nm
مجموعه‌ای با تعداد ذرات، حجم و دمای ثابت	NVT
مجموعه‌ای با تعداد ذرات، فشار و دمای ثابت	NPT
ابزار گرافیکی نمایش ساختارها	oxView
بانک داده پروتئین	PDB
ابزار تبدیل و طراحی ساختارهای DNA	Tacoxdna
مدل آب سه‌نقطه‌ای	TIP3P
میدان نیروی جهانی	UFF
انرژی‌ها	
انرژی پیوندهای کووالانسی	E_{bond}
انرژی زاویه‌ای	E_{angle}
انرژی برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک	E_{elec}
انرژی برهم‌کنش‌های واندروالسی	E_{vdw}
انرژی کل سیستم	E_{total}

۶- منابع

[1] L. S. Jones, B. Yazzie, and C. R. Middaugh, "Polyanions and the Proteome," *Mol. Cell. Proteomics*, vol. 3, no. 8, pp. 746–769, 2004, doi:

گزارش‌شده در سایر سیستم‌های دندریمری و نانوساختارهای چندظرفیتی همخوانی دارد.

نتایج شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی و پایداری ساختاری لینکرها و کمپلکس‌ها نشان‌دهنده پایداری و کارایی بالای این نانوساختارها در شرایط دمایی مختلف است. این پایداری اهمیت آن‌ها را برای کاربردهای بیولوژیکی و نانوپزشکی افزایش می‌دهد. انرژی‌های الکترواستاتیک و واندروالس قوی بین لینکرها، پتانسیل بالای این مولکول‌ها برای ایجاد اتصالات مولکولی پایدار نشان می‌دهد. همچنین، تفاوت‌های مشاهده‌شده در تعاملات مولکولی با تغییر ساختار لینکرها تأکید می‌کند که بهینه‌سازی این ساختارها می‌تواند عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، بررسی آزمایشگاهی این نانولینکرها و مقایسه آن‌ها با سایر روش‌های اتصال پلی‌آنیون‌ها انجام شود. علاوه بر این، کاربردهای عملی این لینکرها در دارورسانی هدفمند، داروسازی، ژن‌درمانی، مهندسی بافت، تشخیص بیماری و نانو فناوری بسیار گسترده است. در دارورسانی هدفمند، نانولینکرها می‌توانند به‌طور خاص داروها را به بافت‌های هدف منتقل کنند، که موجب کاهش عوارض جانبی و افزایش اثربخشی درمان می‌شود. در داروسازی، نانولینکرها می‌توانند به بهبود فرمولاسیون داروها کمک کرده و پایداری آن‌ها را افزایش دهند. علاوه بر این، نانولینکرها می‌توانند در طراحی داروهای ترکیبی مورد استفاده قرار گیرند، به‌گونه‌ای که چندین عامل درمانی را هم‌زمان به محل هدف برسانند و اثرات هم‌افزایی ایجاد کنند. در ژن‌درمانی، این لینکرها می‌توانند به‌عنوان حامل‌هایی برای انتقال ژن‌های درمانی به سلول‌ها استفاده شوند. در مهندسی بافت، نانولینکرها قادر به تقویت بازسازی بافت‌های آسیب‌دیده یا ایجاد ساختارهای بافتی جدید خواهند بود. در تشخیص بیماری، این مواد می‌توانند به‌عنوان حسگرهایی برای شناسایی بیماری‌ها در مراحل اولیه عمل کنند. در نهایت، نانو فناوری با بهره‌گیری از این لینکرها می‌تواند فرایندهای درمانی و پیشگیری را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد و کاربردهای نوآورانه‌ای در پزشکی مدرن فراهم آورد.

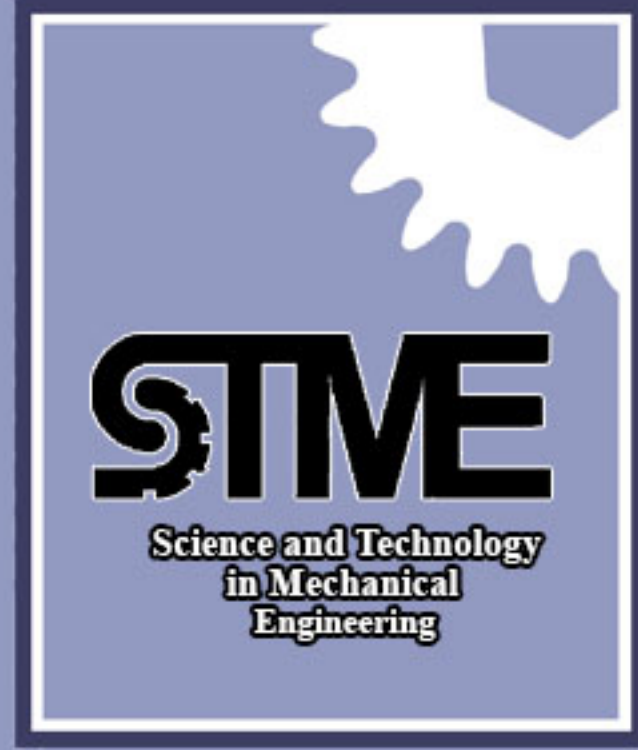
۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نانو لینکرهای پلی‌کاتیونی جدیدی بر پایه لیگاند‌های اسپرمیدین و اسید پالمیتیک طراحی و شبیه‌سازی شدند. این لینکرها در قالب دو نوع کمپلکس، متشکل از DNA اریگامی، هپارین و

- thrombocytopenia and thrombosis,” *Clin. Chim. Acta*, vol. 504, pp. 73–80, 2020, doi: [10.1016/j.cca.2020.02.002](https://doi.org/10.1016/j.cca.2020.02.002).
- [14] L. Litov *et al.*, “Molecular Mechanism of the Anti-Inflammatory Action of Heparin,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, no. 19, p. 10730, 2021, doi: [10.3390/ijms221910730](https://doi.org/10.3390/ijms221910730).
- [15] A. Vitiello and F. Ferrara, “Low Molecular Weight Heparin, Anti-inflammatory/Immunoregulatory and Antiviral Effects, a Short Update,” *Cardiovasc. Drugs Ther.*, vol. 37, no. 2, pp. 277–281, 2021, doi: [10.1007/s10557-021-07251-6](https://doi.org/10.1007/s10557-021-07251-6).
- [16] M.-T. Seffer, D. Cottam, L. G. Forni, and J. T. Kielstein, “Heparin 2.0: A New Approach to the Infection Crisis,” *Blood Purif.*, vol. 50, no. 1, pp. 28–34, 2020, doi: [10.1159/000508647](https://doi.org/10.1159/000508647).
- [17] L. Li, X. Tian, G. Feng, and B. Chen, “The predictive value of heparin-binding protein for bacterial infections in patients with severe polytrauma,” *PLoS ONE*, vol. 19, no. 12, p. e0300692, 2024, doi: [10.1371/journal.pone.0300692](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300692).
- [18] J. Thachil, “The versatile heparin in COVID-19,” *J. Thromb. Haemost.*, vol. 18, no. 5, pp. 1020–1022, 2020, doi: [10.1111/jth.14821](https://doi.org/10.1111/jth.14821).
- [19] L. Mazilu *et al.*, “Thrombosis and Haemostasis challenges in COVID-19 – Therapeutic perspectives of heparin and tissue-type plasminogen activator and potential toxicological reactions—a mini review,” *Food Chem. Toxicol.*, vol. 148, p. 111974, 2021, doi: [10.1016/j.fct.2021.111974](https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.111974).
- [20] H. N. Magnani, “Rationale for the Role of Heparin and Related GAG Antithrombotics in COVID-19 Infection,” *Clin. Appl. Thromb. Hemost.*, vol. 27, 2021, doi: [10.1177/1076029620977702](https://doi.org/10.1177/1076029620977702).
- [21] J. Hogwood, E. Gray, and B. Mulloy, “Heparin, Heparan Sulphate and Sepsis: Potential New Options for Treatment,” *Pharmaceuticals*, vol. 16, no. 2, p. 271, 2023, doi: [10.3390/ph16020271](https://doi.org/10.3390/ph16020271).
- [22] S. Dey *et al.*, “DNA origami,” *Nat. Rev. Methods Primers*, vol. 1, no. 1, 2021, doi: [10.1038/s43586-020-00009-8](https://doi.org/10.1038/s43586-020-00009-8).
- [23] S. Dastorani and R. Hasanzadeh Ghasemi, “Modeling and investigating the behavior of triangular origami DNA under the influence of laboratory temperature,” *Sci. Technol. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 58–69, 2023. doi: [10.1074/mcp.r400008-mcp200](https://doi.org/10.1074/mcp.r400008-mcp200).
- [2] R. Srinivas, S. Samanta, and A. Chaudhuri, “Cationic amphiphiles: promising carriers of genetic materials in gene therapy,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 38, no. 12, p. 3326, 2009, doi: [10.1039/b813869a](https://doi.org/10.1039/b813869a).
- [3] S. M. Bromfield, E. Wilde, and D. K. Smith, “Heparin sensing and binding – taking supramolecular chemistry towards clinical applications,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 42, no. 23, p. 9184, 2013, doi: [10.1039/c3cs60278h](https://doi.org/10.1039/c3cs60278h).
- [4] T. Sørensen, S. Leeb, J. Danielsson, and M. Oliveberg, “Polyanions Cause Protein Destabilization Similar to That in Live Cells,” *Biochemistry*, vol. 60, no. 10, pp. 735–746, 2021, doi: [10.1021/acs.biochem.0c00889](https://doi.org/10.1021/acs.biochem.0c00889).
- [5] “Chapter 4 Negatively Charged Polymers (Polyanions),” in *Developments in Soil Science*, vol. 9, pp. 95–108, 1979, doi: [10.1016/s0166-2481\(08\)70115-6](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)70115-6).
- [6] E. Oduah, R. Linhardt, and S. Sharfstein, “Heparin: Past, Present, and Future,” *Pharmaceuticals*, vol. 9, no. 3, p. 38, 2016, doi: [10.3390/ph9030038](https://doi.org/10.3390/ph9030038).
- [7] D. Marson, E. Laurini, S. Aulic, M. Fermeiglia, and S. Priel, “Unchain My Blood: Lessons Learned from Self-Assembled Dendrimers as Nanoscale Heparin Binders,” *Biomolecules*, vol. 9, no. 8, p. 385, 2019, doi: [10.3390/biom9080385](https://doi.org/10.3390/biom9080385).
- [8] R. J. Linhardt, “Heparin and anticoagulation,” *Front. Biosci.*, vol. 21, no. 7, pp. 1372–1392, 2016, doi: [10.2741/4462](https://doi.org/10.2741/4462).
- [9] D. Mukherjee and E. J. Topol, “The role of low-molecular-weight heparin in cardiovascular diseases,” *Prog. Cardiovasc. Dis.*, vol. 45, no. 2, pp. 139–156, 2002, doi: [10.1053/pcad.2002.127679](https://doi.org/10.1053/pcad.2002.127679).
- [10] S. Aslani *et al.*, “The applications of heparin in vascular tissue engineering,” *Microvasc. Res.*, vol. 131, p. 104027, 2020, doi: [10.1016/j.mvr.2020.104027](https://doi.org/10.1016/j.mvr.2020.104027).
- [11] P. Wang *et al.*, “Heparin: An old drug for new clinical applications,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 295, p. 119818, 2022, doi: [10.1016/j.carbpol.2022.119818](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119818).
- [12] C. Bal dit Sollier, J.-G. Dillinger, and L. Drouet, “Anticoagulant activity and pleiotropic effects of heparin,” *J. Med. Vasc.*, vol. 45, no. 3, pp. 147–157, 2020, doi: [10.1016/j.jdmv.2020.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jdmv.2020.03.002).
- [13] P. Zhou, J.-X. Yin, H.-L. Tao, and H. Zhang, “Pathogenesis and management of heparin-induced

- [32] S. Chen, S. Huang, Y. Li, and C. Zhou, "Recent Advances in Epsilon-Poly-L-Lysine and L-Lysine-Based Dendrimer Synthesis, Modification, and Biomedical Applications," *Frontiers in Chemistry*, vol. 9, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.659304>
- [33] D. Marson, E. Laurini, S. Aulic, M. Fermeglia, and S. Pricl, "Perceptions and Misconceptions in Molecular Recognition: Key Factors in Self-Assembling Multivalent (SAMul) Ligands/Polyanions Selectivity," *Molecules*, vol. 25, no. 4, p. 1003, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/molecules25041003>.
- [34] S. Nandi *et al.*, "A robust ultra-microporous cationic aluminum-based metal-organic framework with a flexible tetra-carboxylate linker," *Communications Chemistry*, vol. 6, no. 1, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s42004-023-00938-x>
- [35] D. Zhang *et al.*, "Zirconium-Based Nanoscale Metal–Organic Framework with Metal-Bridged Cationic Linkers for the Selective Removal of Anionic Dyes," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 7, no. 4, pp. 4349–4354, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c05842>
- [36] M. Chawla, R. D. Kaushik, J. Singh, and Manila, "Optimization and computational studies evaluating molecular dynamics of EDA cored polymeric dendrimer," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77540-x>
- [37] D. Dey, S. Borkotoky, and M. Banerjee, "In silico identification of Tretinoin as a SARS-CoV-2 envelope (E) protein ion channel inhibitor," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 127, p. 104063, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.104063>
- [38] S. M. Douglas *et al.*, "Rapid prototyping of 3D DNA-origami shapes with caDNAno," *Nucleic Acids Research*, vol. 37, no. 15, pp. 5001–5006, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/nar/gkp436>
- [39] E. Poppleton *et al.*, "Design, optimization and analysis of large DNA and RNA nanostructures through interactive visualization, editing and 10.22034/stme.2022.162701 (in Persian).
- [24] S. Dastorani, R. H. Ghasemi, and R. Soheilifard, "A Study on the Bending Stiffness of a New DNA Origami Nano-Joint," *Mol. Biotechnol.*, vol. 63, no. 11, pp. 1057–1067, 2021, doi: [10.1007/s12033-021-00367-y](https://doi.org/10.1007/s12033-021-00367-y).
- [25] S. Dastorani *et al.*, "Modelling and structural investigation of a new DNA Origami based flexible bio-nano joint," *Mol. Simul.*, vol. 46, no. 13, pp. 994–1003, 2020, doi: [10.1080/08927022.2020.1797019](https://doi.org/10.1080/08927022.2020.1797019).
- [26] S. Dastorani, M. Shariati, and R. Hasanzadeh Ghasemi, "Comparison of the bending behavior of DNA origami Nano beam using the nonlinear theory method and steered molecular dynamics simulation," *Nano World*, vol. 19, no. 73, pp. 45–54, 2024 (in Persian)
- [27] A. Monferrer *et al.*, "DNA origami traps for large viruses," *Cell Reports Physical Science*, vol. 4, no. 1, p. 101237, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101237>
- [28] A. Monferrer *et al.*, "Broad-Spectrum Virus Trapping with Heparan Sulfate-Modified DNA Origami Shells," *ACS Nano*, vol. 16, no. 12, pp. 20002–20009, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.nano.1c11328>
- [29] D. Marson, E. Laurini, S. Aulic, M. Fermeglia, and S. Pricl, "Perceptions and Misconceptions in Molecular Recognition: Key Factors in Self-Assembling Multivalent (SAMul) Ligands/Polyanions Selectivity," *Molecules*, vol. 25, no. 4, p. 1003, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/molecules25041003>
- [30] L. E. Fechner *et al.*, "Electrostatic binding of polyanions using self-assembled multivalent (SAMul) ligand displays – structure–activity effects on DNA/heparin binding," *Chemical Science*, vol. 7, no. 7, pp. 4653–4659, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1039/c5sc04801j>
- [31] G. Cavalieri *et al.*, "Molecular Ballet: Investigating the Complex Interaction between Self-Assembling Dendrimers and Human Serum Albumin via Computational and Experimental Methods," *Pharmaceutics*, vol. 16, no. 4, p. 533, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16040533>

- [43] A. Croitoru *et al.*, "Additive CHARMM36 Force Field for Nonstandard Amino Acids," *Journal of Chemical Theory and Computation*, vol. 17, no. 6, pp. 3554–3570, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.1c00254>
- [44] W. D. Cornell *et al.*, "A Second Generation Force Field for the Simulation of Proteins, Nucleic Acids, and Organic Molecules," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 117, no. 19, pp. 5179–5197, 1995. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/ja00124a002>
- [45] K. A. Thornalley, E. Laurini, S. Pricl, and D. K. Smith, "Enantiomeric and Diastereomeric Self-Assembled Multivalent Nanostructures: Understanding the Effects of Chirality on Binding to Polyanionic Heparin and DNA," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 57, no. 28, pp. 8530–8534, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/anie.201802741>
- molecular simulation," *Nucleic Acids Research*, vol. 48, no. 12, pp. e72–e72, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/nar/gkaa417>
- [40] A. Suma *et al.*, "TacoxDNA: A user-friendly web server for simulations of complex DNA structures, from single strands to origami," *Journal of Computational Chemistry*, vol. 40, no. 29, pp. 2586–2595, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/jcc.26029>
- [41] B. Mulloy, M. J. Forster, C. Jones, and D. B. Davies, "N.m.r. and molecular-modelling studies of the solution conformation of heparin," *Biochemical Journal*, vol. 293, no. 3, pp. 849–858, 1993. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1042/bj2930849>
- [42] K. Vanommeslaeghe *et al.*, "CHARMM general force field: A force field for drug-like molecules compatible with the CHARMM all-atom additive biological force fields," *Journal of Computational Chemistry*, vol. 31, no. 4, pp. 671–690, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/jcc.21367>



Two Scientific Quarterly Journals
Science and Technology in Mechanical Engineering
Vol. 3 - No. 2 - 2025