



علم و فناوری در مهندسی مکانیک

دو فصلنامه علمی پژوهشی
علم و فناوری در مهندسی مکانیک

دوره ۳ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۳

بسم الله الرحمن الرحيم

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

دو فصلنامه علمی-پژوهشی

دانشگاه ملی مهارت

دوره ۳ - شماره ۱

بهار و تابستان 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@nus.ac.ir

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



نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

سر دبیر: دکتر محمود شریعتی

مدیر مسئول: دکتر غلامرضا زمانی

صاحب امتیاز: دانشگاه ملی مهارت

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر محسن حداد سبزواری

دکتر اکبر آفاقی خطیب

دکتر ناصر لشکریان آزاد

دکتر امید ماهیان

دکتر اصغر برادران رحیمی

دکتر محمد جواد مغربی

دکتر اکبر جعفری

دکتر اسماعیل لگزیان

دکتر علیرضا فتحی

دکتر کریم علی اکبری

دکتر مجتبی معصوم نژاد

استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

دانشیار، دانشگاه RMIT استرالیا

دانشیار، دانشگاه واترلو (UW)، کانادا

استاد، دانشگاه شیان جیائوتونگ چین

استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

دانشیار، دانشگاه ملی مهارت، گروه مهندسی مکانیک

دانشیار، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده مهندسی مکانیک

دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

دانشیار، دانشگاه ملی مهارت، گروه مهندسی مکانیک

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@nus.ac.ir

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

بهنام آخوندی - مهدی بقراطی - عبدالامیر بک خوشنویس - سیدهادی بنی‌هاشمی - وحید بهلوری - محمدرضا دشت بیاضی -
اکبر جعفری - محمد رضایت - محمدرضا زنگویی مطلق - حمیدرضا سابقی - امیر سیف‌الدینی - کریم علی اکبری - قدرت
قصابی - شهاب کامل عباس‌نیا - ناصر کردانی - جعفر لنگری - علیرضا مشرقی - زینب مشهور - رضا ناصری - سید نادر نبوی -
علیرضا نقوی مقدم - سعید وحیدی‌فر - میترا یادگاری دهکردی

فهرست مطالب

۷	تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید چندگانه نوین ترکیب شده با ذخیره انرژی هوای فشرده و سیستم سرمایش اجکتوری مبتنی بر گوگرد دی اکسید
۲۳	بررسی عددی و تجربی پاسخ پروفیل مربعی پر شده با فوم آلومینیومی در برابر ضربه جانبی و محوری
۴۳	مروری بر روش‌های بهبود عملکرد لوله جاذب جمع‌کننده‌های خورشیدی با استفاده از توربولاتور و نانو سیالات هیبریدی
۷۳	تأثیر چیدمان سیلندر بیضوی بر جریان آشفته و انتقال حرارت در کانال‌های افقی
۹۳	بررسی و تحلیل عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دو مرحله‌ای
۱۱۷	ساخت و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلیاژهای مس تقویت‌شده با ذرات الماس میکرونی
۱۳۳	بررسی تجربی اثر زمان پاشش سوخت بر نوع احتراق در موتور درونسوز با پاشش مستقیم - گذر از احتراق اشتعال تراکمی سنتی به احتراق کم‌دما
۱۴۷	طراحی و ساخت بستر آزمون دو محوره کنترل زاویه با رویکرد سخت‌افزار در حلقه
۱۶۳	تهیه کامپوزیت Al-B4C به روش آلیاژسازی مکانیکی و بررسی خواص ترمومکانیکی آن
۱۸۵	امکان سنجی پتانسیل تهویه طبیعی ساختمان‌های مسکونی برای اقلیم‌های مختلف ایران
۲۰۷	تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه‌سازی سیستم تولید چندگانه جدید مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی برای تولید آب گرم، سرمایش، توان و هیدروژن مایع
۲۲۷	یافتن موقعیت بهینه دستگاه سنجش فاصله با هدف کاهش ریسک و عدم قطعیت در فاز نشست هواپیما



Thermodynamic and Economic Analysis of a New Multiple Generation System Combined with Compressed Air Energy Storage and Sulfur Dioxide-Based Ejector Cooling System.

Ali Eyvazi*¹

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

Abstract

A novel compressed air energy storage system integrated with combined cooling, heating and power is proposed and investigated in this study. The system under study uses sulfur dioxide as the working fluid under the ejector refrigeration system to produce coolant, which has not been used in previous studies, and the waste heat is recovered and stored in the compressed air storage device, which shows the innovative aspect of the present study. A complete and comprehensive thermodynamic and economic analysis is performed on the proposed system. The proposed system is examined from different perspectives and the system performance is quantified through output parameters. Using up-to-date cost functions, the studied system is examined from an economic perspective to clearly demonstrate the cost-effectiveness of the proposed system. In addition, a parametric analysis is performed to evaluate the system behavior by changing key parameters under different operating conditions. The results of the thermodynamic analysis indicate the optimal thermodynamic performance of the proposed system, such that an energy efficiency of 21% and an exergy efficiency of 55% are achieved for the studied system. In addition, an economic analysis yields a total system cost of 232\$ per gigajoule.

Keywords

Compressed Air Storage
Ejector Refrigeration
Exergy
Sulfur Dioxide
Economic Analysis

Received: 09.27.2024

Revised: 12.23.2024

Accepted: 12.28.2024

*Corresponding Author

Ali Eyvazi

Email

alieyvazi1996@gmail.com

1- Introduction

The standard of living of human beings has always depended on the amount and manner of energy use for their activities, so that identifying energy sources and their optimal exploitation has been considered one of the important tools for the development and economic self-sufficiency of each country since the beginning of history. Energy saving in buildings is one of the important measures used to reduce energy shortages and further sustainable development. The energy consumption of ventilation duct systems has attracted much attention. Considering the effects of energy in various economic, industrial, political, social and environmental areas and the need for a comprehensive approach to this important and vital issue, what is needed today more than ever is to examine the role and importance of energy in the

quality of life of societies and the need to optimize its consumption. The amount of energy consumption in buildings is increasing every year. On the other hand, the reduction of non-renewable resources and the harmful effects of using fossil fuels, such as global warming and greenhouse gas emissions, create limitations for the energy supply of buildings. Therefore, the use of renewable energy sources seems essential to address the energy demand in buildings. To achieve this, the construction of sustainable buildings and structures is required so that future urbanization is taken into account by societies. The transportation of sour gas to the refinery is a critical issue that can destroy the inner walls of the pipes due to the presence of toxic and corrosive hydrogen sulfide and lead to an explosion. These losses are so significant that a



large part of the literature and developments in developed countries are dedicated to the introduction of various useful corrosion control technologies. Undoubtedly, the close and tight relationship between energy and industrial development and the increase in energy consumption and prices in recent years, on the one hand, and the role of energy in the cost of manufactured and industrial goods, as well as the pressure of the economy and global trade on the economies of countries to reduce product prices, on the other hand, have caused the importance of efficient energy consumption to be more important than ever before for policymakers and managers of economic and industrial enterprises in the country. Early human societies met their needs using simple and primitive tools, and the only energy they received from nature to continue their lives was the energy stored in food. Gradually, humanity's familiarity with fire increased the scope of using resources and energies available in nature by using wood. Although humanity was aware of the existence of fuels such as crude oil, for centuries the main source of energy for societies was wood and the chemical energy contained in it. After the discovery of oil resources in the world and the beginning of the industrialization of societies to produce various products, which was a consequence of industrialization, human energy needs became much broader and included various resources such as oil, coal, and natural gas. After two centuries of unlimited use of oil resources and reserves, when the life of some oil reservoirs in different regions of the world was approaching its end and its price increased, experts in different countries began to think about replacing other energy carriers with fossil fuels. However, the environmental issue has always been raised alongside the issue of limited fossil fuel resources. Carbon dioxide, as the largest representative of greenhouse gases, has been affecting the climate for more than 1000 years and, by absorbing infrared radiation reflected by the earth, causes global warming. This phenomenon has affected the world in terms of climate stress, and this may cause damages such as drought, acid rain and rising sea levels. In this regard, many efforts have been made, and the use of energies such as natural

gas, solar energy, wind energy, and geothermal energy has assumed special importance and is expanding rapidly. With the expansion of research in the field of renewable energy sources, it is expected that in the not too distant future, these sources, especially in distributed energy production systems, will gain the necessary economic justification to replace fossil fuels. The main goal of evaluating and investigating renewable sources is to find a suitable and cheaper place for consumption sources. Researchers succeeded in storing excess electricity by using electricity generated from renewable energies and compressing air underground. This method is low-cost and more efficient than electricity storage batteries. The use of solar panels and wind farms is increasing day by day; but storing the energy obtained by using renewable energies and using it in power supply networks has become a major challenge for scientists. European scientists have recently succeeded in achieving a low-cost method for energy storage. In this method, air is used to store energy. Although scientists have been able to partially solve the problem of storing electricity generated using renewable energy by using flow batteries and smart power grids, European researchers have recently been able to create a new technology for storing electricity using the air compression method. In this method, which has been around for several decades, excess electricity is used to compress air and then the compressed air is stored in a cave-like place underground. To use the electricity stored by this method, called CAES, it is enough to direct the compressed air to a gas turbine so that the turbine can generate electricity with its help. This method is theoretically an efficient and practical method because it can be used at a very low cost and is in fact the cheapest method for storing energy. On the other hand, using this method does not require any special geographical conditions compared to other methods such as creating reservoirs for hydroelectric power generation, which must be installed in the mountains. Traditional compressed air energy storage uses a gas turbine to generate electricity in the energy release phase, which not only consumes fossil fuels, but also emits greenhouse gases.

2- Methodology

In this study, a complete and comprehensive thermodynamic and economic modeling of the multiple production system has been carried out. For modeling, EES software, which includes functions related to thermodynamic properties, is used. The thermodynamic equations are solved in steady state and simultaneously. In the economic analysis section, the cost-effectiveness of the proposed system is evaluated by applying up-to-date prices and cost rates. Then, a parametric analysis is performed to evaluate the effect of changes in functional parameters on the main performance of the system.

3- Results

In this study, by introducing a new multi-generation system with air energy storage combined with a sulfur dioxide-based ejector cooling system, we witness the optimal performance of the proposed system. The proposed system is investigated using energy, exergy, and economic approaches, and the cycle carbon dioxide emissions are determined during the operation phase. A detailed examination of each system component is carried out to find critical points and system defects. By changing the design parameters, the effect of their change on the system performance is examined in the following. The results of the system analysis are shown in this section. It should be noted that the thermodynamic properties of the working fluids are calculated using the EES software. Having the thermodynamic properties of each flow, the system performance indicators can be calculated. The present study allows the simultaneous generation of electricity, heating, and cooling, and by using a compressed air storage device, it provides the ability to provide energy during peak consumption times and has wide application in residential, commercial, and industrial places. Thermodynamic analysis of the proposed system shows an energy efficiency of 21% and an exergy efficiency of 55%, indicating proper system operation and optimal arrangement of the thermodynamic components of the system. The use

of sulfur dioxide as a working fluid allows the maximum output power of the proposed system to be produced by the sulfur dioxide turbine, and the system efficiency increases significantly. To improve the performance of the proposed system, the maximum exergy destruction among the thermodynamic components of the system is calculated and by providing methods to reduce the maximum exergy destruction in the system, the system efficiency increases significantly. One of the methods to reduce energy consumption and improve the thermodynamic performance of the multiple generation system is to increase the maximum temperature and reduce the minimum temperature. In the present work, to improve the efficiency of the system, after identifying the maximum exergy destruction among the system components, we reduce the maximum exergy destruction by increasing the input temperature to the component with the highest exergy destruction, which has a greater effect on increasing the system efficiency compared to previous methods. The total exergy loss of the system is calculated to be 49,189 kW, and the highest exergy loss occurs in the sulfur dioxide turbine, and the air compressor has the lowest exergy loss among the components of the proposed system. To expand the application of the proposed system in various commercial, industrial and residential industries to provide electricity, heating and cooling simultaneously at the point of energy consumption and eliminate the cost of transferring electricity from the power plant to the point of consumption and the possibility of storing energy and selling excess energy to the grid, which is considered an important achievement of the present study in the field of electricity generation and preventing power outages during peak consumption and sustainable power supply, a new working fluid of sulfur dioxide is used in the ejector cooling system and the use of thermodynamic components with efficient and up-to-date cost functions improves the economic justification of the system. According to the results of the economic evaluation of the system, the total cost of the proposed system is calculated to be 232\$/GJ and the return on investment in the present work is 18 years, which indicates the appropriate commercialization

capability and high economic justification of the present work. According to the results of the economic evaluation of the studied system, the ejector has the highest share of the cost rate among the system components and the lowest cost rate in the system belongs to the air compressor.

4- Conclusion

A novel integrated compressed air energy storage subsystem along with a multiple generation system based on sulfur dioxide ejector cooling system is proposed and investigated in this study. The proposed system is investigated using energy, exergy and economic approaches. A detailed investigation of each system component is carried out to find critical points and system defects. By changing the design parameters, the effect of their change on the system performance is further investigated. In the present study, by using sulfur dioxide in the ejector cooling system, we witness an improvement in the thermodynamic performance of the proposed system compared to previous research and a novel arrangement of the multiple generation system is presented which is combined with the air energy storage subsystem. The basic results of thermodynamic modeling showed that the energy and exergy efficiency of the system are 21 and 55 percent, respectively. By applying up-to-date and efficient cost functions for the system components and by economic analysis with assumed initial economic data, the basic results of economic analysis showed that the overall cost rate of the

system is calculated to be 232\$ per gigajoule. The results of the thermodynamic and economic analysis show that the proposed system has a good performance and is economically viable and can take a significant step in the industrial development and storage of waste energy of energy systems.

5- References

- [1] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers. *The European Physical Journal Plus*. 2021 Jan;136:1-9.
- [2] Haghghatjoo H, Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel. *The European Physical Journal Plus*. 2022 Sep 13;137(9):1042.
- [3] Yadegari M, Ghassemi M. Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*. 2022 Mar 1;23(1):122-46.
- [4] Mamorian, Akbari, Seydamirhossein, Javanshir. Energy and exergy analysis of organic Rankine cycle used to recover waste heat from cement industry. *Science and technology in mechanical engineering*. 2023.



تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید چندگانه نوین ترکیب شده با ذخیره انرژی هوای فشرده و سیستم سرمایش اجکتوری مبتنی بر گوگرد دی اکسید

علی عیوضی^{*۱}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

چکیده

یک سیستم جدید ذخیره سازی انرژی هوای فشرده که با سرمایش، گرمایش و برق ترکیبی یکپارچه شده است در این مطالعه پیشنهاد و بررسی می شود. سیستم مورد بررسی از گوگرد دی اکسید به عنوان سیال کاری زیرسیستم تبرید اجکتوری جهت تولید خنک کننده استفاده می کند که تاکنون در مطالعات قبلی به کار گرفته نشده است و حرارت اتلافی بازیابی شده و در ذخیره ساز هوای فشرده ذخیره می شود که جنبه نوآورانه مطالعه حاضر را نشان می دهد. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی کامل و جامعی روی سیستم پیشنهادی انجام می شود. سیستم پیشنهادی از دیدگاه های مختلف مورد بررسی قرار می گیرد و عملکرد سیستم از طریق پارامترهای خروجی کمی سازی می شود. با استفاده از توابع هزینه به روز سیستم مورد مطالعه از جنبه اقتصادی بررسی می شود تا مقرون به صرفه بودن سیستم پیشنهادی به خوبی نمایان شود. علاوه بر این، یک تحلیل پارامتریک برای ارزیابی رفتار سیستم با تغییر پارامترهای کلیدی در شرایط کاری گوناگون انجام می شود. نتایج تحلیل ترمودینامیکی نشان دهنده عملکرد ترمودینامیکی مطلوب سیستم پیشنهادی است به صورتی که بازده انرژی ۲۱ درصد و بازده انرژی ۵۵ درصد برای سیستم مورد مطالعه حاصل می شود. به علاوه، با تحلیل اقتصادی صورت گرفته هزینه کل سیستم ۲۳۲ دلار بر گیگاژول بدست می آید.

کلمات کلیدی

ذخیره سازی هوای فشرده

تبرید اجکتوری

انرژی

گوگرد دی اکسید

تحلیل اقتصادی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

*نویسنده مسئول

علی عیوضی

ایمیل

alieyvazi1996@gmail.com

۱- مقدمه

تقاضا برای مصرف انواع انرژی به ویژه سوخت های فسیلی، انرژی به طور عام و نفت و گاز به طور خاص در استراتژی های توسعه ملی و جهانی و سیاست گذاری های کلان، جایگاهی بسیار مهم پیدا کرده و در حقیقت به یک عامل کلیدی و استراتژیک در حیات ملت ها و دولت ها تبدیل شده است. تولید و انتشار آلاینده ها به همراه افزایش مصرف سوخت در کلان شهرها از مسائل جدی مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس گزارش منتشر شده توسط سازمان جهانی بهداشت، سالانه بیش از ۳۰۰ میلیون نفر بر اثر تنفس هوای آلوده جان خود را از دست می دهند. آلاینده های هوا مانند دی اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، ازن و مونوکسید کربن، پیامدهای ناگوار متعددی را بر سلامتی انسان ها و مرگ های زودرس به دنبال دارند. بر اساس مطالعات انجام شده، حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد آلودگی هوا ناشی از خودروها و سایر وسایل نقلیه است و مابقی ناشی از صنعت و سایر منابع است؛ بنابراین کنترل آلاینده های هوا برای ایجاد محیطی پاک و دلپذیر بسیار مهم است [۴].

سطح زندگی بشر همواره به میزان و نحوه کاربرد انرژی برای انجام فعالیت های خود بستگی داشته است، به طوری که شناسایی منابع انرژی و بهره برداری بهینه از آن ها، یکی از ابزارهای مهم در جهت توسعه و خودکفایی اقتصادی هر کشور از آغاز تاریخ تاکنون محسوب شده است. صرفه جویی در انرژی در ساختمان ها یکی از اقدامات مهمی است که برای کاهش کمبود انرژی و توسعه پایدار بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. مصرف انرژی سیستم های کانال تهویه توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مصرف انرژی فن ناشی از مقاومت سیستم های تهویه تقریباً ۲۰ تا ۴۰ درصد انرژی مصرفی ساختمان های عمومی است. برای برخی از ساختمان ها، نرخ ها حتی بالاتر از آنهایی است که با سیستم های خنک کننده تهویه مرتبط هستند؛ بنابراین، تعیین نحوه بهینه سازی عملکرد سیستم های کانال تهویه، در نتیجه کاهش مقاومت و کاهش مصرف انرژی فن، به یک موضوع کلیدی تبدیل شده است [۳-۱]. در پی صنعتی شدن کشورها و توسعه شهرنشینی و افزایش



موجود در طبیعت را با به‌کارگیری چوب افزایش داد. گرچه بشر از وجود سوخت‌هایی نظیر نفت خام آگاهی داشت اما برای قرن‌ها عمده‌ترین ماده تأمین‌کننده انرژی جوامع، همان چوب و انرژی شیمیایی نهفته شده در آن بود. پس از اکتشاف منابع نفت در جهان و شروع حرکت صنعتی شدن جوامع، جهت تولید محصولات مختلف که پیامد صنعتی شدن بود، نیازهای انرژی بشر به‌مراتب گسترده‌تر شد و منابع مختلفی مانند نفت، زغال‌سنگ و گاز طبیعی را دربرگرفت.

پس از دو قرن استفاده نامحدود از منابع و ذخایر نفتی، هنگامی که عمر برخی از مخازن نفتی در مناطق مختلف جهان به پایان خود نزدیک شد و قیمت آن افزایش یافت، کارشناسان در کشورهای مختلف به فکر جایگزینی حامل‌های انرژی دیگر با سوخت‌های فسیلی افتادند. باین‌حال، همواره در کنار مسئله محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، بحث زیست‌محیطی نیز مطرح بوده است. دی‌اکسید کربن به‌عنوان بزرگ‌ترین نماینده گازهای گلخانه‌ای به‌تنهایی بیش از ۱۰۰۰ سال بر روی آب‌وهوا تأثیر می‌گذارد و با جذب اشعه مادون‌قرمز منعکس‌شده توسط زمین، موجب پدیده گرمایش زمین می‌شود. این پدیده، جهان را از نظر تنش آب‌وهوایی تحت تأثیر قرار داده است و این مسئله ممکن است خساراتی از جمله خشک‌سالی، باران‌های اسیدی و افزایش سطح دریاهای را به همراه داشته باشد [۸]. در این راستا تلاش‌های زیادی انجام‌گرفته و به‌کارگیری انرژی‌هایی نظیر گاز طبیعی، انرژی خورشیدی، انرژی باد و انرژی زمین‌گرمایی اهمیت ویژه‌ای به خود گرفته و با سرعت فراوانی رو به گسترش می‌باشند. با گسترش تحقیقات در زمینه منابع تجدید پذیر انرژی، انتظار می‌رود در آینده‌ای نه‌چندان دور، این منابع، به‌خصوص در سیستم‌های تولید پراکنده انرژی، توجیه اقتصادی لازم برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی را به دست آورند. هدف اصلی از ارزیابی و بررسی منابع تجدید پذیر، یافتن جایگاهی مناسب و ارزان قیمت‌تر برای منابع مصرفی می‌باشد. پژوهشگران موفق شدند توسط برق تولیدشده از انرژی‌های تجدید پذیر و با فشرده‌سازی هوا در زیرزمین برق مازاد بر مصرف را ذخیره کنند. این روش کم‌هزینه بوده و نسبت به باتری‌های ذخیره‌کننده برق کارایی بیشتری دارد. استفاده از پانل‌های خورشیدی و مزارع بادی به‌طور روزافزونی در حال افزایش است؛ اما ذخیره‌سازی انرژی به‌دست‌آمده با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و استفاده از آن در شبکه‌های برق‌رسانی، به یک چالش بزرگ برای دانشمندان تبدیل شده است.

با توجه به تأثیرات انرژی در حوزه‌های گوناگون اقتصادی، صنعتی، سیاسی، اجتماعی و زیست‌محیطی و ضرورت نگرش جامع به این مقوله مهم و حیاتی، آنچه امروز نیاز آن بیش از گذشته احساس می‌شود، بررسی نقش و اهمیت انرژی در کیفیت زندگی جوامع و لزوم بهینه‌سازی مصرف آن می‌باشد. میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها هر سال در حال افزایش است. از سوی دیگر، کاهش منابع تجدید ناپذیر و تأثیرات زیان‌بار استفاده از سوخت‌های فسیلی مانند گرمایش جهانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، محدودیت‌هایی را برای تأمین انرژی ساختمان‌ها ایجاد می‌کند. از این‌رو، استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر برای رسیدگی به تقاضای انرژی در ساختمان‌ها ضروری به نظر می‌رسد. برای تحقق این امر، ساخت ساختمان‌ها و سازه‌های پایدار موردنیاز است تا شهرنشینی آینده توسط جوامع موردتوجه قرار گیرد. مدیریت و بهبود اقدامات بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها سناریوی آینده اولویت‌بندی شده تا سال ۲۰۵۰ است.

یکی از عوامل مهم در تخریب تجهیزات صنعتی، خوردگی است که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات صنعت شناخته می‌شود. علاوه بر اتلاف مواد و انرژی مرتبط با خوردگی، خسارات اقتصادی نیز به دنبال دارد و اثرات مخرب ناشی از خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین تلفات جانی را چندین برابر می‌کند. دمای بالا، فشار بالا و محیط شیمیایی بسیار خورنده از ویژگی‌های اصلی خطوط لوله گاز ترش است. انتقال گاز ترش به پالایشگاه موضوعی حیاتی است که می‌تواند دیواره‌های داخلی لوله‌ها را به دلیل وجود هیدروژن گوگرد سمی و خورنده تخریب کرده و منجر به انفجار راه‌اندازی شود. این تلفات به‌قدری مهم هستند که بخش بزرگی از ادبیات و پیشرفت‌های موجود در کشورهای توسعه‌یافته به معرفی فناوری‌های مختلف کنترل خوردگی مفید اختصاص یافته است [۷-۵]. بی‌تردید روابط نزدیک و تنگاتنگ انرژی و توسعه صنعتی و افزایش مصرف و بهای انرژی طی سال‌های اخیر از یک طرف و نقش انرژی در بهای تمام‌شده کالاهای تولیدی و صنعتی و نیز فشار اقتصاد و تجارت جهانی بر اقتصاد کشورها در جهت کاهش قیمت محصولات از سوی دیگر موجب شده است که اهمیت مصرف بهینه انرژی بیش از گذشته موردتوجه سیاست‌گذاران و مدیران بنگاه‌های اقتصادی و صنعتی کشور قرار گیرد.

جوامع اولیه انسانی، نیازهای خود را با استفاده از ابزارآلات ساده و ابتدایی برآورده می‌نمودند و تنها انرژی که از طبیعت برای ادامه حیات خود دریافت می‌نمودند، همان انرژی ذخیره شده در مواد غذایی بوده است. به تدریج آشنایی بشر با آتش، دامنه استفاده از منابع و انرژی‌های

کردند. علاوه بر این، سرعت چرخش برای تحقق بهترین کارایی با فشارهای ذخیره‌سازی مختلف بهینه‌سازی شد.

چن و همکاران [۱۴] یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده آدیاباتیک ایزوباریک جدید بر اساس یک سیال فرار را معرفی کردند که هوای فشرده و سیال فرار محفظه ذخیره گاز را به دو قسمت تقسیم می‌کند تا فشار محفظه ذخیره گاز ثابت بماند. آن‌ها گزارش دادند که راندمان سیستم پیشنهادی ۶/۲۶ درصد بیشتر از سیستم سنتی است. لی و همکاران [۱۵] یک سیستم بهبودیافته ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده که از مواد تغییر فاز دهنده و آب برای ذخیره گرما استفاده می‌کند را طراحی کردند. مشخصه سیستم پیشنهادی تولید سرمایش، گرمایش و توان خروجی به‌طور هم‌زمان می‌باشد. یائو و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید هم‌زمان متشکل از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، یک موتورگازی و سیستم تبرید آب آمونیاک را پیشنهاد دادند و بهینه‌سازی کردند. چن و همکاران [۱۷] یک ادغام جدید بین یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و سیستم تولید چندگانه را پیشنهاد کردند. آن‌ها همچنین یک بهینه‌سازی را با استفاده از دو تابع هدف شامل هزینه و عملکرد حرارتی سیستم انجام دادند. آن‌ها گزارش دادند که در زمستان هزینه سیستم، راندمان انرژی و راندمان انرژی به ترتیب ۳۳۳۰ دلار، ۲۲ درصد و ۱۶/۹ درصد است. از سوی دیگر، در تابستان این مقادیر به ترتیب ۳۵۰۷ دلار، ۱۴/۷ و ۶۰ درصد می‌باشد. در مطالعه دیگری، یک سیستم تولید هم‌زمان که شامل یک چرخه ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بود توسط روشناس و همکاران [۱۸] پیشنهاد شد. سیستم تولید هم‌زمان پیشنهادی گرمایش و برق را به‌طور هم‌زمان تولید می‌کند. سیستم پیشنهادی از نظر رویکرد انرژی و انرژی موردبررسی قرار گرفت. آن‌ها همچنین میزان انتشار کربن دی‌اکسید در محیط را محاسبه کردند. آن‌ها گزارش دادند که بازده انرژی و بازده انرژی به ترتیب ۵۸ درصد و ۷۸ درصد می‌باشد. فراهم کردن قابلیت ذخیره‌سازی انرژی اتلافی در سیستم‌های تولید چندگانه می‌تواند باعث رشد چشمگیر کارایی سیستم تولید چندگانه شود که تاکنون در مطالعات قبلی به این مورد پرداخته نشده است. برای ارائه سیستم تولید چندگانه کارآمد بازبایی حرارت اتلافی امری بسیار حیاتی محسوب می‌شود. به‌علاوه امکان ذخیره‌سازی انرژی اتلافی بازبایی شده باعث بهبود چشمگیر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه می‌شود که در کار حاضر با به‌کارگیری از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده این مهم محقق می‌شود. بررسی مطالعات گذشته نشان داد که اکثر سیستم‌های بررسی‌شده

دانشمندان اروپایی به‌تازگی موفق شده‌اند به یک روش کم‌هزینه برای ذخیره‌سازی انرژی دست پیدا کنند. در این روش از هوا برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. باوجوداینکه دانشمندان توانسته‌اند با استفاده از باتری‌های جریان و شبکه‌های برق‌رسانی هوشمند تا حدودی مشکل ذخیره‌سازی برق تولیدشده را با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر حل کنند، اما به‌تازگی محققان اروپایی توانسته‌اند با استفاده از روش فشرده‌سازی هوا، نیز فناوری جدیدی برای ذخیره‌سازی نیروی برق ایجاد است. در این روش که چندین دهه سابقه دارد، از برق مازاد بر مصرف برای فشرده‌سازی هوا استفاده می‌شود و سپس هوای فشرده‌شده در مکانی غار مانند در زیرزمین ذخیره می‌گردد. برای استفاده از برق ذخیره‌شده توسط این روش که CAES نام دارد، کافی است هوای فشرده‌شده به سمت یک توربین گازی هدایت شود تا توربین به کمک آن برق تولید کند. این روش از نظر تئوری، روشی کارآمد و کاربردی است؛ زیرا با هزینه بسیار کمی می‌توان از آن استفاده کرد و در واقع ارزان‌ترین روش برای ذخیره‌سازی انرژی است. از سویی دیگر استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های دیگر همانند ایجاد مخازنی برای تولید نیروی برق آبی که باید تجهیزات خاصی در کوه‌ها نصب شوند، نیازمند هیچ‌گونه شرایط جغرافیایی خاصی نیست. ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده سنتی از یک توربین گاز برای تولید الکتریسیته در مرحله آزادسازی انرژی استفاده می‌کند که نه تنها سوخت‌های فسیلی را مصرف می‌کند، بلکه گازهای گلخانه‌ای نیز منتشر می‌کند [۹]؛ بنابراین، یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده آدیاباتیک پیشرفته (AA-CAES) برای ذخیره گرمای فشرده با استفاده از یک دستگاه ذخیره گرما پیشنهاد شد تا دیگر سوخت اضافی در مرحله تخلیه موردنیاز نباشد [۱۰].

موزایینی و همکاران [۱۱] تحلیل انرژی و پارامتریک سیستم یک مرحله‌ای ذخیره‌سازی انرژی هوافشرده را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که بیشترین تخریب انرژی در سیستم موردبررسی در بسط دهنده‌ها صورت می‌گیرد و راندمان ایزونتروپیک دستگاه روی نابودی انرژی تأثیر زیادی دارد. گو و همکاران [۱۲] یک سیستم چندمرحله‌ای ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را مدل‌سازی کردند و عملکردهای غیر طراحی آن را با دو حالت عملیاتی مقایسه و تحلیل کردند. آن‌ها قانون عملیاتی بهینه هر مرحله از جمله توزیع نسبت فشار و توزیع بازده را تعیین کردند. یائو و همکاران [۱۳] با بررسی عملکرد کمپرسور گریز از مرکز چندمرحله‌ای سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، تأثیرات سرعت چرخش و زاویه ورودی تیغه بر راندمان سیستم را ارزیابی

کسری از گوگرد دی‌اکسید با خروج از توربین در مبدل حرارتی اول پیش گرم می‌شود و سپس قبل از ورود به واحد اجکتور خنک می‌شود. بقیه گوگرد دی‌اکسید به فشارهای کمتر منبسط می‌شود و قبل از ورود به مبدل حرارتی دوم از توربین خارج می‌شود. گوگرد دی‌اکسید به‌عنوان جریان محرکه نامیده می‌شود که در ورودی نازل محرک در مرحله اول اجکتور منبسط می‌شود. گوگرد دی‌اکسید به نازل مکش وارد می‌شود، جایی که در مرحله بعدی اجکتور با گوگرد دی‌اکسید خارج شده از نازل محرک مخلوط می‌شود. جریان مخلوط در آخرین مرحله اجکتور وارد واحد انتشار می‌شود و فشار آن افزایش و سرعت کاهش می‌یابد. جریان دو فاز در واحد جداکننده مکانیکی جدا می‌شود. گوگرد دی‌اکسید مایع اشباع قبل از تولید سرمایه در واحد تیخیرکننده وارد یک شیر انبساط می‌شود و گوگرد دی‌اکسید بخار اشباع قبل از مخلوط شدن با جریان خنک شده از مبدل حرارتی دوم وارد کمپرسور می‌شود. جریان مخلوط در مبدل حرارتی چهار خنک و متراکم می‌شود و چرخه تکرار می‌شود.

۳- تحلیل ترمودینامیکی

معادلات حاکم بر ترمودینامیکی و اقتصادی در این بخش توضیح داده شده است. در مدل‌سازی حاضر مفروضات زیر مطرح شده است:

- سیستم در حالت پایدار کار می‌کند.
- تلفات حرارتی لوله‌ها و اتصالات صفر است.
- تلفات فشار در لوله‌ها و اتصالات صفر است.
- تغییرات در انرژی جنبشی و پتانسیل صفر است.
- دمای سکون ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار سکون ۱۰۱ کیلو پاسکال است.

برای تحلیل ترمودینامیکی سیستم نیاز است که خواص ترمودینامیکی هر نقطه از سیستم با استفاده از معادله موازنه جرم و انرژی مورد بررسی قرار بگیرد [۱۹].

$$\sum m_i = \sum m_e \quad (1)$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad (2)$$

در این رابطه Q و W به ترتیب گرما و کار انتقال یافته در سیستم است. اگر انرژی مخصوص سیستم با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰].

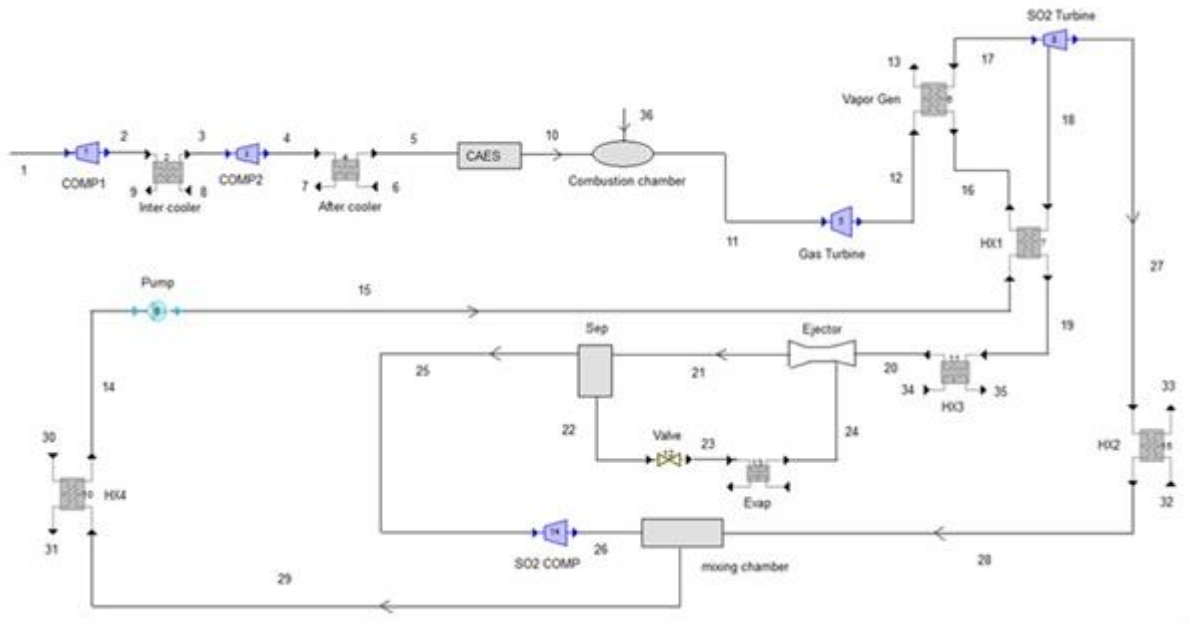
$$\exp h = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

در رابطه بیان شده T_0 دمای سکون، h_0 آنتالپی سکون و S_0 آنتروپی سکون است. داده‌های اولیه برای مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

تولید هم‌زمان ترکیب شده با سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا از راندمان حرارتی پایین رنج می‌برند؛ بنابراین در تحقیق حاضر آرایش جدیدی از ترکیب سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا با سیستم تولید هم‌زمان معرفی شده است که بازده حرارتی بالایی را به ارمغان می‌آورد. انرژی اتلافی در سیستم تولید چندانگانه بازیابی شده و قابلیت ذخیره‌سازی انرژی اتلافی توسط سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده فراهم می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که ترکیب چرخه سرمایه‌گذاری اجکتوری-رانکین بر اساس سیال عامل گوگرد دی‌اکسید در مقایسه با مطالعات قبلی که از واحد سرمایه‌گذاری برای تولید ظرفیت سرمایه‌گذاری سیستم تولید چندانگانه استفاده کرده‌اند، عملکرد زیرسیستم سرمایه‌گذاری را بهبود می‌دهد و تا به حال در مطالعات قبلی مورد بررسی قرار نگرفته است که جنبه نوآورانه تحقیق حاضر می‌باشد. به علاوه، تحلیل فراگیر ترمودینامیکی و اقتصادی به همراه ارزیابی پارامتریک روی سیستم پیشنهادی صورت گرفته است. ورودی‌های سیستم یکپارچه برق برای فشرده‌سازی هوا و سوخت برای فرآیند احتراق است. از طرف دیگر، خروجی‌های این چرخه گرمایش تولید شده از اینترکولر، افترکولر و مبدل حرارتی دوم، بار خنک‌کننده در واحد اواپراتور و برق در توربین‌های گاز و گوگرد دی‌اکسید است. هدف این تحقیق ارائه تحلیل کامل ترمودینامیکی و اقتصادی برای سیستم نوین ترکیبی تولید هم‌زمان با ذخیره‌سازی انرژی هوا بر اساس چرخه سرمایه‌گذاری اجکتوری گوگرد دی‌اکسید است.

۲- توصیف سیستم

شماتیک سیستم تولید هم‌زمان ترکیب شده با ذخیره‌سازی انرژی هوا بررسی شده در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. هوای محیط توسط کمپرسور کم‌فشار متراکم می‌شود و سپس قبل از مرحله تراکم با فشار بالا در داخل خنک‌کن توسط روغن حرارتی خنک می‌شود. پس از آن، هوا وارد یک پس‌خنک‌کن می‌شود که در آنجا تا دمای نزدیک به محیط خنک می‌شود. در مرحله تخلیه، روغن حرارتی برای گرم کردن هوا قبل از ورود به محفظه احتراق استفاده می‌شود. متان برای افزایش دمای ورودی توربین گاز استفاده می‌شود. گاز خروجی وارد توربین گاز می‌شود و تا فشار محیط منبسط می‌شود. سپس با عبور از یک فوق‌گرم‌کن گرمای مورد نیاز سیستم تولید هم‌زمان را تأمین کند. گوگرد دی‌اکسید قبل از ورود به مبدل حرارتی یک به فشارهای بالاتر پمپ می‌شود. سپس گوگرد دی‌اکسید گرم شده وارد سمت دیگر فوق‌گرم‌کن می‌شود تا عملکرد سیستم بهبود یابد.



شکل ۱: شماتیک سیستم پیشنهادی

ارزیابی می‌کند. این رویکرد هزینه‌ها را به‌گونه‌ای بررسی می‌کند که صرفه اقتصادی در اجزای سیستم را مشخص می‌کند. این امر به شناسایی مناطق برای بهبود، بهینه‌سازی و تخصیص مقرون‌به‌صرفه منابع کمک می‌کند [۲۱].

جدول ۲: روابط مدل‌سازی اجکتور

روابط	پارامترهای اجکتور
$\mu = \frac{m_{sf}}{m_{pf}}$	نسبت جابجایی جرم اجکتور
$\pi_{eje} = \frac{p_{ex}}{p_{sf}}$	نسبت افزایش فشار اجکتور
$\eta_{sf} = \frac{h_{pf} - h_{noz}}{h_{pf} - h_{noz, is}}$	راندمان ایزنتروپیک نازل متحرک
$h_{pf} - h_{noz} = \frac{1}{2} v_{noz}^2$	تبادل انرژی بین بخش نازل و سیال اولیه
$V_{mf} = \frac{v_{noz}}{1 + \mu}$	حفظ تکانه در بخش اختلاط
$h_{out} = \frac{h_{pf} + h_{sf} \mu}{1 + \mu}$	تبادل انرژی برای اجکتور
$\eta_{mix} = \frac{v_{mf, s}^2}{v_{mf}^2}$	راندمان اختلاط
$h_{out} - h_{mf} = \frac{1}{2} v_{mf, is}^2$	معادله تبادل انرژی بین بخش اختلاط و خروجی
$\eta_{dif} = \frac{h_{out, is} - h_{mf}}{h_{out} - h_{mf}}$	کارایی دیفیوزر

جدول ۱: داده‌های اولیه

پارامتر	مقدار
بازده ایزنتروپیک کمپرسور (/)	۸۰
بازده ایزنتروپیک توربین (/)	۷۵
بازده ایزنتروپیک پمپ (/)	۷۰
دبی جرمی ورودی کمپرسور هوای شماره یک (kg/s)	۰/۰۹
دما ورودی کمپرسور هوای شماره یک (c)	۱۵
فشار ورودی کمپرسور هوای شماره یک (kPa)	۱۰۱
دبی جرمی ورودی کمپرسور هوای شماره دو (kg/s)	۰/۰۹
دما ورودی کمپرسور هوای شماره دو (c)	۴۰
فشار ورودی کمپرسور هوای شماره دو (kPa)	۳۱۹

با تحلیل ترمودینامیکی کامل صورت گرفته روی سیستم برای محاسبه بازده انرژی و اگزرژی سیستم از روابط زیر استفاده می‌شود

$$\eta_{energy} = \frac{W_T + W_{ST} + Q_{evap} + Q_{IC} + Q_{AC} - W_{SC} - W_{SC}}{W_{air Comp1} + W_{air Comp2} + m_{36} LHV} \quad (۴)$$

$$\eta_{exergy} = 1 - \frac{E_{dist, total}}{W_{air Comp1} + W_{air Comp2} + m_{36} e_{36}} \quad (۵)$$

در این روابط $E_{dist, total}$ نابودی اگزرژی کل سیستم و LHV ارزش حرارتی پایین سوخت است.

۴- تحلیل اقتصادی

تحلیل ترمواکونومیک که به‌طور گسترده در سیستم‌های انرژی استفاده می‌شود، عملکرد اقتصادی و ترمودینامیکی را به‌طور هم‌زمان

جدول ۳: توابع هزینه اجزای سیستم.

اجزای سیستم	نرخ هزینه
کمپرسور هوا	$z = \left(\frac{39.5 \times m_2}{0.9 - \eta_{comp}} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$
محفظه احتراق	$z = \left(\frac{46.08 \times m_{11}}{0.995 - \frac{P_{10}}{P_{11}}} \right) (1 + \exp(0.018 \times T_{11} - 26.4))$
توربین گازی	$z = \left(\frac{479.34 \times m_{12}}{0.92 - \eta_{turb}} \right) \ln \left(\frac{P_{11}}{P_{12}} \right) (1 + \exp(0.036 \times T_{12} - 54.4))$
مبدل حرارتی	$z = 2143 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.5}$
توربین گوگرد دی‌اکسید	$z = 4750 \times (W_{Turb})^{0.75}$
پمپ	$z = 200 \times (W_{pump})^{0.65}$
ژنراتور حرارتی بخار	$z = 4122 \times (A_{vapor, gen})^{0.6}$
اجکتور	$Z = (16/14 \times 989 \times m_{20}) \left(\frac{T_{24}}{P_{24}} \right)^{0/05} p_{21}^{0.75}$

جدول ۴: اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی با کار فانی و همکاران [۲۸].

پارامتر	نتایج	نتایج مرجع
دمای ورودی کمپرسور هوا ۱ (c)	۱۵	۱۵
دمای خروجی کمپرسور هوا ۱ (c)	۱۴۷/۶	۱۴۷/۲۵
فشار ورودی کمپرسور هوا ۲ (kPa)	۳۱۹/۴	۳۱۹/۳۹
فشار خروجی کمپرسور هوا ۲ (kPa)	۱۰۵۴	۱۰۱۰
کار کمپرسور هوا ۱ (kw)	۱۲/۸۵	۱۳/۸۹
کار کمپرسور هوا ۲ (kw)	۱۵/۴۵	۱۴/۸۸

۶- نتایج

در این مطالعه با معرفی سیستم نوین تولید چندگانه به همراه ذخیره‌ساز انرژی هوا که با سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری مبتنی بر گوگرد دی‌اکسید ترکیب شده است شاهد عملکرد مطلوب سیستم پیشنهادی هستیم. سیستم پیشنهادی با استفاده از رویکردهای انرژی، انرژی و اقتصادی بررسی شده و همچنین انتشار دی‌اکسید کربن چرخه در

درحالی‌که سرمایه‌گذاری بیشتر می‌تواند عملکرد ترمودینامیکی را در سیستم‌های تبدیل انرژی افزایش دهد، متعادل کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری با افزایش بهره‌وری نقش مهمی دارد [۲۲]. در بررسی قبلی، پارامترهای انرژی و انرژی برای هر نقطه حالت تعیین شد. علاوه بر این، ایجاد معادلات هزینه برای حفظ تعادل هزینه در بین اجزای مختلف سیستم مهم است. رابطه زیر برای محاسبه نرخ سرمایه‌گذاری و نگهداری سرمایه استفاده می‌شود [۲۳].

$$Z_k = CRF \times \frac{\phi_r}{(N \times 3600)} \times PEC_k \quad (6)$$

جایی که فاکتورهای ϕ ، N و PEC به ترتیب ضریب تعمیر و نگهداری، زمان کارکرد در یک سال و هزینه سرمایه‌گذاری قطعه هستند. همچنین پارامتر CRF ضریب بازیابی سرمایه را نشان می‌دهد که با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

به‌صورتی که i نرخ بهره و n دوره عملکرد را بیان می‌کند. در نهایت، هزینه کل سیستم از تقسیم هزینه سالانه بر کل ساعات کار در طول یک سال به دست می‌آید که ۷۴۴۶ ساعت در سال در نظر گرفته می‌شود [۲۴]:

$$Z_{Total} = (TOC \times \phi \times CRF) / t \quad (8)$$

که در این رابطه TOC نشان‌دهنده مجموع هزینه‌های عملیاتی است. در مطالعه حاضر با استفاده از توابع هزینه به‌روز که در جدول ۳ نشان داده شده است، تحلیل اقتصادی کارآمدی برای بهبود توجیه اقتصادی به‌کارگیری سیستم پیشنهادی صورت می‌گیرد [۲۵]، [۲۶]، [۲۷].

۵- اعتبار سنجی

در مطالعه حاضر آرایش جدیدی از سیستم تولید چندگانه با زیرسیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری با سیال عامل جدید گوگرد دی‌اکسید بررسی شده است. برای اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی، نتایج حاصل با نتایج کار فانی و همکاران [۲۸] مقایسه شده است و همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است اختلاف ناچیزی بین نتایج به‌دست‌آمده با مرجع معرفی شده وجود دارد که دقت بالای اعتبارسنجی صورت گرفته را نشان می‌دهد.

به عضو با بیشترین نابودی انرژی، مقدار نابودی انرژی بیشینه را کاهش می‌دهیم که تأثیر بیشتری جهت افزایش بازده سیستم در مقایسه با روش‌های قبلی دارد. همان‌طور که نتایج حاصل از محاسبه نابودی انرژی اجزای سیستم در جدول ۶ نشان داده شده است، نابودی انرژی کل سیستم ۴۹۱۸۹ کیلووات محاسبه شده و بیشترین نابودی انرژی در توربین گوگرد دی‌اکسید رخ می‌دهد و کمپرسور هوا یک کمترین نابودی انرژی را میان اجزای سیستم پیشنهادی دارد.

جدول ۶: نابودی انرژی اجزای سیستم

پارامتر	مقدار (kw)
نابودی انرژی افتر کولر	۹/۶
نابودی انرژی ذخیره‌ساز هوا فشرده	۴۱/۴۱
نابودی انرژی محفظه احتراق	۲۵/۶۹
نابودی انرژی کمپرسور هوا یک	۱/۹
نابودی انرژی کمپرسور هوا دو	۲/۰۶
نابودی انرژی اواپراتور	۱۹۵۷
نابودی انرژی اجکتور	۹۰
نابودی انرژی محفظه اختلاط	۳/۱۲
نابودی انرژی کمپرسور گوگرد دی‌اکسید	۹۶۱/۸
نابودی انرژی توربین گوگرد دی‌اکسید	۳۰۲۵۵
نابودی انرژی توربین گازی	۲/۳۹
نابودی انرژی مبدل حرارتی یک	۷۷۰۲
نابودی انرژی مبدل حرارتی دو	۹۶۹۶
نابودی انرژی مبدل حرارتی سه	۴۰/۳۵
نابودی انرژی مبدل حرارتی چهار	۳۴۹/۵

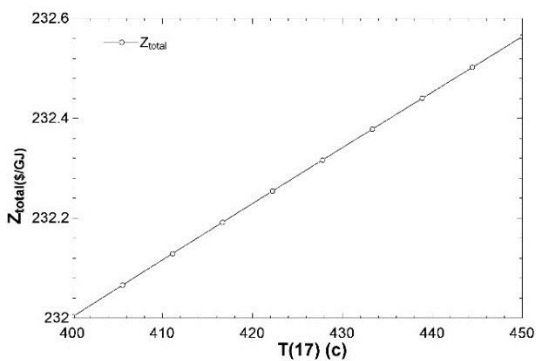
برای گسترش کاربرد سیستم پیشنهادی در صنایع مختلف تجاری، صنعتی و مسکونی برای فراهم کردن الکتریسیته، گرمایش و سرما به صورت هم‌زمان در محل مصرف انرژی و حذف هزینه ناشی از انتقال الکتریسیته از نیروگاه تا محل مصرف و امکان ذخیره‌سازی انرژی و فروش انرژی مازاد به شبکه که دستاورد مهم مطالعه حاضر در زمینه تولید الکتریسیته و جلوگیری از قطع برق در زمان اوج مصرف و برق‌رسانی پایدار محسوب می‌شود، از سیال عامل جدید گوگرد دی‌اکسید در سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری استفاده می‌شود و به کارگیری اجزای ترمودینامیکی با توابع هزینه کارآمد و به‌روز توجه اقتصادی سیستم را بهبود می‌دهد و طبق نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی روی سیستم هزینه کل سیستم پیشنهادی مقدار ۲۳۲ دلار بر گیگا ژول محاسبه می‌شود و بازگشت سرمایه در کار حاضر ۱۸ سال حاصل می‌شود که نشان‌دهنده قابلیت مناسب تجاری‌سازی و توجه اقتصادی بالای کار حاضر است. طبق نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی سیستم

مرحله بهره‌برداری تعیین می‌شود. بررسی دقیق در مورد هر جزء سیستم برای یافتن نقاط مهم و نقص سیستم انجام می‌شود. با تغییر پارامترهای طراحی، تأثیر تغییر آن‌ها بر عملکرد سیستم در ادامه بررسی می‌شود. نتایج تجزیه و تحلیل سیستم در این بخش نشان داده شده است. لازم به ذکر است که خواص ترمودینامیکی سیالات عامل با استفاده از نرم‌افزار EES محاسبه می‌شوند. با داشتن خواص ترمودینامیکی هر جریان می‌توان شاخص‌های عملکرد سیستم را محاسبه کرد. مطالعه حاضر امکان تولید هم‌زمان الکتریسیته، گرمایش و سرما را فراهم می‌کند و با استفاده از ذخیره‌ساز هوای فشرده قابلیت تأمین انرژی در زمان پیک مصرف را فراهم می‌کند و کاربرد گسترده‌ای در اماکن مسکونی، تجاری و صنعتی دارد. با تحلیل ترمودینامیکی صورت گرفته روی سیستم پیشنهادی بازده انرژی ۲۱ درصد و بازده انرژی ۵۵ درصد گزارش می‌شود و نشان‌دهنده کارکرد مناسب سیستم و آرایش بهینه اجزای ترمودینامیکی سیستم است. استفاده از سیال عامل گوگرد دی‌اکسید باعث می‌شود که بیشترین توان خروجی سیستم پیشنهادی توسط توربین گوگرد دی‌اکسید تولید شود و بازده سیستم رشد چشمگیری پیدا کند. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی سیستم در جدول ۵ نشان داده شده است.

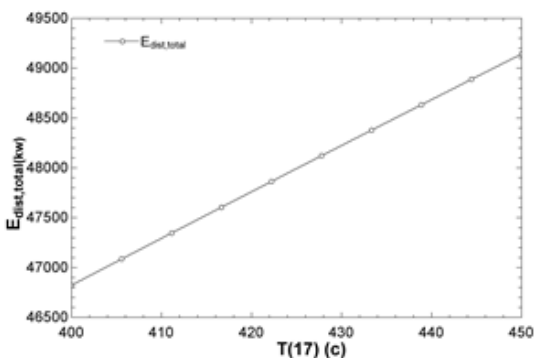
جدول ۵: نتایج تحلیل ترمودینامیکی سیستم

پارامتر	مقدار
راندمان انرژی (%)	۲۱
راندمان انرژی (%)	۵۵
کار توربین گازی (kw)	۲۲/۸
کار کمپرسور گوگرد دی‌اکسید (kw)	۹۹۵/۴
کار توربین گوگرد دی‌اکسید (kw)	۴۶۹۵۹
کار پمپ گوگرد دی‌اکسید (kw)	۶۴۳/۸
کار کمپرسور هوا ۱ (kw)	۱۲/۸۵
کار کمپرسور هوا ۲ (kw)	۱۵/۴۵

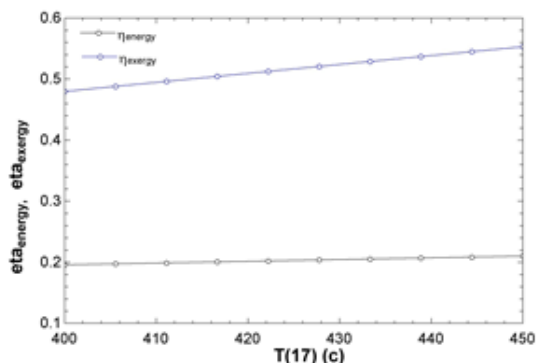
برای بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی بیشترین نابودی انرژی در بین اجزای ترمودینامیکی سیستم را محاسبه نموده و با ارائه روش‌هایی برای کاهش نابودی انرژی بیشینه در سیستم بازده سیستم افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. یکی از روش‌های کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه افزایش دادن دمای بیشینه و کاهش دمای کمینه می‌باشد. در کار حاضر برای بهبود کارایی سیستم پس از شناسایی بیشترین نابودی انرژی صورت گرفته در میان اجزای سیستم، با افزایش دمای ورودی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید روی عملکرد سیستم (الف) هزینه (ب) نابودی انرژی (ج) بازده انرژی و انرژی.

۶-۱-۲- تأثیر تغییرات راندمان ایزنتروپیک کمپرسور

روی عملکرد سیستم

افزایش راندمان ایزنتروپیک کمپرسور مطابق نمودار ۳ باعث بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی می‌شود. بازده انرژی و انرژی سیستم تحت تأثیر افزایش راندمان ایزنتروپیک کمپرسور، افزایش می‌یابد. وقتی که از کمپرسور باراندمان ایزنتروپیک بالا استفاده می‌کنیم نابودی انرژی در سیستم کاهش می‌یابد و قابلیت انجام کار بهبود می‌یابد.

مورد مطالعه که در جدول ۷ نشان داده شده است، اجکتور بیشترین سهم از نرخ هزینه بین اجزای سیستم را دارد و کمترین نرخ هزینه در سیستم متعلق به کمپرسور هوا یک می‌باشد.

جدول ۷: نرخ هزینه اجزای سیستم

پارامتر	مقدار (\$/GJ)
هزینه محفظه احتراق	۵۵۳
هزینه کمپرسور هوا یک	۱۲۵
هزینه کمپرسور هوا دو	۱۴۹/۴
هزینه کمپرسور گوگرد دی‌اکسید	۸۴۱۷۴۸
هزینه اجکتور	۳۱۰۶۴۷۳۶۵
هزینه توربین گازی	۳۲۹/۲
هزینه مبدل حرارتی یک	۵۱۵۱۵
هزینه مبدل حرارتی دو	۵۹۲۹۴
هزینه مبدل حرارتی سه	۱۸۳۷۷
هزینه مبدل حرارتی چهار	۳۲۴۳
هزینه مبدل حرارتی بخار	۱۰۲۸۷
هزینه پمپ	۱۳۳۸۹
هزینه توربین گوگرد دی‌اکسید	۱۵۱۵۷۳۸۴

۶-۱-۱- تحلیل پارامتریک سیستم پیشنهادی

تحلیل پارامتریک روشی قابل اعتماد برای تعیین کیفیت عملکرد یک سیستم در شرایط مختلف برای به دست آوردن درک جامع از سیستم است. در سیستم مورد مطالعه، تأثیر پارامترهای اصلی طراحی مانند راندمان ایزنتروپیک کمپرسور و دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید بر عملکرد سیستم پیشنهادی ارزیابی شده است.

۶-۱-۱- تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین گوگرد

دی‌اکسید روی عملکرد سیستم

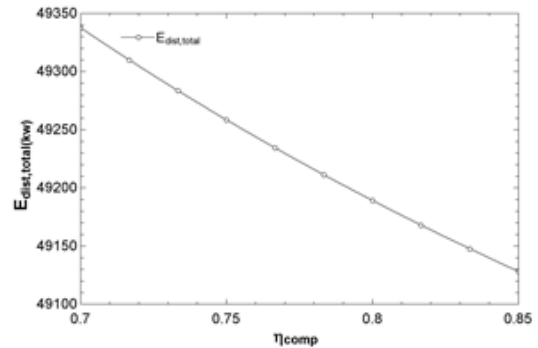
طبق نمودار ۲ وقتی که دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، بازده انرژی و انرژی سیستم بهبود می‌یابد. هزینه کل سیستم تحت تأثیر افزایش دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید افزایش می‌یابد. هنگامی که دمای ورودی توربین گوگرد دی‌اکسید افزایش می‌یابد، تخریب انرژی در سیستم رشد یافته و قابلیت انجام کار کاهش می‌یابد.

اقتصادی بررسی شده است. بررسی دقیق در مورد هر جزء سیستم برای یافتن نقاط مهم و نقص سیستم انجام شده است. با تغییر پارامترهای طراحی، تأثیر تغییر آن‌ها بر عملکرد سیستم در ادامه بررسی شد. در مطالعه حاضر با به‌کارگیری گوگرد دی‌اکسید در سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری شاهد بهبود عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی در مقایسه با تحقیقات صورت گرفته قبلی هستیم و آرایشی نوین از سیستم تولید چندگانه ارائه شده است که با زیرسیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا ترکیب شده است. نتایج پایه مدل‌سازی ترمودینامیکی نشان داد که بازده انرژی و اکسرژی سیستم به ترتیب ۲۱ و ۵۵ درصد است. با به‌کارگیری توابع هزینه به‌روز و کارآمد برای اجزای سیستم و با تحلیل اقتصادی با داده‌های اقتصادی اولیه فرض شده، نتایج پایه تجزیه و تحلیل اقتصادی نشان داد که نرخ کلی هزینه سیستم ۲۳۲ دلار بر گیگا ژول محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی صورت گرفته نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی کارکرد مناسبی داشته و از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه است و می‌تواند گام شایان توجهی در توسعه صنعتی و ذخیره‌سازی انرژی اتلافی سیستم‌های انرژی بردارد.

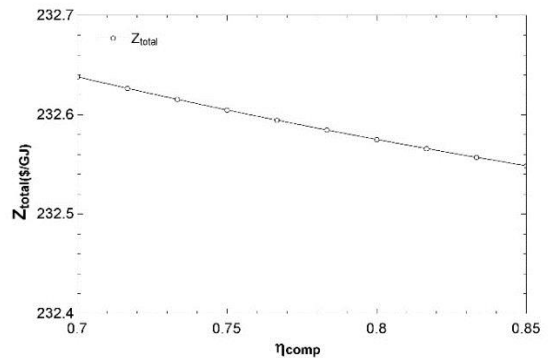
۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A	مساحت، m^2
C	هزینه، (\$)
D	قطر، (m)
Ex	اکسرژی، (W)
h	آنتالپی، (kJ/kg)
\dot{m}	دبی جرمی، (kg/s)
S	آنتروپی، (kJ/kg.K)
T	دما، (c)
p	فشار، (kPa)
n	زمان
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3
\emptyset	نسبت اکیووالانس
LHV	اکسرژی سوخت

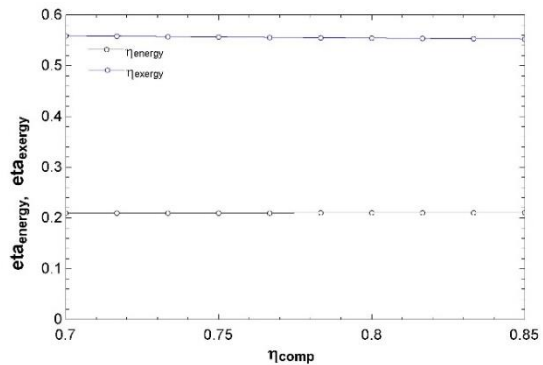
کار مصرفی توسط کمپرسور با افزایش راندمان ایزنتروپیک آن کاهش می‌یابد و در نتیجه به تجهیزات کوچک‌تر در سیستم نیاز داریم و هزینه کل سیستم کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک کمپرسور روی عملکرد سیستم (الف) نابودی اکسرژی (ب) هزینه (ج) بازده انرژی و اکسرژی.

۷- نتیجه‌گیری

یک زیرسیستم یکپارچه جدید ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده همراه با یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری گوگرد دی‌اکسید در این مطالعه پیشنهاد و بررسی شده است. سیستم پیشنهادی با استفاده از رویکردهای انرژی، اکسرژی و

۹- منابع

- [9] Qing H, Lijian W, Qian Z, Chang L, Dongmei D, Wenyi L. Thermodynamic analysis and optimization of liquefied air energy storage system. *Energy*. 2019 Apr 15;173:162-73.
- [10] He Q, Liu H, Hao Y, Liu Y, Liu W. Thermodynamic analysis of a novel supercritical compressed carbon dioxide energy storage system through advanced exergy analysis. *Renewable energy*. 2018 Nov 1;127:835-49.
- [11] Mozayeni H, Wang X, Negnevitsky M. Exergy analysis of a one-stage adiabatic compressed air energy storage system. *Energy Procedia*. 2019 Feb 1;160:260-7.
- [12] Guo H, Xu Y, Zhang Y, Liang Q, Tang H, Zhang X, Zuo Z, Chen H. Off-design performance and an optimal operation strategy for the multistage compression process in adiabatic compressed air energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*. 2019 Feb 25;149:262-74.
- [13] He Y, Chen H, Xu Y, Deng J. Compression performance optimization considering variable charge pressure in an adiabatic compressed air energy storage system. *Energy*. 2018 Dec 15;165:349-59.
- [14] Chen LX, Xie MN, Zhao PP, Wang FX, Hu P, Wang DX. A novel isobaric adiabatic compressed air energy storage (IA-CAES) system on the base of volatile fluid. *Applied Energy*. 2018 Jan 15;210:198-210.
- [15] Li R, Wang H, Zhang H. Dynamic simulation of a cooling, heating and power system based on adiabatic compressed air energy storage. *Renewable energy*. 2019 Aug 1;138:326-39.
- [16] Yao E, Wang H, Wang L, Xi G, Maréchal F. Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of a combined cooling, heating and power based compressed air energy storage system. *Energy conversion and management*. 2017 Apr 15;138:199-209.
- [17] Chen S, Arabkoohsar A, Yang Y, Zhu T, Nielsen MP. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating, and power system with subcooled compressed air energy storage considering off-design characteristics. *Applied Energy*. 2023.
- [1] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers. *The European Physical Journal Plus*. 2021 Jan;136:1-9.
- [2] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. 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. *The European Physical Journal Plus*. 2020 Jul;135(7):1-21.
- [3] Yadegari M, Khoshnevis AB. Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems. *The European Physical Journal Plus*. 2020 Jun 1;135(6):534.
- [4] Yadegari M, Ghassemi M. Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*. 2022 Mar 1;23(1):122-46.
- [5] Yadegari M. An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm. *The European Physical Journal Plus*. 2021 Oct 11;136(10):1019.
- [6] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020 Aug;42:1-5.
- [7] Haghghatjoo H, Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel. *The European Physical Journal Plus*. 2022 Sep 13;137(9):1042.
- [8] Mamorian, Akbari, Seydamirhossein, Javanshir. Energy and exergy analysis of organic Rankine cycle used to recover waste heat from cement industry. *Science and technology in mechanical engineering*. 2023.

- working fluid. *Desalination*. 2017 Nov 15;422:113-23.
- [24] Razmi AR, Janbaz M. Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management*. 2020 Jan 15;204:112320.
- [25] Kianfard H, Khalilarya S, Jafarmadar S. Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC. *Energy conversion and management*. 2018 Dec 1;177:339-49.
- [26] Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi SM. Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy*. 2017 Apr 1;124:625-39.
- [27] Cavalcanti EJ. Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Jan 1;67:507-19.
- [28] Sadreddini A, Fani M, Aghdam MA, Mohammadi A. Exergy analysis and optimization of a CCHP system composed of compressed air energy storage system and ORC cycle. *Energy conversion and management*. 2018 Feb 1;157:111-22.
- Thermal Engineering*. 2021 Mar 25;187:116562.
- [18] Roushenas R, Razmi AR, Soltani M, Torabi M, Dusseault MB, Nathwani J. Thermo-environmental analysis of a novel cogeneration system based on solid oxide fuel cell (SOFC) and compressed air energy storage (CAES) coupled with turbocharger. *Applied Thermal Engineering*. 2020 Nov 25;181:115978.
- [19] Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bailey MB. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons; 2010 Dec 7.
- [20] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. *International journal of hydrogen energy*. 2015 Oct 26;40(40):14021-30.
- [21] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. *International journal of hydrogen energy*. 2015 Oct 26;40(40):14021-30.
- [22] Noaman M, Saade G, Morosuk T, Tsatsaronis G. Exergoeconomic analysis applied to supercritical CO₂ power systems. *Energy*. 2019 Sep 15;183:756-65.
- [23] Nemati A, Sadeghi M, Yari M. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a marine engine waste heat driven RO desalination system integrated with an organic Rankine cycle using zeotropic



Numerical and Experimental Investigations of the Response of Foam-Filled Aluminum Square Profile Under Lateral and Axial Impact

Pooya Pirali*¹, Mohsen Heydari Beni², Seyed Mohammad Reza Ghaderi³, Jafar Eskandari Jam⁴

1. Assistant Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
2. Ph.D. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
3. M. Sc. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
4. Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

The purpose of this paper is to investigate response of a profile with a square cross section filled with aluminum foam in single and double wall mode under lateral and axial impact load in order to evaluating the effect of using aluminum foam on the energy dissipation caused by the impact. First, single-walled and double-walled square profiles simulated in CAE ABAQUS and the effect of the parameters such as aluminum foam density, number of walls, effect of interaction between foam and wall on general response of model, etc. examined. Then, in order to validate the simulation results, the experimental test of lateral and axial impact using drop weigh impact test performed and the results compared with simulation results. By performing tests and simulations, it was found that aluminum foam has a moderate effect on the amount of crushing and energy absorption of the structure under axial impact load, but in the case of lateral impact, due to high brittleness, the use of foam prepared in the structure under impact is not appropriate. Therefore, it is better to use stronger foam.

Keywords

Metal Foam
Filled Square Profile
Lateral Impact
Axial Impact
Energy Dissipation
Absorption

Received: 08.04.2024

Revised: 10.22.2024

Accepted: 10.22.2024

*Corresponding Author

Pooya Pirali

Email

ppirali@mut.ac.ir

1- Introduction

Thin wall structures are one of the most efficient energy absorbing systems in various industries, such as automotive, railway and military, due to their lightness, suitable energy absorption capacity and high energy absorption to weight ratio, in order to protect the lives of passengers as well as pedestrians. Pedestrians are considered during accidents or protection of equipment and devices.

Zhang et al. [1] worked on the amount of energy absorption in linear and tubular structures under axial destruction. In this research, which deals with the simulation and experimental testing of parts with a special geometry, circular aluminum tubes are arranged next to each other in different states and are subjected to quasi-static load. In addition, the weight of all samples is considered the same for a better comparison.

Li et al. [2] worked on the energy absorption characteristics of series structures under axial and diagonal loads. In this research, the samples were made by aluminum round tubes. By using these pipes, the cross section of the structures has become triangular, square and hexagonal. Also, by using more pipes, the mentioned structures have been optimized.

Ngoc et al. [3] have worked on the energy absorption characteristics of square series structures under axial load. The design of these structures was inspired by the internal structure of bone and bamboo. In this research, first the samples were simulated by Abaqus software and then they were verified by theoretical method.



According to the conducted studies, in most of them, especially in thin-walled structures, the tests performed were quasi-static, and the response of energy absorbers to impact has been investigated less. Also, in the articles that have investigated the impact test, they have focused more on the axial impact mode. Also, the material of the examined samples was mainly made of metal, which cannot be used in all conditions due to the high weight and special physical conditions of metals. However, the case that is noteworthy in the above studies is the lack of examination of multicellular thin-walled structures with mesh and different geometries and made of polymer under lateral impact load. Therefore, in this study, this issue has been investigated.

2- Modeling and Formulation

In this study, a total of eight thin-walled structures made of ABS and subjected to lateral impact have been investigated. ABS polymer has been used to make samples by 3D printer. Also, these parts were printed by Novin Negar Additive Manufacturing Company and by Kitek M1 machine. These samples were drawn under the ASTM D638 standard in SolidWorks software and then printed. The simulations of this project have been carried out by Abaqus software. After the end of the simulation, by doing independence from the mesh, the mesh with dimensions of 0.8 mm and type S4R was selected for different samples and the comparison of the results of the samples with each other has been discussed in terms of energy absorption characteristics. For the experimental test process, a weight drop test machine was used. In order to perform experimental tests, at first, the set of weights is set in such a way that their total weight is equal to 6.615 kg. Also, the striking surface is considered to be flat so that the force enters the upper surface of the parts in a wide and equal manner. Two samples were made from each of the samples and a total of 8 tests were performed. By this device, the command to drop the weight is sent and the weight collides with the samples. As a result, the amount of shrinkage due to plastic deformation and the performance of the samples

against impact can be investigated. During the descent of the weight, the data of the acceleration of the weight was entered into the computer by the sensor and the acceleration-time graph of the weight was extracted.

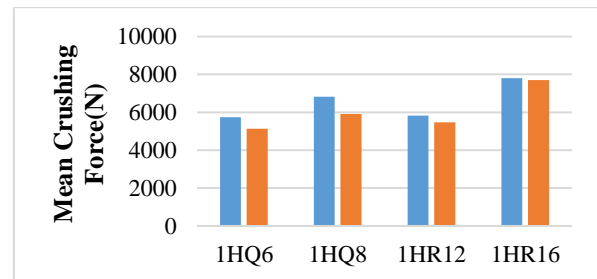


Figure 1: The average crushing force of samples in numerical and experimental mode.

In the experimental and numerical mode, it is related to the 1HQ6 sample and the highest rate of efficiency is also specific to the 1HR16 sample. Also, among the 1HR12 and 1HR16 samples, the 1HR16 sample has a much higher efficiency, which shows that this type of energy absorber is better than the rest is Figure 3 shows the compression force efficiency diagram for all 4 samples.

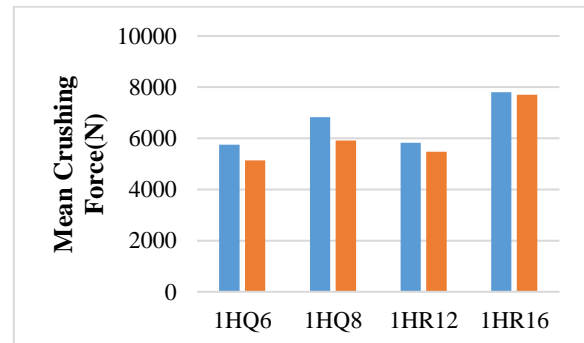


Figure 2: The average crushing force of samples in numerical and experimental mode.

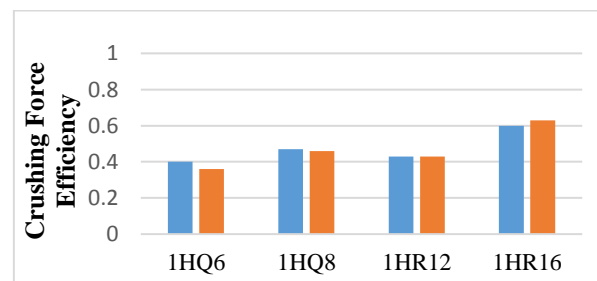


Figure 3: The efficiency diagram of the crushing force of the samples in numerical and experimental mode.

In order to make a better comparison between these 8 samples, it should be noted that the amount

of length change in the amount of absorbed energy is an effective factor, so this parameter should be compared in equilibrium conditions for all 8 existing samples. In order to do this, considering the minimum amount of length change that belongs to the 1HR16 sample, the amount of length change in which the absorbed energy is measured is considered equal to 3.15 mm.

In these simulations, an impact with an energy of 25 joules has been applied and the amount of total absorbed energy in all structures is more than 95% of the applied energy. Also, according to the values of absorption energy at a distance of $x=3.15$ mm, which is in equilibrium conditions for all 8 samples, it can be seen that sample 1HR16 is the best sample in terms of energy absorption. Sample 1HR16 has the highest value and sample 2H2Q8 has the lowest average crushing force. The amount of crushing efficiency for an ideal energy absorber is 1 (100%), but achieving this number is very difficult. As a result, according to the results, sample 1HR16 has the best efficiency of crushing force among all samples. According to the numerical and experimental results and their interpretation, it is clear that the sample 1HR16 is the best sample to be used as an energy absorber. It was also observed that with the increase in the number of houses in each row, the energy absorption properties and parameters improve, and in general, the rectangular house samples are better energy absorbers than the similar square house samples.

3- Conclusion

The purpose of this study was to investigate numerically and experimentally the destruction of thin-walled multi-cell quadrangular structures made by 3D printers due to lateral impact. Below is a summary of the results of numerical simulations and experimental tests.

In general, and according to the results of simulations and experimental tests, by increasing the number of houses in each sample and reducing the wall thickness of the samples in order to keep the weight, the amount of energy absorption, the average crushing force and the efficiency of

crushing force increases. Also, the amount of change in length and shrinkage of each sample decreases with the increase in the number of houses.

Considering that the rectangular house samples were created by adding a horizontal reinforcement to the square house samples, it can be seen that the amount of energy absorption in the equilibrium distance, the average crushing force and the energy efficiency. The flattening of rectangular samples, like any square sample, has increased.

By increasing the number of square houses from 6 to 8, the amount of energy absorption has increased by 5%, the average crushing force has increased by 15%, and the crushing force efficiency has increased by 30%.

By increasing the number of rectangular houses from 12 to 16, the amount of energy absorption has increased by 16%, the average crushing force has increased by 35%, and the crushing force efficiency has increased by 47%.

By converting a sample of 6 square houses to a sample of 12 rectangular houses, the average crushing force increases by about 7% and the efficiency of crushing force increases by 20%.

By converting a sample of 8 square houses to a sample of 16 rectangular houses, the average crushing force increases by 30% and the crushing force efficiency increases by 37%.

By adding inner layers to the samples, the values of energy absorption parameters decrease.

The smaller the amount of shrinkage (change in length) of the sample under impact, the greater the maximum shrinkage force and resistance of the sample to impact. According to these points and results, it is obvious that sample 1HR16 is the best energy absorber among these samples.

4- References

- [1] Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Zhang, Y., Li, Q., "Parametric analysis and multiobjective optimization for functionally graded foam-filled thin-wall tube under lateral impact,"

-
- Computational Materials Science, Vol. 90, pp. 265-275.
DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.04.020, 2014.
- [2] Yin, H., Dai, J., Wen, G., Tian, W., Wu, Q., “Multi-objective optimization design of functionally graded foam-filled graded-thickness tube under lateral impact,” *International Journal of Computational Methods*, Vol. 16, No. 1, pp. 1850088.
DOI: 10.1142/S0219876218500889, 2019.
- [3] Yao, R.-Y., Zhao, Z.-Y., Yin, G.-S., Zhang, B., “Attempt to improve the material utilisation and crashworthiness of grooved tube subjected to axial crushing,” *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 26, No. 1, pp. 77-86.
DOI: 10.1080/13588265.2020.1745598, 2021.
- [4] Zhang, B., Wang, L., Zhang, J., Jiang, Y., Wang, W., Wu, G., “Deformation and energy absorption properties of cenosphere/aluminum syntactic foam-filled circular tubes under lateral quasi-static compression,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 192, pp. 106126.
DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106126, 2021.
- [5] Ruan, D., Lu, G., Chen, F. L., Siores, E., “Dynamic mechanical properties of closed-cell aluminum foams with uniform and graded densities,” *Journal of Materials Research*, Vol. 38, pp. 145-156.
DOI: 10.1557/s43577-023-00592-5, 2023.
- [6] Peroni, M., Solomos, G., Pizzinato, V., “Compressive response and energy absorption of foam-filled aluminum honeycomb composite: Experiments and simulation,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 178, pp. 89-101.
DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.102346, 2023.
- [7] Wu, C., Ye, G., Zhao, Y., Ye, B., Wang, T., Wang, L., Zhang, Z., “Experimental and numerical study of in-plane uniaxial compression response of PU foam filled aluminum arrowhead auxetic honeycomb,” *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 502-512.
DOI: 10.1108/RPJ-08-2023-0267, 2024.



بررسی عددی و تجربی پاسخ پروفیل مربعی آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی در برابر ضربه جانبی و محوری

پویا پیرعلی^{۱*}، محسن حیدری بنی^۲، سید محمدرضا قادری^۳، جعفر اسکندری جم^۴

- ۱- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
- ۲- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
- ۳- کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
- ۴- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

کلمات کلیدی

فوم فلزی
پروفیل مربعی پر شده
ضربه جانبی
ضربه محوری
استهلاک و جذب انرژی

چکیده

فوم‌های فلزی به دلیل ظرفیت بالا در جذب انرژی و در عین حال چگالی پایین، کاربردهای زیادی در ساخت سازه‌های مختلف مانند انواع سپرهای محافظ و سازه‌های محافظ جهت جلوگیری از بار ناشی از انفجار و جذب بارها به‌ویژه بارهای ضربه‌ای دارند. هدف از این پژوهش، بررسی نحوه پاسخ پروفیل در حالت تک جداره و دوجداره تحت بار ضربه‌ای جانبی و محوری باهدف ارزیابی مقدار تأثیر استفاده از فوم آلومینیومی بر استهلاک انرژی و جذب انرژی است. ابتدا پروفیل‌های مربعی تک جداره و دوجداره در محیط نرم‌افزار تحلیلی آباکوس شبیه‌سازی و تأثیر پارامترهایی مانند چگالی فوم آلومینیوم، استفاده از یک جداره یا دوجداره، تأثیر برهم‌کنش بین فوم و دیواره بر رفتار عمومی سازه مورد بررسی قرار گرفت. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمون‌های اعمال ضربه جانبی و محوری با استفاده از سقوط وزنه انجام گرفت و جهت صحت‌سنجی با نتایج شبیه‌سازی ضربه جانبی و محوری مقایسه شدند. نتایج نشان داد که فوم آلومینیومی عملکرد مناسبی بر مقدار لهیدگی و جذب انرژی سازه تحت بار ضربه محوری دارد اما در حالت ضربه جانبی، به دلیل خاصیت شکنندگی (تردی) زیاد، استفاده از فوم تهیه‌شده در سازه تحت ضربه مناسب نبود. بر شدن پروفیل آلومینیومی به‌صورت کامل با فوم آلومینیومی سبب کاهش ۱۸ درصدی مقدار تغییر طول پروفیل تحت ضربه محوری شد. در نمونه‌های محوری پروفیل خالی تحت ضربه مقدار ۱۶ میلی‌متر تغییر طول داشت که ماکزیمم نیروی لهیدگی آن ۳۰ کیلو نیوتون اندازه‌گیری شد. اما برای مقاوم‌ترین پروفیل که پروفیل دوجداره با جدار داخلی ۲۰*۲۰ میلی‌متر است، مقدار لهیدگی ۴ میلی‌متر و ماکزیمم نیروی لهیدگی در حدود ۱۲۳ کیلو نیوتون ثبت شد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

*نویسنده مسئول

پویا پیرعلی

ایمیل

ppirali@mut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه، استفاده از سازه‌های سبک و در عین حال مقاوم، در صنایع مختلف خودروسازی، کشتی‌سازی، هواپیماسازی و ... گسترش پیدا کرده است. فوم‌های فلزی گونه جدیدی از مواد هستند که دارای ساختار سلولی و متخلخل بوده و به دلیل ظرفیت بالای جذب انرژی و در عین حال چگالی پایین، کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارند. ساخت فوم‌های فلزی از دهه ۱۹۲۰ در فرانسه شروع گردید، از اواسط دهه ۱۹۵۰ تجاری‌سازی شد و در اواخر ۱۹۹۰ شتاب گرفت [۱-۳]. در سال‌های اخیر، پیشرفت فوم‌های فلزی سبب بهبود خواص آنها در مقایسه با نوع غیرفلزی و فلزات جامد شده است. فوم‌های فلزی در مقایسه با نوع غیرفلزی دارای مقاومت بهتر و در مقایسه با فلزات جامد، دارای استحکام بالا نسبت به وزن (استحکام ویژه) هستند [۴ و ۵]. به‌طور کلی خواص فیزیکی و مکانیکی این مواد وابسته به چگالی فوم، ریخت‌شناسی حفره‌ها (باز یا بسته بودن حفره‌ها، سایز حفره‌ها) و خواص فلز پایه است. فوم آلومینیومی، به دلیل شکل اسفنجی، تحت ضربه و یا فشار، متراکم شده و حفره‌های آن پر می‌گردد. با پر شدن حفره‌ها به‌طور کامل نیز رفتار فوم به رفتار فلز پایه نزدیک‌تر می‌گردد. درصد تخلخل فوم به نسبت مقدار حجم حفره‌های فوم به حجم کل فوم گفته می‌شود. هرچه درصد تخلخل فوم بیشتر باشد، فوم سبک‌تر بوده و چگالی آن کمتر است [۶-۸]. به دلیل خاصیت جذب انرژی فوم‌های فلزی، ساخت سازه‌های مختلف مانند انواع سپرهای محافظ،

امروزه، استفاده از سازه‌های سبک و در عین حال مقاوم، در صنایع مختلف خودروسازی، کشتی‌سازی، هواپیماسازی و ... گسترش پیدا کرده است. فوم‌های فلزی گونه جدیدی از مواد هستند که دارای ساختار سلولی و متخلخل بوده و به دلیل ظرفیت بالای جذب انرژی و در عین حال چگالی پایین، کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارند. ساخت فوم‌های فلزی از دهه ۱۹۲۰ در فرانسه شروع گردید، از اواسط دهه ۱۹۵۰ تجاری‌سازی شد و در اواخر ۱۹۹۰ شتاب گرفت [۱-۳]. در سال‌های اخیر، پیشرفت فوم‌های فلزی سبب بهبود خواص آنها در مقایسه با نوع غیرفلزی و فلزات جامد شده است. فوم‌های فلزی در مقایسه با نوع غیرفلزی دارای مقاومت بهتر و در مقایسه با فلزات جامد،



محوری باهدف ارزیابی مقدار تأثیر استفاده از فوم آلومینیومی بر استهلاک انرژی وارده ناشی از ضربه است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد تشکیل‌دهنده و خواص مکانیکی

جهت ساخت نمونه‌ها، پروفیل آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر و ابعاد سطح مقطع ۲۰*۲۰ میلی‌متر، ۳۰*۳۰ میلی‌متر و ۵۰*۵۰ میلی‌متر از شرکت آهن یکتا تهیه شد [۲۱] و پس از برش به صورت نمونه‌هایی با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر آماده گردید. فوم آلومینیومی تخلخل بسته، به صورت بلوک‌های برش خورده از شرکت دانش‌بنیان علوم و فناوری‌های نوین رهیافت تهیه گردید. جهت تعیین خواص فوم آلومینیومی، آزمون فشار شبه استاتیک با سرعت فک ۲ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نمونه‌ی فوم آلومینیومی با ابعاد ۵۲۰*۵۲۰*۱۵۰ میلی‌متر انجام شد. شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی این پروژه، با نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس انجام گرفته است. لذا در ادامه روند شبیه‌سازی انجام شده ارائه می‌شود. شبیه‌سازی ضربه جانبی و محوری در نمونه‌های تجربی و نرم‌افزاری یکسان است و تنها تفاوت آنها در وجود ایرادات ناخواسته در مدل تجربی و بدون خطا بودن نمونه نرم‌افزاری است.

۲-۲- ابعاد و کدگذاری نمونه‌ها

در این مطالعه، پروفیل‌های آلومینیومی به صورت تک جداره خالی، تک جداره پر شده با فوم آلومینیومی و دوجداره پر شده با فوم آلومینیومی، تحت ضربه جانبی و محوری به صورت جداگانه توسط یک ضربه‌زننده با سطح مقطع دایره قرار گرفتند. جهت انجام این مطالعه، ۸ نمونه برای آزمون آماده گردید که ۴ نمونه برای ضربه محوری و ۴ نمونه دیگر نیز برای ضربه جانبی ساخته شد. همچنین جهت جلوگیری از تکرار نام کامل هر نمونه، کدهایی برای شناسایی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. در جدول ۱ ابعاد، نام کامل نمونه‌ها، کد نمونه‌ها و نحوه کدگذاری ارائه شده است. از این پس جهت سادگی، کد مربوط به هر نمونه به جای مشخصات آن بیان می‌شود.

۲-۳- فرآیند آزمون

جهت فرآیند آزمون، از دستگای باقابلیت تنظیم ارتفاع پرتابه تا ۲ متر و اتصال وزنه تا جرم ۴۵ کیلوگرم با سطوح مقطع مختلف استفاده شد.

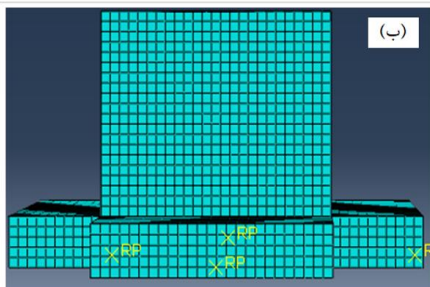
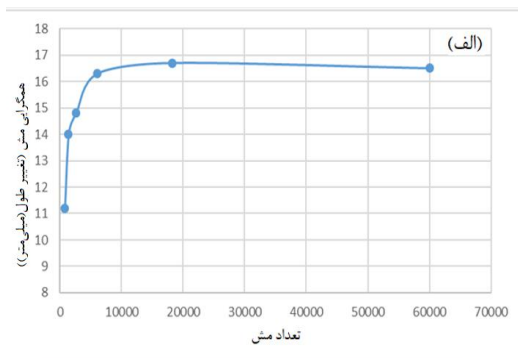
پروفیل‌ها و پنل‌های ساندویچی و سازه‌های محافظ در برابر بار ناشی از انفجار و برخورد گلوله باهدف استهلاک و جذب پارها به‌ویژه بارهای ضربه‌ای گسترش پیدا کرده‌اند [۱ و ۹ و ۱۰]. از پژوهش‌های انجام شده بر روی این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

بررسی پاسخ پروفیل مستطیلی پر شده با فوم پلی‌یورتان به روش تجربی و تئوری تحت بار شبه استاتیک جانبی [۱۱]. بررسی عددی پاسخ پروفیل‌های آلومینیومی پر شده با ۴ نوع فوم آلومینیومی، پلی‌یورتانی، پلی‌اتیلنی و پلی‌استایرنی تحت بار ضربه دینامیکی محوری [۱۲]. بررسی رفتار لوله پر شده با فوم فلزی به روش عددی تحت ضربه سرعت‌پایین شبه استاتیکی [۱۳]. بررسی تجربی و عددی پاسخ لوله‌های فولادی پر شده با فوم آلومینیوم-سنوسفر، تحت بار فشاری شبه استاتیکی [۸]. بررسی رفتار لوله‌های پر شده با فوم‌های درجه‌بندی شده به روش تجربی تحت بار ضربه‌ای با فوم‌های آلومینیوم، آلیاژ A356 [۱۴]. بررسی تجربی جذب انرژی پروفیل‌های پر شده با فوم آلومینیوم تحت ضربه با سرعت کم [۱۵]. بررسی تجربی ضربه با سرعت کم روی لامینات‌های فلزی پر شده با فوم در کاربردهای ایمنی تصادف [۱۶]. بررسی عددی و تجربی قابلیت‌های جذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی سازه‌های موج‌دار فلزی پر شده با فوم آلومینیومی [۱۷]. بررسی ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های بسته سلولی آلومینیومی با چگالی‌های یکنواخت و درجه‌بندی شده [۱۸]. بررسی تجربی و عددی رفتار کامپوزیت‌های لانه‌زنبوری آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی [۱۹]. بررسی تجربی و عددی پاسخ فشاری یک‌محوری سازه لانه‌زنبوری آلومینیومی پر شده با فوم پلی‌اورتان [۲۰].

با توجه به مطالعات انجام گرفته، در اکثر آنها، مواردی از قبیل استفاده از فوم پرکننده سازه به‌ویژه فوم آلومینیومی و همچنین نوع بارگذاری اعم از جانبی و محوری بررسی شده است. اما موردی که با دقت در مطالعات بالا قابل توجه است، عدم بررسی پروفیل‌های پر شده با فوم آلومینیومی در حالت تک جداره و دوجداره تحت بار ضربه دینامیکی محوری و جانبی با انرژی ضربه یکسان و مقایسه نتایج، می‌باشد. از این رو در این مطالعه، نحوه پاسخ پروفیل‌های مربعی پر شده با هسته‌ی فوم آلومینیومی تحت بارگذاری ضربه محوری و جانبی با ساختار تک جداره و دوجداره بررسی می‌گردد. هدف از این پژوهش، بررسی نحوه پاسخ پروفیل با سطح مقطع مربعی پر شده با فوم آلومینیومی در حالت تک جداره و دوجداره تحت بار ضربه جانبی و

ردیف	مشخصات کامل	نوع آزمون	ابعاد جدار داخلی (mm)	ابعاد جدار بیرونی (mm)	کد*
۱	پروفیل تک جداره خالی آلومینیومی	ضربه جانبی	جدار داخلی ندارد	۵۰*۵۰*۵۰	1E0L2
۲	پروفیل تک جداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه جانبی	جدار داخلی ندارد	۵۰*۵۰*۵۰	1F0L2
۳	پروفیل دوجداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه جانبی	۲۰*۲۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	2F2L2
۴	پروفیل دوجداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه جانبی	۳۰*۳۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	2F3L2
۵	پروفیل تک جداره خالی آلومینیومی	ضربه محوری	جدار داخلی ندارد	۵۰*۵۰*۵۰	1E0A2
۶	پروفیل تک جداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه محوری	جدار داخلی ندارد	۵۰*۵۰*۵۰	1F2A2
۷	پروفیل دوجداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه محوری	۲۰*۲۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	2F2A2
۸	پروفیل دوجداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه محوری	۳۰*۳۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	2F3A2

*روش نام گذاری (کد) نمونه‌ها: رقم اول از سمت چپ یعنی اعداد ۱ و ۲، بیانگر تعداد جدار نمونه است. کاراکتر دوم از سمت چپ یعنی حروف E و F به ترتیب بیانگر خالی و پر بودن نمونه از فوم آلومینیومی است. رقم سوم یعنی اعداد ۰، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر ابعاد جداره داخلی ندارد، ۲۰*۲۰ و ۳۰*۳۰ میلی‌متر است. کاراکتر چهارم از سمت چپ یعنی حروف L و A به ترتیب بیانگر ضربه جانبی و محوری است. رقم آخر یعنی عدد ۲ به معنای ضخامت جداره‌های پروفیل آلومینیومی (۲ میلی‌متر) است.



شکل ۱: الف) نمودار استقلال مش ب) مدل مش‌زنی شده جهت نمایش نوع

مش در مدل نرم‌افزاری

در شکل ۱، نمودار مربوط به استقلال از مش نمونه 1E0A2 به‌عنوان مثال ارائه شده و در شکل ۱-الف مدل مش زده‌شده نشان داده شده است. برای این نمونه تعداد مشی که با توجه به سایز بهینه

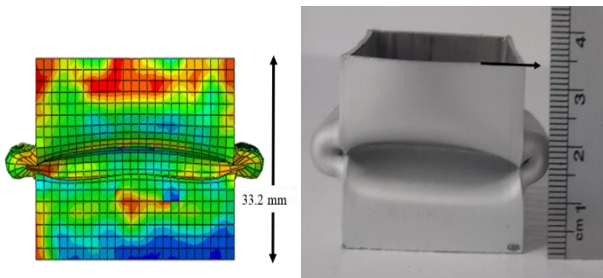
عملکرد این دستگاه به این صورت است که ضربه‌زننده به همراه کالسکه متصل شده به آن که دارای جرم ۴۵ کیلوگرم است، توسط گیره آهنربایی تا ارتفاع قابل تنظیم بالا رفته و سپس با قطع مگنت، وزنه رها می‌شود. وزنه با نمونه برخورد می‌کند و لهیدگی^۱ در اثر تغییر شکل پلاستیک و عملکرد نمونه‌ها در برابر ضربه قابل بررسی است. در حین فرود وزنه، داده‌ی شتاب وزنه توسط حس‌گر به کامپیوتر وارد می‌گردد و نمودار شتاب-زمان وزنه قابل دسترس است.

۳- نتایج و بحث

جهت اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، بررسی استقلال از مش انجام گردید تا بهترین اندازه مش برای انجام شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گیرد. پس از انجام این بررسی مشخص شد که مش با سایز ۲ میلی‌متر برای مدل، با نوع S4R برای پروفیل و C3D8R برای فوم آلومینیومی بهترین سایز برای شبیه‌سازی نمونه‌ها می‌باشد. زیرا در این سایز، همگرایی نتایج مربوط به مقدار تغییر طول نمونه‌ها حاصل شد.

¹ Crushing

می‌باشد. در شکل ۳، مقایسه‌ی طول ثانویه تجربی و عددی برای پروفیل 1E0A2 ارائه شده است.



شکل ۳: مقایسه طول ثانویه تجربی و عددی پروفیل 1E0A2 پس از آزمون ضربه محوری

با توجه به شکل ۳، در پروفیل 1E0A2 پس از آزمون ضربه محوری نحوه چین خوردگی مدل عددی، تا حد بسیار زیادی به مدل تجربی نزدیک است. دیواره‌ی پروفیل از ناحیه وسط دچار چین خوردگی و تاشدگی شده و شکل آکاردئونی به خود گرفته است. همچنین در مدل عددی نیز این چین خوردگی از ناحیه وسط اتفاق افتاده است و تطابق بسیاری با نتیجه تجربی دارد. تغییر طول در مدل عددی ۱۶/۸ میلی‌متر و در مدل تجربی ۱۶ میلی‌متر است. اختلاف ۵ درصد به وجود آمده در مقدار تغییر طول پروفیل در دو حالت عددی و تجربی به وجود آمده ممکن است، ناشی از وجود عیوب احتمالی در فرآیند اکستروژن پروفیل آلومینیوم و همچنین اختلاف ناچیز بین خواص مکانیکی پروفیل ساخته شده با خواص وارد شده در نرم‌افزار آباکوس باشد. در شکل ۴- الف نیز نمای بالای تجربی و عددی پروفیل 1E0A2 قابل مشاهده است.

در شکل ۴- ب مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 1F0A2 تحت ضربه محوری، ارائه شده است. تفاوت پروفیل 1F0A2 و 1E0A2 فقط در پر بودن پروفیل 1F0A2 و خالی بودن پروفیل 1E0A2 از فوم آلومینیوم است. طول پروفیل 1F0A2، پس از آزمون ۳۷ میلی‌متر و پس از شبیه‌سازی عددی ۳۸/۷ میلی‌متر به دست آمده است که بین مقادیر تغییر طول عددی و تجربی حدود ۱۳٪ خطا وجود دارد. به‌طور کلی مقدار تغییر طول پروفیل 1F0A2 در حالت تجربی نسبت به مدل 1E0A2 (پروفیل خالی)، به مقدار ۳ میلی‌متر کمتر شده است که این تفاوت به دلیل استفاده از فوم آلومینیومی در ساختار پروفیل و عملکرد فوم به لحاظ جذب انرژی ناشی از ضربه و کاهش مقدار لهیدگی پروفیل است. همچنین در نتیجه تجربی پروفیل 1F0A2، در قسمت بالای پروفیل چین خوردگی و تاشدگی به سمت داخل دیواره قابل رؤیت است که در مدل عددی نیز تا حد زیادی این

۲ میلی‌متر برای کل مدل به دست می‌آید، برابر با ۱۸۲۵۰ عدد است.

۱-۳- نتایج مربوط به آزمون ضربه محوری

پس از انجام آزمون ضربه از ارتفاع ۱/۲ متری توسط دستگاه آزمون سقوط وزنه، شکل نهایی نمونه‌های محوری تحت ضربه به صورت شکل ۲ است.



شکل ۲: تغییر شکل نهایی و لهیدگی نمونه‌های مورد نظر تحت آزمون ضربه محوری

با توجه به شکل ۲، مقدار لهیدگی هر نمونه و همچنین شکل چین خوردگی هر نمونه وابسته به وجود فوم آلومینیومی و تعداد جدار پروفیل آلومینیومی استفاده شده در ساخت آن نمونه می‌باشد. در قسمت‌های بعدی به صورت کامل‌تر بر روی مقدار لهیدگی، شکل کلی نمونه، نمودار نیرو-زمان هر نمونه و همچنین مقدار جذب انرژی هر نمونه بحث می‌شود.

۲-۳- مقدار لهیدگی و چین خوردگی

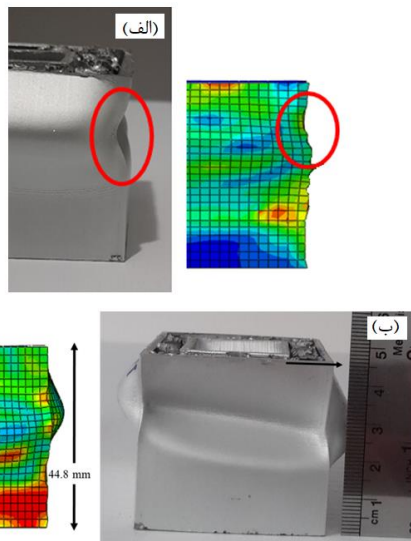
در جدول ۲، مقدار لهیدگی و تغییر طول هر نمونه بر اساس نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی ارائه شده است. لازم به ذکر است، مبنای درصد خطا، طول تجربی می‌باشد.

جدول ۲: مقدار لهیدگی و تغییر طول نمونه‌ها بر اساس نتایج شبیه‌سازی و تجربی آزمون ضربه محوری

کد مدل	طول اولیه	تغییر طول	تغییر طول	درصد خطا (%)
	پروفیل (میلی‌متر)	تجربی (میلی‌متر)	عددی (میلی‌متر)	
1E0A2	۵۰	۱۶	۱۶/۸	۵٪
1F0A2	۵۰	۱۳	۱۱/۳	۱۳٪
2F2A2	۵۰	۴	۴/۹	۲۲/۵٪
2F3A2	۵۰	۵	۵/۲	۶٪

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۲، طول پروفیل پس از آزمون در نمونه 1E0A2، ۳۴ میلی‌متر و پس از شبیه‌سازی عددی، ۳۳/۲ میلی‌متر به دست آمده است که مطابق مقادیر تغییر طول پروفیل به روش حل عددی، این مقدار نسبت به مدل تجربی دارای ۵٪ خطا

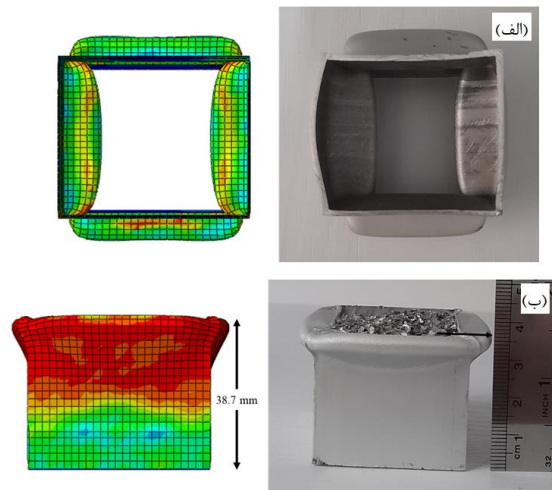
تغییر طول در این پروفیل، نسبت به مدل 1E0A2 (پروفیل خالی) و مدل 1F0A2 (پروفیل پر شده با فوم آلومینیومی) بسیار کمتر است زیرا استفاده از پروفیل دوجداره و همچنین فوم آلومینیومی، سبب افزایش مقدار استهلاک و جذب انرژی و همچنین بهبود عملکرد پروفیل در برابر بار ضربه محوری بانرژی یکسان نسبت به سایر مدل‌ها شده است. همچنین با توجه به مدلهیدگی پروفیل 2F2A2، بادکردگی و فرورفتگی در قسمت بالای جداره پروفیل به صورت متقارن در نمونه تجربی دیده می‌شود که در نمونه عددی نیز این طرح قابل‌رؤیت است. در شکل ۶-الف نیز نمای جانبی فرورفتگی در بدنه مدل تجربی و عددی پروفیل 2F2A2 قابل‌مشاهده است. در بدنه پروفیل فرورفتگی ایجاد شده است که این فرورفتگی به صورت کمتر در شکل عددی نیز دیده می‌شود. در شکل ۶-ب مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 2F3A2، ارائه شده است.



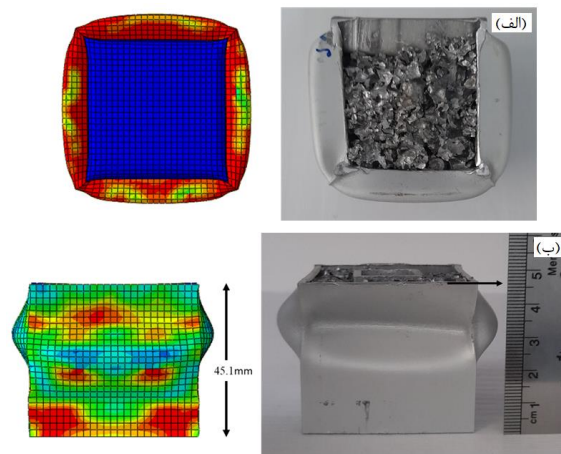
شکل ۶: الف) نمای جانبی فرورفتگی در بدنه مدل تجربی و عددی پروفیل 2F2A2 (ب) مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 2F3A2

تفاوت این پروفیل با پروفیل 2F2A2، فقط در ابعاد جدار داخلی پروفیل استفاده شده در ساخت پروفیل‌ها است. طول پروفیل 2F3A2، پس از آزمون ۴۵ میلی‌متر و پس از شبیه‌سازی عددی ۴۴/۸ میلی‌متر به‌دست آمده است. همچنین بین مقدار تغییر طول بین دو مدل عددی و تجربی ۶ درصد خطا و اختلاف وجود دارد. مقدار تغییر طول تجربی این پروفیل نسبت به پروفیل 2F2A2 (جدار داخلی ۲۰*۲۰ میلی‌متر) به مقدار ۱ میلی‌متر بیشتر است که این مقدار به دلیل وجود مقدار کمتری از فوم در پروفیل 2F3A2 و استحکام کمتر در برابر ضربه حاصل شد. همچنین بازم به دلیل وجود دو جدار و فوم آلومینیومی

تغییر شکل به‌دست آمده است. در شکل ۵-الف نیز نمای از بالا مدل تجربی و عددی پروفیل 1F0A2 قابل‌مشاهده است. در شکل ۵-ب مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 2F2A2، ارائه شده است.



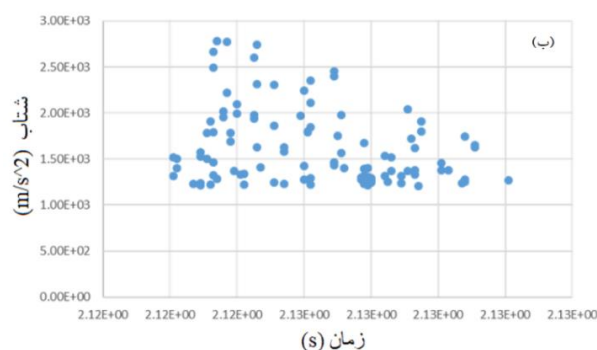
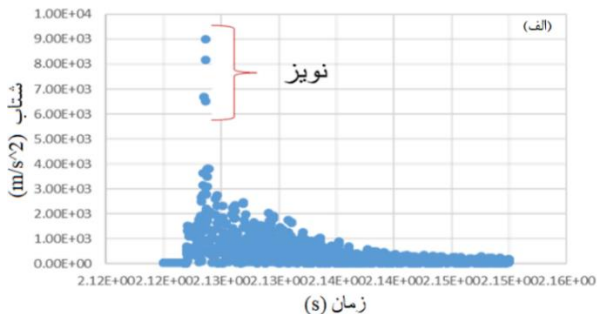
شکل ۴: الف) نمای از بالا تغییر شکل تجربی و عددی پروفیل 1E0A2 (ب) مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 1F0A2 پس از آزمون ضربه محوری



شکل ۵: الف) نمای بالای تجربی و عددی پروفیل 1F0A2 (ب) مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 2F2A2

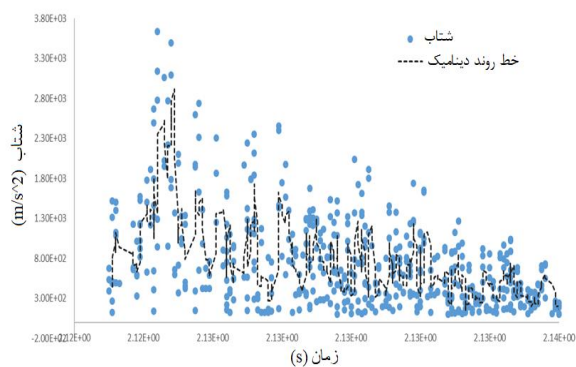
با توجه به جدول ۲ و شکل ۵-ب، طول پروفیل 2F2A2 پس از آزمون، ۴۶ میلی‌متر و پس از شبیه‌سازی ۴۵/۱ میلی‌متر، به‌دست آمده است که بین مقدار تغییر طول پروفیل در ۲ حالت تجربی و عددی، حدود ۲۲٪ خطا وجود دارد. علت زیاد بودن مقدار خطا، این است که پروفیل آلومینیومی تهیه‌شده با اندازه ۲۰*۲۰ میلی‌متر، برخلاف پروفیل ۵۰*۵۰ و ۳۰*۳۰ میلی‌متری، پروفیل مهندسی نبوده و به‌صورت دستی ریخته‌گری شده است. به همین خاطر ضخامت پروفیل یکنواخت نبوده و دارای اعوجاج می‌باشد. به‌طور کلی این مقدار

فیلتر (همراه با نویز) و بعد از فیلتر کردن که در نرم‌افزار اکسل^۱ انجام شده است، مشاهده می‌گردد.



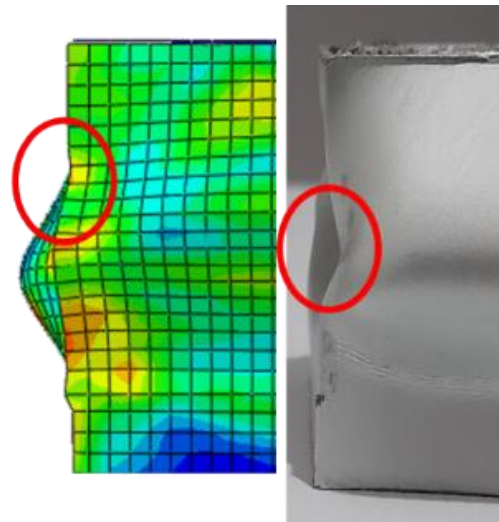
شکل ۸: الف) نمودار شتاب - زمان مربوط به مدل 2F2A2 در حالت عادی بدون فیلتر برای آزمون ب) نمودار شتاب - زمان مربوط به مدل 2F2A2 بعد از فیلتر برای آزمون

در شکل ۹ نمودار شتاب-زمان تجربی نمونه 2F2A2 قابل مشاهده است.



شکل ۹: نمودار شتاب - زمان تجربی نمونه 2F2A2

در ساختار پروفیل، مقدار لهیدگی این پروفیل (2F3A2) نسبت به پروفیل‌های پر شده با فوم و خالی، بسیار کمتر است. با توجه به شکل ۶-ب، در مدل تجربی بادکردگی به صورت نامتقارن دیده می‌شود و بادکردگی جدار سمت راست پایین‌تر از بادکردگی جدار سمت چپ است که این طرح در شکل حاصل از نتیجه عددی نیز قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۷ نیز نمای جانبی فرورفتگی در بدنه مدل تجربی و عددی پروفیل 2F3A2 قابل مشاهده است.



شکل ۷: نمای جانبی فرورفتگی در بدنه مدل تجربی و عددی پروفیل 2F3A2

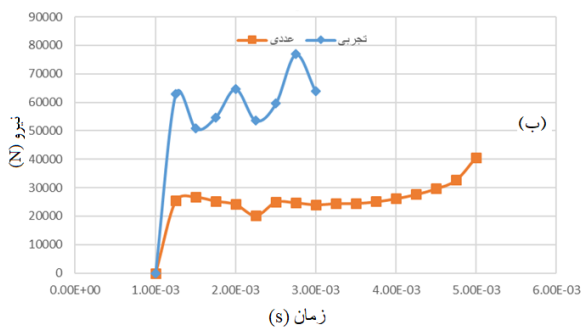
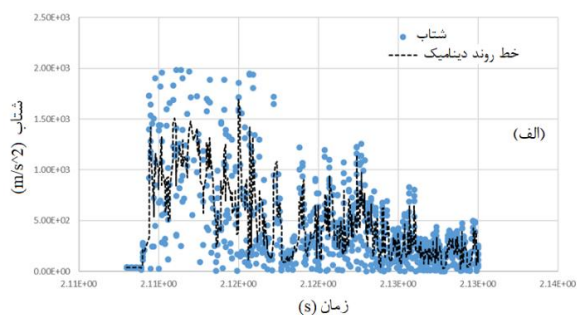
طبق شکل ۷، در بدنه پروفیل فرورفتگی ایجاد شده است که این فرورفتگی به صورت کمتر در شکل عددی نیز دیده می‌شود. اما در مدل عددی در پایین فرورفتگی، برآمدگی ایجاد شده است که در شکل تجربی دیده نمی‌شود و این نشان از اختلاف رفتار پروفیل و فوم مدل شده با مدل تجربی دارد.

۳-۳- نمودار نیرو-زمان و شتاب-زمان

داده‌هایی که در حین انجام آزمون از دستگاه آزمون سقوط وزنه به عنوان خروجی دریافت شد، داده‌های مربوط به نمودار شتاب - زمان ضربه‌زنده است. اما با توجه به اینکه حس‌گر شتاب‌سنج دارای نویز زیادی است، جهت دریافت نمودار شتاب - زمان برای هر مدل، لازم شد تا نتایج خروجی فیلتر و نویزگیری شود که این امر بسیار وقت‌گیر بوده و با خطای زیادی همراه است. در شکل ۸ الف و ب، نمودار شتاب زمان مربوط به مدل 2F2A2 در حالت عادی بدون

¹ Microsoft Office Excel

با توجه به نمودار ۱۱-ب، مقدار نیروی لهیدگی ماکزیمم عددی پروفیل 2F3A2، ۱۲۵ کیلو نیوتون می‌باشد اما این پارامتر در مدل تجربی حدود ۱۴۰ کیلو نیوتون است. با توجه به نزدیک بودن مقدار تغییر طول این پروفیل و پروفیل 2F2A2، نزدیک بودن مقدار نیروی لهیدگی ۲ پروفیل نیز تا حدودی قابل انتظار است زیرا هر دو پروفیل دارای جنس مشابه و ساختار نزدیک به هم هستند. به‌طور کلی با توجه به خطای حس‌گر دستگاه آزمون نتایج تجربی به‌دست‌آمده قابل‌اتکا نبوده و بهتر است از نتایج عددی استفاده شود. در شکل ۱۲ الف و ب نمودار شتاب زمان تجربی و نمودار نیرو-زمان تجربی و عددی نمونه 1EOA2 قابل‌مشاهده است.

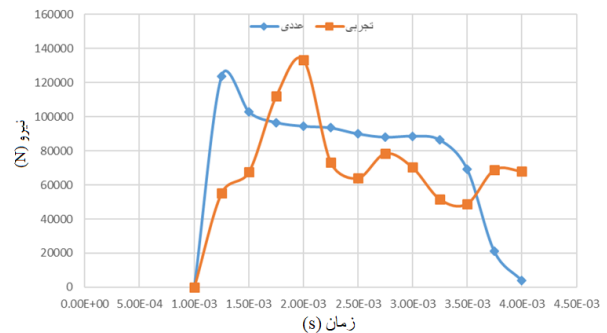


شکل ۱۲: الف) نمودار شتاب - زمان تجربی نمونه 1EOA2 (ب) نمودار نیرو -

زمان تجربی و عددی نمونه 1EOA2

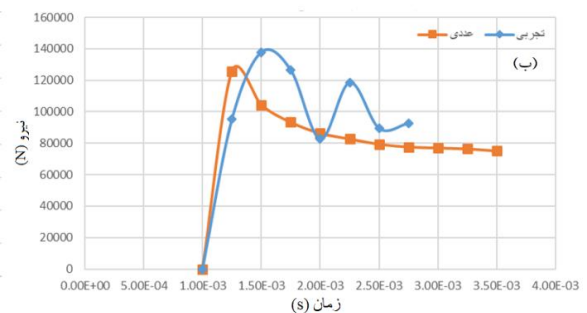
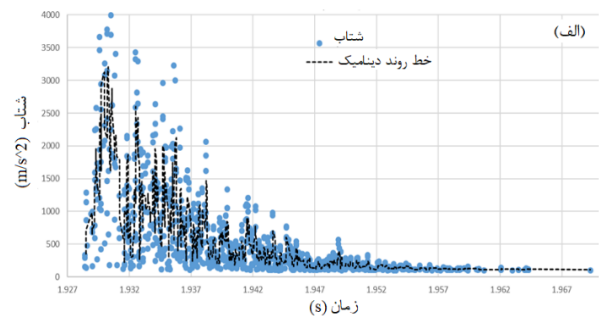
با توجه به شکل‌های ۱۲ الف و ب، مقدار نیروی لهیدگی ماکزیمم پروفیل 1EOA2، خیلی کمتر از سایر نمونه‌ها است زیرا پروفیل خالی مقاومت زیادی در برابر ضربه از خود نشان نداده است. اما مقدار نیرو در نمونه تجربی تقریباً ۲ برابر مدل عددی است که حکایت از خطای بیش‌از‌حد حس‌گر دارد زیرا تمامی نمودارهای تجربی حاصل‌شده دارای نویز بسیار زیاد هستند که نمی‌توان مقدار دقیقی از آن به‌عنوان نتیجه استخراج کرد. همچنین با دقت در نمودار شتاب زمان، نیروی لهیدگی ماکزیمم در انتهای نمودار حاصل‌شده است که این امر به دلیل وجود یک چین‌خوردگی کامل در جدار پروفیل می‌باشد. مقدار نیروی لهیدگی تا کامل شدن چین افزایش یافته و در حالتی که

با توجه به نمودار بالا که حاوی روند دینامیک شتاب نیز می‌باشد، نمودار نیرو - زمان تجربی و همچنین عددی نمونه 2F2A2 مطابق شکل ۱۰ به دست می‌آید.



شکل ۱۰: نمودار نیرو - زمان تجربی و عددی نمونه 2F2A2

با توجه به نمودار ۱۰، مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی شبیه‌سازی عددی به مقدار حدودی ۱۲۳ کیلو نیوتون و برای مدل تجربی در حدود ۱۳۳ کیلو نیوتون می‌باشد. اما با توجه به تغییرات زیاد و همچنین ایجاد نویز در دستگاه آزمون، این مقدار از نیروی لهیدگی برای مدل تجربی دارای خطا است. همچنین مقدار نیروی میانگین در مدل تجربی کمتر از نیروی میانگین مدل عددی است که با توجه به خطای موجود، این مقدار قابل‌بحث نیست. در شکل ۱۱ الف و ب نمودار شتاب - زمان تجربی و نمودار نیرو-زمان تجربی و عددی نمونه 2F3A2 قابل‌مشاهده است.



شکل ۱۱: الف) نمودار شتاب - زمان تجربی نمونه 2F3A2 (ب) نمودار نیرو -

زمان تجربی و عددی نمونه 2F3A2

جدول ۳: مقادیر نیروی لهیدگی ماکزیمم و میانگین نمونه‌ها در حالت عددی و تجربی

کد مدل	نیروی ماکزیمم (KN)		نیروی میانگین (KN)	
	عددی	تجربی	عددی	تجربی
1E0A2	۴۰/۶	۷۶/۸	۲۶/۶	۵۴/۰۶
1F0A2	۶۱/۰۲	۸۰/۲	۴۵/۲	۴۹/۸
2F2A2	۱۲۲/۹	۱۳۳/۳	۹۳/۳	۷۲/۹
2F3A2	۱۲۵/۶	۱۳۷/۸	۸۷/۸	۱۰۶/۱

مقدار انرژی جذب شده برابر با مساحت زیر نمودار نیرو جابه‌جایی است که طبق رابطه ۱ [۲۲] تعریف می‌شود که در آن p مقدار نیرو و dx تغییرات طول می‌باشد.

$$E = \int P dx \quad (1)$$

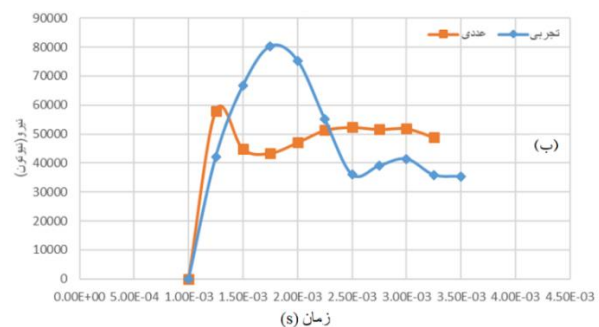
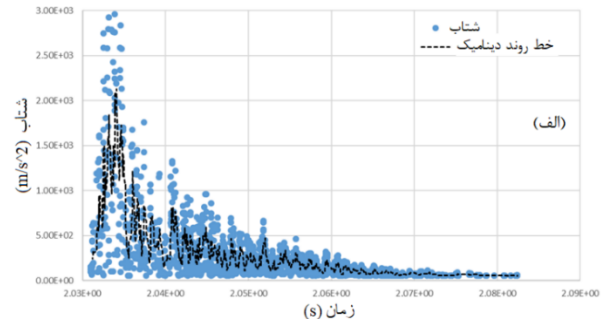
در جدول ۴، مقدار جذب انرژی هریک از مدل‌ها طبق نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی عددی و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است. لازم به ذکر است به دلیل خطا و نویز زیاد در داده‌های نتایج تجربی، این نتایج قابل استناد نبوده و از نتایج شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود.

جدول ۴: مقادیر انرژی جذب شده برای مدل‌های تحت ضربه محوری (نتایج عددی)

کد مدل	انرژی جذب شده (ژول)	
	کل	X=۴/۹ mm
1E0A2	۴۴۶/۸۸	۱۳۰/۳۴
1F0A2	۵۱۰/۷۶	۲۲۱/۴۸
2F2A2	۴۵۷/۱۷	۴۵۷/۱۷
2F3A2	۴۵۶/۵۶	۴۳۰/۲

مقدار انرژی وارده به مدل‌ها در اثر ضربه محوری برابر با ۵۳۰ ژول است. با توجه به مقادیر جدول ۴، مقدار انرژی جذب شده کل در سازه برای همه‌ی مدل‌ها تقریباً بیش از ۸۰ درصد انرژی وارده است. با توجه به اینکه مقدار تغییر طول در مقدار انرژی جذب شده عامل تأثیرگذار است لذا باید این پارامتر در شرایط تعادلی برای هر ۴ نمونه موجود مقایسه شود. جهت این کار، با لحاظ کمترین مقدار تغییر طول که متعلق به نمونه 2F2A2 است، مقدار تغییر طولی که در آن انرژی جذب شده اندازه‌گیری می‌شود، برابر با ۴/۹ میلی‌متر

چین خوردگی کامل می‌شود، نیروی لهیدگی به ماکزیمم حد خود می‌رسد. در شکل ۱۳ الف و ب نمودار شتاب زمان تجربی و نمودار نیرو زمان تجربی و عددی نمونه 1F0A2 قابل مشاهده است.



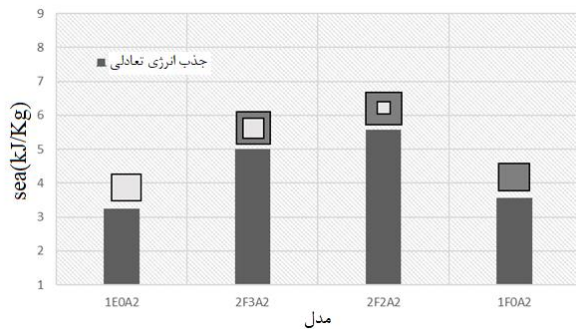
شکل ۱۳: الف) نمودار شتاب - زمان تجربی نمونه 1F0A2 ب) نمودار نیرو - زمان تجربی و عددی نمونه 1F0A2

با توجه به شکل ۱۳-ب، مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی عددی تقریباً برابر با ۶۰ کیلو نیوتون است و برای آزمون برابر با ۸۰ کیلو نیوتون می‌باشد که به نسبت مدل پروفیل خالی (1E0A2)، دو برابر بیشتر است زیرا وجود فوم آلومینیومی در این مدل سبب بهبود عملکرد سازه شده و مقدار تغییر طول این مدل نسبت به مدل پروفیل خالی کمتر است. پس مقاومت بیشتری در برابر لهیدگی در نمونه پر شده با فوم انتظار می‌رود که این نتیجه با توجه به نمودار نیرو زمان قابل مشاهده است.

۳-۴- نیروی لهیدگی، انرژی جذب شده و کارایی نیروی لهیدگی

برای بررسی مقدار مقاومت در برابر ضربه هریک از نمونه‌ها، مقادیر مربوط به نیروی لهیدگی ماکزیمم و میانگین هر نمونه با توجه به نمودار نیرو-زمان مدل‌ها که در بخش قبل ارائه گردید، محاسبه شد. در جدول ۳ مقادیر مربوط به نیروی لهیدگی ماکزیمم و میانگین نمونه‌ها در حالت تجربی و عددی دیده می‌شود.

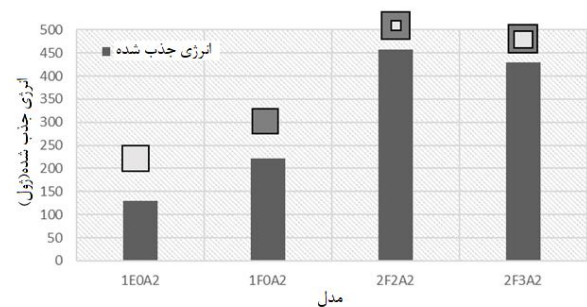
محاسبه شده است. بر این اساس با افزایش وزن پروفیل، مقدار انرژی جذب شده ویژه پروفیل افزایش یافته و در نمونه 2F2A2 به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. اما با توجه به اینکه وزن پروفیل 2F3A2 از 2F2A2 بیشتر است، این افزایش وزن تأثیر منفی بر انرژی جذب شده ویژه گذاشته و این مقدار برای پروفیل 2F3A2 کاهش پیدا کرده است. در شکل ۱۵ نمودار انرژی جذب شده تعادلی ویژه نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نمودار جذب انرژی تعادلی ویژه نمونه‌های محوری

با توجه به شکل ۱۵، می‌توان به این صورت نیز نتیجه گرفت که با افزایش مقدار فوم به کاررفته در پروفیل، مقدار جذب انرژی ویژه نیز تا یک نقطه افزایش می‌یابد و پس از آن، افزایش بیشتر مقدار فوم سبب کاهش مقدار جذب انرژی ویژه می‌شود. راندمان نیروی لهیدگی یا به اختصار CFE^۲، به صورت نیروی میانگین لهیدگی تقسیم بر نیروی ماکزیمم لهیدگی تعریف می‌شود. افزایش مقدار فوم در پروفیل، فوم می‌تواند به خوبی انرژی را جذب کرده و فشار را توزیع کند، که باعث افزایش انرژی جذب شده ویژه می‌شود. فوم باعث می‌شود که نیروی وارد شده به ساختار در طول فرآیند لهیدگی به طور یکنواخت تر توزیع شود و در نتیجه، جذب انرژی بیشتری را امکان پذیر می‌سازد. هنگامی که مقدار فوم به حدی برسد که فضای خالی بین فوم و دیواره پروفیل کاهش یابد، خاصیت الاستیکی فوم می‌تواند موجب افزایش فشار و در نتیجه کاهش ظرفیت جذب انرژی شود. در این حالت، فوم ممکن است به حدی فشرده شود که دیگر نتواند انرژی بیشتری را جذب کند و این می‌تواند منجر به کاهش انرژی جذب شده ویژه شود. با افزایش فوم، ممکن است در ابتدا نیروی میانگین لهیدگی افزایش یابد (به دلیل بهبود جذب انرژی)، اما پس از رسیدن به یک نقطه بحرانی، نیروی ماکزیمم لهیدگی ممکن است کاهش یابد، که می‌تواند منجر به کاهش CFE شود. در این نقطه، افزایش بیشتر فوم می‌تواند

در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۴ مقدار انرژی جذب شده در این طول نمایش داده شده است. کمترین مقدار انرژی جذب شده مربوط به نمونه 1E0A2 است که در آن از هیچ فومی استفاده نشده است. بیشترین مقدار انرژی جذب شده که ۲/۵ برابر انرژی جذب شده پروفیل خالی می‌باشد نیز متعلق به نمونه 2F2A2 است که دارای ساختار ۲ جداره بوده و از فوم نیز در ساخت آن استفاده شده است. در شکل ۱۴ نمودار جذب انرژی تعادلی نمونه‌ها در طول تعادلی ۴/۹ میلی‌متر دیده می‌شود.



شکل ۱۴: نمودار انرژی جذب شده تعادلی نمونه‌ها در ۴/۹ میلی‌متر

انرژی جذب شده ویژه با به اختصار SAE^۱ به صورت نسبت انرژی جذب شده به وزن نمونه بیان می‌شود [۲۳]. در جدول ۵، مقادیر انرژی جذب شده ویژه و انرژی جذب شده تعادلی ویژه در $x=4.9 \text{ mm}$ ارائه شده است.

جدول ۵: مقادیر انرژی جذب شده ویژه مدل‌های محوری

کد مدل	انرژی جذب شده ویژه (Kj/Kg)		وزن مدل (Kg)
	کل	X=۴/۹ mm	
1E0A2	۱۱/۱۷	۳/۲۵	۰/۰۴۰
1F0A2	۸/۲۳	۳/۵۷	۰/۰۶۲
2F2A2	۵/۵۷	۵/۵۷	۰/۰۸۲
2F3A2	۵/۳	۵	۰/۰۸۶

با توجه به جدول ۵، مقدار انرژی جذب شده ویژه پروفیل خالی که دارای کمترین وزن است، برابر با ۱۱/۱۷ کیلوژول بر کیلوگرم است. پس از آن پروفیل با فوم و جدار داخلی، سبب کاهش مقدار انرژی جذب شده ویژه پروفیل می‌شود که این امر به دلیل افزایش وزن پروفیل است. به دلیل وابستگی مقدار انرژی جذب شده ویژه به تغییر طول پروفیل، جذب انرژی ویژه تعادلی پروفیل در طول تعادلی

¹ Specific Absorbed Energy

² Crush force efficiency

جاذب انرژی، مدل دوجداره با جدار داخلی 20×20 میلی‌متر یا همان 2F2A2 می‌باشد. به‌طور کلی و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برحسب پارامترهای مقدار تغییر طول، مقدار جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و راندمان نیروی لهیدگی، نمونه 2F2A2 بهترین عملکرد را در برابر بار ضربه محوری به نسبت مدل‌های دیگر دارد. همچنین در صورت استفاده از فوم با چگالی بالاتر ممکن است این مدل عملکرد بسیار بهتری را ارائه دهد اما با توجه به خطوط تولید فوم فلزی در حال حاضر در ایران و امکانات داخلی لازم است مطالعات بیشتری جهت امکان‌سنجی تولید این مدل برای استفاده در سازه‌های جاذب انرژی در صنایع مختلف انجام شود.

۳-۵- نتایج مربوط به آزمون ضربه جانبی

پس‌ازانجام آزمون ضربه جانبی، به دلیل عملکرد بسیار ضعیف فوم در برابر ضربه و ساختار فوم که برخلاف تصور بسیار شکننده بوده و به دلیل خاصیت تراکم‌پذیری بالا، رفتاری همانند فوم‌های تولیدشده در خارج از ایران که در مقالات یافت می‌شود، نداشت، لذا نمونه‌های جانبی تحت ضربه کاملاً له شدند و فوم‌هایی که درون پروفیل‌ها قرار داشت خورد و به بیرون ریخته شد. در شکل ۱۷، مدل‌های جانبی پس از ضربه نمایش داده شده است.



شکل ۱۷: مدل‌های جانبی پس از آزمون ضربه

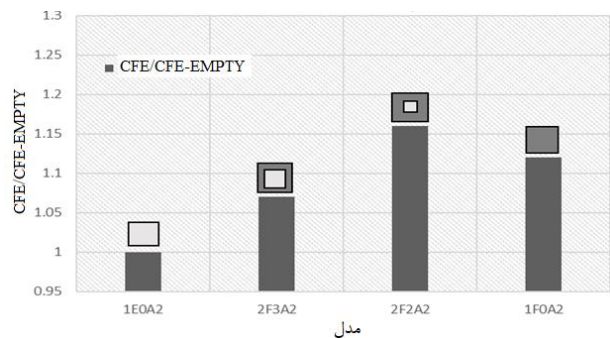
با دقت در نمونه 1E0L2 و 1F0L2، مشاهده می‌شود که وجود فوم در سازه در برابر ضربه جانبی بی‌تأثیر بوده و مقدار لهیدگی هر دو نمونه به یک اندازه می‌باشد حتی قسمتی هم از فوم در اثر ضربه خورد شده و به بیرون ریخته است درحالی‌که فوم‌هایی که در خارج از ایران تولید می‌شوند تراکم‌پذیری بالایی دارند و احتمال خورد شدن آنها بسیار پایین است. در شکل ۱۸ الف تا ت، مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل‌های جانبی ارائه شده است.

به عدم کارایی ساختار در جذب انرژی منجر شود، چراکه در این حالت نیروی ماکزیمم لهیدگی به دلیل فشردگی فوم یا شکست آن ممکن است کاهش یابد. [۱۲]. در جدول ۶ مقادیر راندمان نیروی لهیدگی برای مدل‌های محوری بر طبق نتایج عددی ارائه شده است.

جدول ۶: مقادیر راندمان نیروی لهیدگی مدل‌های محوری

کد مدل	CFE	CAE/CFE-EMPTY
1E0A2	۰/۶۵	۱
2F3A2	۰/۷	۱/۰۷
2F2A2	۰/۷۶	۱/۱۵
1F0A2	۰/۷۳	۱/۱۲

با توجه به جدول ۶ کمترین مقدار راندمان نیروی لهیدگی متعلق به مدل 1E0A2 (پروفیل خالی) و بیشترین آن متعلق به 2F2A2 می‌باشد. مقدار راندمان نیروی لهیدگی برای یک جاذب انرژی ایدئال ۱ (۱۰۰٪) می‌باشد اما دستیابی به این عدد بسیار مشکل است. در جدول ۶ همچنین نسبت راندمان نیروی لهیدگی هر مدل به راندمان مدل 1E0A2 (پروفیل خالی) دیده می‌شود که این عدد برای پروفیل خالی برابر با ۱ است. به‌طور کلی و با توجه به مقادیر درج‌شده در جدول ۶، مدل 2F2A2 دارای بیشترین راندمان در مقایسه با سایر مدل‌ها و همچنین بیشترین نسبت راندمان در مقایسه با مدل پروفیل خالی به مقدار ۱۱۵٪ تفاوت می‌باشد. در شکل ۱۶ نمودار مربوط به نسبت راندمان نیروی لهیدگی مدل‌ها ارائه شده است.



شکل ۱۶: نمودار نسبت راندمان نیروی لهیدگی (CFE/CFE-EMPTY)

نمونه‌های محوری

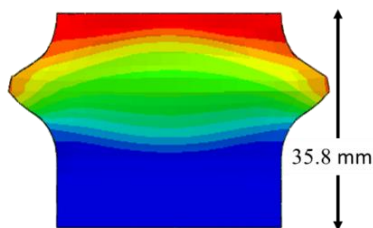
با توجه به شکل ۱۶، با افزایش مقدار فوم استفاده‌شده در سازه، مقدار نسبت راندمان نیروی لهیدگی افزایش‌یافته و در نمونه 2F2A2 به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. اما با حذف پروفیل داخلی و پر شدن کامل پروفیل از فوم، این نسبت کاهش می‌یابد. پس ایدئال‌ترین مدل

خواصی که در جدول ۴ ارائه شده است، انجام شد [۲۴]. همچنین به دلیل اینکه بهتر است تا فوم آلومینیومی در پروفیل ریخته‌گری شود تا کاملاً به جداره پروفیل بچسبد و از شکستگی و خورد شدگی احتمالی ناشی از عدم چسبندگی در حین ضربه جلوگیری شود، این بار، فوم‌ها کاملاً چسبیده به دیواره و با قید Tie مدل شدند تا اثر برهم‌کنش بین دیواره و فوم نیز بررسی شود. در شکل‌های ۱۹ تا ۲۲، هندسه‌ی مدل عددی با خواص فوم پژوهش مرجع ۳۲ قابل مشاهده است [۲۴].



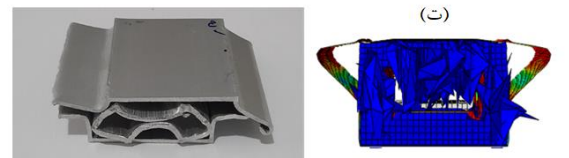
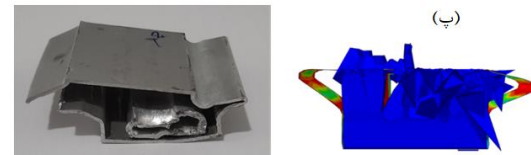
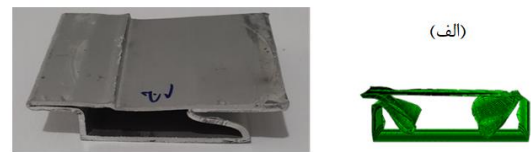
شکل ۱۹: هندسه عددی مدل 1E0L2

طبق شکل ۱۹ مدل 1E0L2 در اثر بار ضربه جانبی به‌طور کامل له شده است و وجود نگه‌دارنده مانع از ادامه لهیدگی آن شده است. همچنین این مدل برخلاف مدل 1E0A2 که به‌صورت محوری تحت بار ضربه‌ای قرار گرفت، مقدار تغییر طول و لهیدگی بسیار بیشتری را داشته است.



شکل ۲۰: هندسه عددی مدل 1F0L2 با خواص فوم پژوهش [۲۴]

طبق شکل ۲۰، پروفیل مدل شده با فوم مقاوم‌تر از ناحیه وسط جداره‌ها دچار بادکردگی و چین شده است. اما در پروفیل با خواص فوم خریداری شده، مقدار لهیدگی بسیار بیشتر بوده و فوم عملکرد مناسبی از خود نشان نداده و خورد شده است. عملکرد فوم به این شکل است که تحت ضربه فشرده شده و حفره‌های فوم به تدریج در اثر تراکم، بسته می‌شود و رفتار فوم به رفتار آلومینیوم جامد نزدیک‌تر می‌گردد. در اثر ممزوج شدن فوم و جداره آلومینیومی در حین ریخته‌گری، احتمال جدایش فوم از دیواره بسیار کم است و فوم ناحیه بادکردگی پروفیل را پر می‌کند.



شکل ۱۸: الف) مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل 1F0L2 (ب) مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل 1F0L2 (پ) مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل 2F2L2 (ت) مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل 2F3L2

با توجه به شکل ۱۸، مدل عددی پس از شبیه‌سازی و با تغییر شکل نادرست المان‌ها، با خطا مواجه شده و بر اساس خطا متوقف شده است. زیرا تغییر شکل المان‌های فوم آلومینیومی بیش از حد معمول بوده و نشان‌دهنده‌ی عملکرد نادرست فوم آلومینیومی در این شبیه‌سازی است که با توجه به نتایج تجربی نیز فوم تهیه شده عملکرد قابل قبولی در برابر ضربه نداشته و بسیار شکننده است. در حین ضربه فوم آلومینیومی درون پروفیل خورد شده و به بیرون ریخته شده است که نشان از عملکرد نامناسب و شکننده بودن فوم دارد. همچنین نمونه‌ها به‌صورت کامل له شده‌اند.

۳-۶- لهیدگی و تغییر طول مدل‌های عددی جدید

جهت بررسی رفتار فوم استفاده شده در پژوهش لو و همکاران جهت استفاده در ساخت پروفیل‌های تحت بار ضربه جانبی و مقایسه مقدار انرژی جذب شده و لهیدگی پروفیل با فوم مقاوم‌تر تحت ضربه جانبی با نمونه محوری، شبیه‌سازی مدل‌های جانبی این بار با استفاده از

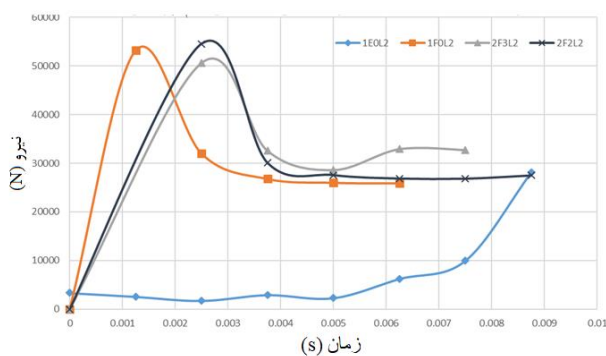
جدول ۷: مقدار تغییر طول عددی مدل‌های جانبی با در نظر گرفتن خواص

فوم پژوهش [۲۴]	
کد مدل	تغییر طول (میلی‌متر)
1E0L2	۴۰
1F0L2	۱۴/۲
2F2L2	۱۵/۲
2F3L2	۱۴/۳

با توجه به جداول ۷ و ۲، می‌توان دریافت که به‌طور کلی مقدار لهیدگی مدل‌های جانبی حتی با استفاده از فوم مقاوم‌تر نسبت به فوم مدل محوری، در مقایسه با مقدار لهیدگی مدل‌های محوری با احتساب انرژی ضربه یکسان ۵۳۰ ژول، بیشتر است. بر اساس پارامتر تغییر طول می‌توان گفت استفاده از مدل جانبی در مقایسه با مدل محوری عملکرد قابل قبولی در برابر ضربه ندارد اما می‌بایست سایر پارامترها نظیر جذب انرژی و راندمان نیروی لهیدگی نیز بررسی گردد تا بتوان مدل بهینه را انتخاب کرد.

۳-۷- نمودار نیرو-زمان مدل‌های عددی جدید

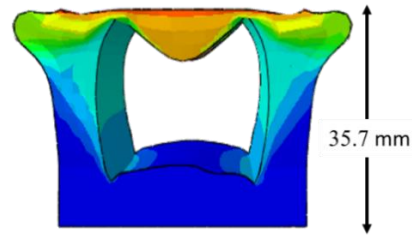
در شکل ۲۳ نمودار نیرو-زمان عددی مدل‌های جانبی با در نظر گرفتن خواص فوم پژوهش مرجع ۳۲ ارائه شده است.



شکل ۲۳: نمودار نیرو-زمان عددی مدل‌های جانبی با در نظر گرفتن خواص

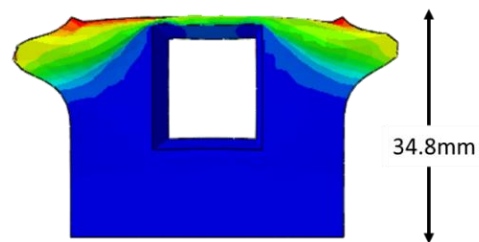
فوم پژوهش [۲۴]

با توجه به شکل ۲۳، مقدار نیروی ماکزیمم همه نمونه‌ها به‌جز 1E0L2، در محدوده ۵۰ تا ۵۵ کیلو نیوتون می‌باشد و نشان از پاسخ یکسان آنها در برابر بار ضربه جانبی را نشان می‌دهد. برای مدل 1E0L2، مقدار نیروی ماکزیمم به‌طور حدودی برابر با ۲۸ کیلو نیوتون است که کاهش تقریباً ۱۰۰ درصدی نسبت به سایر مدل‌های جانبی داشته و در انتهای فرآیند لهیدگی اتفاق افتاده است. زیرا در



شکل ۲۱: هندسه عددی مدل 2F3L2 با خواص فوم پژوهش [۲۴]

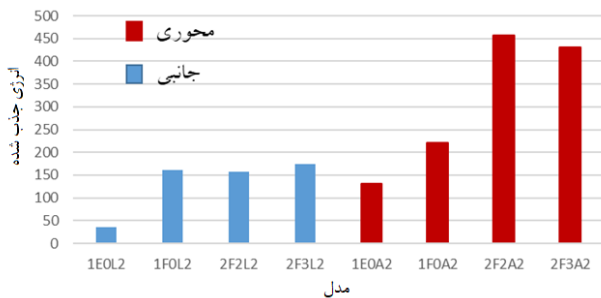
طبق شکل ۲۱، مقدار تغییر طول پروفیل 2F3L2، برابر با ۱۴/۳ میلی‌متر می‌باشد که نسبت به مدل محوری 2F3A2، ۹ میلی‌متر بیشتر دچار لهیدگی شده است. همچنین نسبت به مدل 1F0L2 (پروفیل کاملاً پر) مقدار لهیدگی تقریباً بدون تغییر بوده است. اما در مدل تجربی با فوم خریداری‌شده، پروفیل به‌صورت کامل له‌شده و تمامی فوم به‌کاررفته در آن به بیرون ریخته است. طرح لهیدگی پروفیل داخلی در دو حالت تجربی و عددی تقریباً شباهت دارد اما وجود فوم قوی‌تر در مدل عددی، مانع لهیدگی بیشتر پروفیل داخلی نیز شده است.



شکل ۲۲: هندسه عددی مدل 2F2L2 با خواص فوم پژوهش [۲۴]

طبق شکل ۲۲، مقدار تغییر طول مدل 2F2L2، برابر با ۱۵/۲ میلی‌متر است که به‌طور تقریبی با سایر مدل‌های جانبی به‌جز مدل پروفیل خالی برابر است. اما در مدل تجربی با فوم خریداری‌شده پروفیل به‌طور کامل له‌شده است. لازم به ذکر است در تمامی مدل‌های بالا شرط ریخته‌گری فوم در پروفیل لحاظ شده است. در صورت برش فوم و مونتاژ کردن آن در پروفیل ممکن است به دلیل عدم چسبندگی به دیواره، فوم تحت ضربه دچار شکستگی شود و مدل عملکرد درستی در برابر ضربه نداشته باشد. در جدول ۷ مقدار تغییر طول عددی مدل‌های جانبی با در نظر گرفتن خواص فوم پژوهش مرجع ۳۲ ارائه شده است [۲۴].

برای این منظور مقدار جذب انرژی هر ۸ مدل در طول ۴/۹ میلی‌متر اندازه‌گیری و در شکل ۲۴ نمودار آن ارائه شده است.



شکل ۲۴: نمودار جذب انرژی مدل‌های محوری و جانبی در $x=4.9\text{mm}$

بر طبق شکل ۲۴، به‌طور کلی مقدار جذب انرژی تعادلی در طول ۴/۹ میلی‌متر، برای مدل‌های محوری بیشتر از مدل‌های جانبی است و بهینه‌ترین مدل، مدل 2F2A2 است که در آن حدود ۴۵۰ ژول از ۵۳۰ ژول انرژی کل، جذب شده است. در جدول ۱۰ مقادیر راندمان نیروی لهیدگی برای نمونه‌های جانبی با فوم مقاوم بر طبق نتایج تحلیل عددی ارائه شده است.

جدول ۱۰: مقادیر راندمان نیروی لهیدگی برای نمونه‌های جانبی با فوم مقاوم بر طبق نتایج تحلیل عددی

کد مدل	CFE	CAE/CFE-EMPTY
1E0L2	۰/۲۵	۱
2F3L2	۰/۶۹	۲/۷۶
2F2L2	۰/۵۹	۲/۳۶
1F0L2	۰/۶۱	۲/۴۴

با توجه به جدول ۱۰، کمترین مقدار راندمان نیروی لهیدگی متعلق به نمونه 1E0L2 و بیشترین آن متعلق به نمونه 2F3L2 می‌باشد. اما با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۶، راندمان نیروی لهیدگی مدل‌های محوری بیشتر از مدل‌های جانبی است و از این‌رو، ایدئال‌ترین جاذب انرژی در بین ۸ مدل شبیه‌سازی شده محوری و جانبی، نمونه 2F2A2 می‌باشد. در شکل ۲۵، نمودار راندمان نیروی لهیدگی مدل‌های محوری و جانبی قابل مشاهده است.

انتهای فرآیند ضربه، پروفیل به‌طور کامل له‌شده و نیروی بیشتری صرف کامل کردن لهیدگی آن شده است. به‌طور کلی با بررسی مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی مدل‌های جانبی و مقایسه آن با مدل‌های محوری، مشخص می‌شود که نیروی ماکزیمم برای مدل‌های محوری بیشتر است و این نشان از مقاومت بیشتر مدل‌های محوری در مقابل ضربه را نشان می‌دهد.

۳-۸- نیروی لهیدگی، انرژی جذب‌شده و کارایی نیروی

لهیدگی مدل‌های عددی جدید

در جداول ۸ و ۹ مقادیر مربوط به نیروی لهیدگی ماکزیمم و میانگین و مقادیر انرژی جذب‌شده مدل‌های عددی جانبی با در نظر گرفتن فوم مقاوم‌تر نشان داده شده است.

جدول ۸: مقادیر نیروی لهیدگی میانگین و ماکزیمم مدل‌های عددی جانبی با فوم مقاوم‌تر

کد مدل	نیروی ماکزیمم (کیلو نیوتن)	نیروی میانگین (کیلو نیوتن)
1E0L2	۲۸/۱	۷/۱
1F0L2	۵۳/۲	۳۲/۷
2F0L2	۵۴/۵	۳۲/۲
2F3L2	۵۰/۶	۳۵/۴

جدول ۹: مقادیر انرژی جذب‌شده مدل‌های عددی جانبی با فوم مقاوم‌تر (انرژی جذب‌شده (ژول))

کد مدل	کل	$X=14/2\text{ mm}$
1E0L2	۲۸۴	۱۰۰/۸۲
1F0L2	۴۶۴/۳۴	۴۶۴/۳۴
2F2L2	۴۸۹/۲	۴۵۷/۲۴
2F3L2	۵۰۶/۲۲	۵۰۲/۶۸

با توجه به جدول ۹ مقدار انرژی جذب‌شده نمونه 2F3L2، برابر با ۵۰۶/۲۲ ژول و بیشتر از سایر مدل‌هاست. به دلیل وابستگی مقدار جذب انرژی به تغییر طول، جذب انرژی تعادلی در طول ۱۴/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. به ازای این تغییر طول، کمترین جذب انرژی متعلق به پروفیل خالی (1E0L2) و بیشترین آن متعلق به مدل 2F3L2 است. برای مقایسه جذب انرژی مدل‌های محوری و جانبی، لازم است تا همه مدل‌ها در یک طول یکسان مقایسه شوند.

جذب انرژی و راندمان نیروی لهدیگی دارند. همچنین مقدار تغییر طول و لهدیگی مدل‌های محوری در مقایسه با مدل جانبی با در نظر گرفتن انرژی ضربه یکسان بسیار کمتر است.

- استفاده از فوم خریداری شده در ساخت پروفیل‌های جاذب انرژی، عملکرد مناسبی بر جذب انرژی و تغییر طول نمونه‌های محوری داشت اما به دلیل اینکه فوم به صورت برش خورده داخل پروفیل قرار داده شد و همچنین ضعف فوم از لحاظ ساختار که سبب شکننده بودن آن شده است، جهت استفاده در پروفیل تحت ضربه جانبی، مناسب نیست.

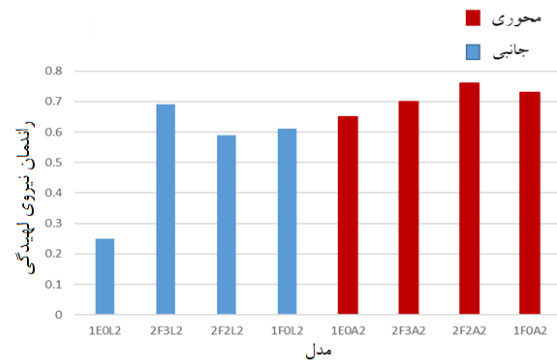
- طبق نتایج تجربی، پر شدن پروفیل آلومینیومی به صورت کامل با فوم آلومینیومی سبب کاهش ۱۸ درصدی مقدار تغییر طول پروفیل تحت ضربه محوری شد.

- مدل‌های جانبی تحت ضربه تجربی، مقاومت بسیار کمی در برابر ضربه از خود نشان دادند و به صورت کامل دچار لهدیگی شدند. همچنین فوم‌های استفاده شده در ساختار مدل‌های جانبی به دلیل عملکرد ضعیف و شکنندگی بسیار زیاد، خورد شده و همگی به بیرون ریخته شد.

- با شبیه‌سازی مدل‌های عددی متشکل از فوم با خواص مکانیکی بهتر نسبت به فوم خریداری شده و در نظر گرفتن ریخته‌گری فوم به داخل پروفیل، مشخص شد که پروفیل تحت ضربه جانبی مقاومت بیشتری در برابر ضربه با انرژی یکسان نسبت به استفاده از فوم ضعیف‌تر دارد اما همچنان مقدار لهدیگی نمونه‌های محوری کمتر از نمونه‌های جانبی با فوم مقاوم‌تر است.

- با در نظر گرفتن فوم مقاوم‌تر به عنوان پرکننده سازه، مقدار تغییر طول پروفیل بر اساس نتایج عددی به مقدار ۶۲ درصد به نسبت پروفیل خالی تحت بار ضربه جانبی کاهش می‌یابد.

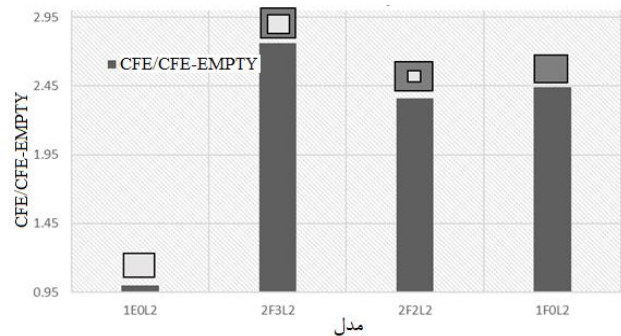
- با بررسی نتایج، مشخص شد مدل پروفیل دوجداره پر شده با فوم با جدار داخلی ۲*۲ سانتی‌متر در حالت محوری (2F2A2)، با دارا بودن بیشترین مقدار جذب انرژی، کمترین مقدار لهدیگی تحت ضربه و همچنین بیشترین راندمان نیروی لهدیگی و بیشترین نیروی لهدیگی ایدئال‌ترین مدل جهت استفاده در سازه‌های جاذب انرژی می‌باشد. در این سازه ترکیب مقدار فوم استفاده شده در سازه و همچنین وجود جداره داخلی عامل مثبت



شکل ۲۵: نمودار راندمان نیروی لهدیگی عددی مدل‌های جانبی (فوم مقاوم)

و محوری

در شکل ۲۶، نمودار نسبت راندمان نیروی لهدیگی برای مدل‌های جانبی با فوم مقاوم ارائه شده است.



شکل ۲۶: نمودار نسبت راندمان نیروی لهدیگی مدل‌های جانبی با فوم

مقاوم‌تر

با توجه به شکل ۲۶، با افزایش مقدار فوم استفاده شده در سازه، نسبت راندمان نیروی لهدیگی در مقایسه با پروفیل خالی بسیار افزایش می‌یابد و حالت 2F3L2 ایدئال‌ترین حالت جانبی است. سپس با کاهش اندازه جدار داخلی، نسبت راندمان نیز کاهش می‌یابد تا در نهایت در مدل تک جداره کاملاً پر نیز نسبت راندمان با هم کمتر از نمونه 2F3L2 است.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مطالعه، بررسی عددی و تجربی پاسخ پروفیل‌های پر شده با فوم آلومینیومی در حالت تک جداره و دوجداره در برابر بار ضربه جانبی و محوری بود. در ادامه، خلاصه‌ای از نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی عددی و تجربی مدل‌ها ارائه می‌شود:

- به طور کلی، با جمع‌بندی نتایج مدل‌های جانبی و محوری، مدل‌های محوری عملکرد بهتری در مقابل ضربه از لحاظ مقدار

- [5] Yu, X., Qin, Q., Zhang, J., He, S., Xiang, C., Wang, M., et al., "Crushing and energy absorption of density-graded foam-filled square columns: Experimental and theoretical investigations," *Composite Structures*, Vol. 201, pp. 423-433. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.06.014, 2018.
- [6] Yin, H., Dai, J., Wen, G., Tian, W., Wu, Q., "Multi-objective optimization design of functionally graded foam-filled graded-thickness tube under lateral impact," *International Journal of Computational Methods*, Vol. 16, No. 1, pp. 1850088. DOI: 10.1142/S0219876218500889, 2019.
- [7] Yao, R.-Y., Zhao, Z.-Y., Yin, G.-S., Zhang, B., "Attempt to improve the material utilisation and crashworthiness of grooved tube subjected to axial crushing," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 26, No. 1, pp. 77-86. DOI: 10.1080/13588265.2020.1745598, 2021.
- [8] Zhang, B., Wang, L., Zhang, J., Jiang, Y., Wang, W., Wu, G., "Deformation and energy absorption properties of cenosphere/aluminum syntactic foam-filled circular tubes under lateral quasi-static compression," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 192, pp. 106126. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106126, 2021.
- [9] Rajak, D. K., Kumaraswamidhas, L., Das, S., "Technical overview of aluminum alloy foam," *Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 49, No. 1. DOI: 10.1515/rams-2017-0012, 2017.
- [10] Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams," *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6, pp. 559-632. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00010-5, 2001.
- [11] Niknejad, A., Elahi, S. A., Elahi, S. M., Elahi, S. A., "Foam-filled columns with rectangular cross-section during the flattening process: Theory and experiment," *Mechanical and*
- مؤثر بر عملکرد سازه در استهلاک و جذب انرژی ناشی از ضربه است.
- هرچه مقدار لهیدگی (تغییر طول) نمونه تحت ضربه بیشتر باشد، ماکزیمم نیروی لهیدگی و مقاومت نمونه در برابر ضربه کمتر است. بر طبق این اصل بدیهی است که پروفیل‌های خالی دارای کمترین مقاومت در برابر ضربه هستند. در نمونه‌های محوری پروفیل خالی تحت ضربه مقدار ۱۶ میلی‌متر تغییر طول داشت که ماکزیمم نیروی لهیدگی آن ۳۰ کیلو نیوتون اندازه‌گیری شد. اما برای مقاوم‌ترین پروفیل که پروفیل دوجداره با جدار داخلی ۲*۲ سانتیمتر است، مقدار لهیدگی ۴ میلی‌متر و ماکزیمم نیروی لهیدگی در حدود ۱۲۳ کیلو نیوتون ثبت شد که این مقادیر نشان‌دهنده رابطه تغییر طول و ماکزیمم نیروی لهیدگی است.
- #### ۵- منابع
- [1] Singh, S., Bhatnagar, N., "A survey of fabrication and application of metallic foams," *Journal of Porous Materials*, Vol. 25, pp. 537-540. DOI: 10.1007/s10934-018-0462-8, 2018.
- [2] Yan, W., Durif, E., Yamada, Y., Cui, E. W., "Crushing simulation of foam-filled aluminium tubes," *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 7, pp. 1901-1906. DOI: 10.2320/matertrans.M2007108, 2007.
- [3] Abedi, M. M., Niknejad, A., Liaghat, G. H., Nejad, M. Z., "Theoretical and experimental study on empty and foam-filled columns with square and rectangular cross section under axial compression," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 65, No. 1, pp. 134-146. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2012.03.012, 2012.
- [4] Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Zhang, Y., Li, Q., "Parametric analysis and multiobjective optimization for functionally graded foam-filled thin-wall tube under lateral impact," *Computational Materials Science*, Vol. 90, pp. 265-275. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.04.020, 2014.

- [18] Ruan, D., Lu, G., Chen, F. L., Siores, E., "Dynamic mechanical properties of closed-cell aluminum foams with uniform and graded densities," *Journal of Materials Research*, Vol. 38, pp. 145-156. DOI: 10.1557/s43577-023-00592-5, 2023.
- [19] Peroni, M., Solomos, G., Pizzinato, V., "Compressive response and energy absorption of foam-filled aluminum honeycomb composite: Experiments and simulation," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 178, pp. 89-101. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.102346, 2023.
- [20] Wu, C., Ye, G., Zhao, Y., Ye, B., Wang, T., Wang, L., Zhang, Z., "Experimental and numerical study of in-plane uniaxial compression response of PU foam filled aluminum arrowhead auxetic honeycomb," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 502-512. DOI: 10.1108/RPJ-08-2023-0267, 2024.
- [21] Ahan Yekta Metal Store, "Ahan yekta metal store," Available from: <http://www.ahanyekta.com/>.
- [22] Gere, J. M., Timoshenko, S. P., "Mechanics of Materials," Cengage Learning, 6th ed., 2009. DOI: 10.1016/B978-0-12-374750-1.00001-3.
- [23] Abdelaziz, A. Y., & Abed, F. (2021). Special Energy Absorption: Definition, Evaluation, and Applications. *Materials*, Vol. 14, No. 14, pp. 3881. DOI: 10.3390/ma14143881.
- [24] Lu, G., Shen, J., Hou, W., Ruan, D., Ong, L. S., "Dynamic indentation and penetration of aluminium foams," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 5, pp. 932-943. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2008.03.009, 2008.
- Materials Engineering, Vol. 43, No. 1, pp. 783-795. DOI: 10.1007/s10767-019-00633-1, 2019.
- [12] Rogala, M., Ferdynus, M., "Numerical crush analysis of thin-walled aluminium columns with square cross-section and a partial foam filling," *Materials Science Forum*, Vol. 952, pp. 201-206. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.952.201, 2019.
- [13] Jianxun, Z., Yang, Y., Hui, Y., Qinghua, Q., Wang, T. J., "A theoretical study of low-velocity impact of metal foam-filled circular tubes," *Thin-Walled Structures*, Vol. 148, pp. 106525. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106525, 2020.
- [14] Salehi, M., Mirbagheri, S. M. H., Ramiani, A. J., "Efficient energy absorption of functionally-graded metallic foam-filled tubes under impact loading," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 31, No. 1, pp. 92-110. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)64037-3, 2021.
- [15] Zhang, B., Wang, L., et al., "Deformation and energy absorption properties of cenosphere/aluminum syntactic foam-filled circular tubes under lateral quasi-static compression," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 192. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106126, 2021.
- [16] Shiravand, A., Asgari, M., et al., "Hybrid metal-composite conical tubes for energy absorption; theoretical development and numerical simulation," *Thin-Walled Structures*, Vol. 160. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109467, 2023.
- [17] Kilicaslan, C., et al., "Numerical crushing analysis of foam-filled corrugated single- and double-circular tubes subjected to axial impact," *Thin-Walled Structures*, Vol. 96. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107029, 2022.



A Review on the Various Solutions to Improve the Performance of the Solar Collector Absorber Tube by Using Turbulator and Hybrid Nanofluid

Seyedeh Mohadeseh Miri^{*1}, Farhad Vahidinia¹

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran.

Abstract

The absorber tube is the main part of the solar collectors which its appearance and operational characteristic can play key role in absorbing of solar irradiation amounts. Researchers have proposed various offers to improve the solar collector performance such as inserting a turbulator in the absorber tube and using of nanofluid (especially hybrid nanofluids) instead of simple working fluid. In present study, the various shapes of turbulators proposed by the researchers have been reviewed. Turbulators can be classified according to their shapes. In the first category, turbulence in fluid flow is made by providing ribs or corrugations on the inner wall of absorber tube. But in the second category, external obstacles can be inserted in the absorber tube to improve its performance. Most literatures discussed about the second category of turbulators. By comparing the hydrothermal performance between the smooth absorber tubes with the improved one, it can be concluded that addition of turbulator enhances the thermal properties of all collector types up to 82%. The turbulators can increase the pressure drop and friction factor due to its operation as an obstacle in the fluid flow. Also, the use of nanofluids (especially hybrid nanofluids) beside the turbulators can improve the collector's performance. However, several characteristics such as the concentration of nano particles, different kinds of hybrid nano fluid and collectors, the various shapes of the turbulator, etc., are all effective parameters on the collector performance.

Keywords

Solar Collector
Improvement Performance of Absorber Tube
Turbulator
Hybrid Nanofluid
Energy Optimization

Received: 07.07.2024

Revised: 10.26.2024

Accepted: 11.06.2024

*Corresponding Author

Seyedeh Mohadeseh Miri

Email

mhdsh.miri@uoaz.ac.ir

1- Introduction

Iran is one of the high solar potential regions in the world, which has 290 sunny days and received daily solar radiation up to 4.5 -5.5 kWh/m². Due to deterioration of fossil fuels, the use of renewable energy sources has been extensively taken into account. Solar energy is one kinds of renewable energies with widely extensive distribution in the world. The absorber tube is the essential part of solar collector that must absorbs the solar radiation and its performance quality can affect on solar collector operation. To improve the absorber tube performance, various solutions have been proposed in the literatures for example replacing numerous tubes instead of a large diameter tube, using various working fluid such as mono and hybrid nanofluids to solve the existing problems (e.g., absorbing the

whole of radiation band and overcoming to fluid instability at high temperatures). Sloping the solar collector to receive more solar radiation is another solution was performed by authors. One of the most frequent solutions is increasing the heat transfer surface by using turbulators, which can cause the turbulence in flow and so can improve the performance of the absorber tube in solar collectors. Turbulators have different types and cross section shapes. In the current study, various shapes of turbulator have been categories and numerous studies, which have worked on them, are reviewed. Next, the effect of nanofluids (especially hybrid kinds) beside the turbulator in improving the absorber tube performance has been investigated in previous studies.



2- Design and Methodology

Several studies have been focused on using the turbulators in absorber tubes of solar collectors. Turbulators are classified into two general types. In the first category, a type of turbulator is investigated, which waves, ribs, dimples or making corrugation in inner wall of tube are made. But in the second category, by placing an obstacle or foreign device inside the tube, vortex or disturbance is created in the fluid flow. Researchers have studied various parameters including the effect of using turbulators with different shapes, various working fluids (simple working fluids, mono and hybrid nano fluids) in collectors, the range of different Reynolds numbers and Nusselt number or etc. In existed review articles on mentioned field, any of these parameters were discussed lonely. The research gap in this field is reviewing the simultaneous using of both turbulator and nanofluids (especially hybrid) effects on the absorber tube performance in literatures which current study pay attention to that. Another innovation of this study is presenting two overview tables with two parameters of performance evaluation criteria (PEC) and the range of investigated Reynolds number. It can be useful in the real applications of industries used solar collectors (e.g., seawater desalination, air heating, power plants, refrigeration, etc.) provide useful and accurate information to users.

The main detailed and extensive classification of turbulators used in the studies, could be represented as following bullets:

- Longitudinal turbulators with a rectangular, triangular, trapezoidal cross-section, etc.. As the results in this category, the fins with a rectangular cross-section had caused more improvement on heat transfer.
- Creating dimples or protrusion to make turbulency in the flow. The results indicated the turbulator of dimple kind has a better performance than protrusion kind.
- Ribbed, pin-shaped and circular turbulators. In general, placing the turbulator in the lower half

of the absorber tube produces more flow turbulence and improves performance.

- Twist or screw taps or coil-wire inserts, which occupied a large group of studies. It was proved that the coil type turbulator was better than the twist/screw type to improve the performance. The effectiveness of twist inserts depends on several characteristics, such as spiral angle, screw ratio, etc. which can improve the collector performance by 45.04% and 74.42%.
- Turbulators from the porous disks and porous medium kinds, with effective parameters such as the distance and dimensions of the disks, the number of holes which have also been effective in the amount of their impact on the collector performance.

3- Discussion and Results

Recently, hybrid nanofluids have been taken into account due to their ability to act in wide temperature range and solving the mono nanofluid's instability problems. Many studies showed that replacing the simple working fluid with nanofluids, both single and hybrid nanofluids, can lead to an increase in the thermal efficiency of the collector up to 26.3%. Various parameters such as the nanofluid kind, concentration and mixing percentage of nanoparticles have been evaluated on the solar collector performance. In general, enhancing the volume fraction of nanoparticles and Reynolds number caused increases in Nusselt number, friction coefficient and PEC. According to the researchers' results, increasing the concentration of nanoparticles and its hybridization and increasing the penetration depth improved the radiation properties and its absorption efficiency up to 90%. On the other hand, using of both nanofluid and the turbulator in absorber tube could improve the Nusselt number and of course increased the friction coefficient. Also, they caused the placement of the vortex generators (horizontal, vertical and cross) changed in the PEC. The improved performance rate by using the hybrid nanofluid, the shape of the turbulator, and the hydrodynamic conditions are investigated in current study. As the results, not only

the use of hybrid nanofluid can improve the thermal and optical properties (improving optical efficiency by 78.1% and increasing the temperature difference between the inlet and outlet of the fluid by 56%), but also it leads to economic savings and reducing the collector surface by 36% as well as the emissions carbon dioxide and payback period up to 36.2%.

To evaluate the solar collector performance, a balance should be established between the thermal characteristics improvement and the energy required for pumping fluid. For this purpose, the Performance Evaluation Criterion Index (PEC) has been used to examine the solar heat exchanger performance and to determine the actual heat transfer development in previous studies using turbulator and with/without nanofluid. In practice, this power is related to the work required to pump the fluid (W_p) to the third power of the volumetric flow rate (W^3). In the reference condition, PEC is equal to one. For other states, it can have values greater or less than one. When it is higher than one, the investigated condition is assumed to be beneficial and the thermal enhancement is higher than the previous value. When PEC is less than one, the pressure drop is less than one. In present study, PEC is listed in a table by changing in the other parameters namely the shape and type of the turbulator and the working fluid kind. Also, another table is presented in which studies, considered the types of turbulators with nano fluid in the absorber tube of solar collectors, are listed. In this table, in addition to the collector and turbulator kinds, used, the nanofluid kind are also mentioned as well as the studied Reynolds number range and the results of the research are also briefly presented.

4- Conclusion

In general, it can be concluded that the improvement amount of the collector's performance by using the turbulator and hybrid nanofluid depends on several factors such as the collector type, the mass flow rate range of the fluid flow and the Reynolds number, the shape of the turbulator, the nanofluid kinds and its volume fraction. As the results, by increasing the

fin's numbers, a more effective improvement is achieved in thermal and exergy performance criteria and PEC, until about 234.7% and 19.7%. Likewise, the decrease in entropy production had also reached up to 311.7%.

5- References

- [1] Yadegari, M. and M. Ghassemi, Investigation of the Effects of Temperature, Mass flow rate of the injected fuel, pore diameter, porosity and ambient pressure on the amount of pollutants in the combustion chamber. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, 2022. 23(1): p. 122-146.
- [2] Pal R. K. and Ravi Kumar K., Coupled Thermo-Structural analysis of absorber tube for direct steam generation in parabolic trough solar collector, *Sol. Energy*, 2023, 266: p. 112148.
- [3] Gong J. hu, Yang C., Wang J., and Lund P. D., Comparative study of optical and thermal model for a large-aperture parabolic trough concentrator with smaller diameter absorber tube bundle, *Energy Reports*, 2023, 9(S12): p. 435–443.
- [4] Anand S. and Kumar S., Optimization of gaseous working fluid and internally finned absorber tube for enhancing the thermal performance of parabolic trough solar collector, *Appl. Therm. Eng.*, 2024, 239: p. 122078.
- [5] Abbasian A. A. and Monfaredi F., Insulator roof, acentric absorber tube and nanofluid effect on parabolic trough collector efficiency via two-phase flow simulation, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2023, 148(22): p. 12481–12499.
- [6] Chen Z., Han X., and Ma Y., Performance analysis of a novel direct absorption parabolic trough solar collector with combined absorption using MCRT and FVM coupled method, *Renew. Energy*, 2023, 220: p. 119727.
- [7] Azimy N., Saffarian M. R., Investigation of thermal characteristics and entropy generation in a solar collector including Fly Ash-Cu hybrid nanofluids: Numerical approach using mixture model, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 152: pp. 169–184.

-
- [9] Amar M., Akram N., Chaudhary G.Q., Kazi S. N., M. Soudagar M.E., Mubarak N.M., Kalam M.A, Energy, exergy and economic (3E) analysis of flat-plate solar collector using novel environmental friendly nanofluid, *Sci. Rep.*, 2023, 13(1), p. 1–21, 2023.
- [10] Esfahani A.H., Aliehyaei M., Hassani Joshaghani A., Najafizadeh M.M., Economic, Exergy, and Environmental Analyses of Parabolic Trough Solar Collector with Turbulator Containing Polymer Hybrid Nanofluid, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 2023, 12(4): p. 80-99.



مروری بر روش‌های بهبود عملکرد لوله جاذب جمع‌کننده‌های خورشیدی با استفاده از

توربولاتور و نانو سیالات هیبریدی

سیده محدثه میری^{۱*}، فرهاد وحیدی‌نیا^۱

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، ایران.

چکیده

لوله جاذب بخش اصلی جمع‌کننده‌های خورشیدی است که ظاهر و ویژگی عملکردی آن می‌تواند نقش کلیدی در جذب مقادیر تابش خورشید داشته باشد. محققان پیشنهادها مختلفی را برای بهبود عملکرد جمع‌کننده خورشیدی ارائه کرده‌اند، مانند قرار دادن توربولاتور در لوله جاذب و استفاده از نانوسیال (به‌ویژه نانوسیالات هیبریدی) به جای سیال کار ساده. در مطالعه حاضر، اشکال مختلف توربولاتورهای پیشنهادشده توسط محققین بررسی شده است. توربولاتورها را می‌توان بر اساس شکل آنها طبقه‌بندی کرد. در دسته اول، با ایجاد دنده یا موج روی دیواره داخلی لوله جاذب تلاطم در جریان سیال ایجاد می‌شود؛ اما در دسته دوم می‌توان موانع خارجی را در لوله جاذب قرارداد تا عملکرد آن را بهبود بخشد. بیشتر متون در مورد دسته دوم توربولاتور بحث کردند. با مقایسه عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات بین لوله‌های جاذب صاف با لوله‌های بهبودیافته، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن توربولاتور خواص حرارتی انواع جمع‌کننده‌ها را تا ۸۲ درصد افزایش می‌دهد. توربولاتورها به دلیل عملکرد خود به‌عنوان مانعی در جریان سیال می‌توانند افت فشار و ضریب اصطکاک را افزایش دهند. همچنین استفاده از نانوسیالات (به‌ویژه نانوسیالات هیبریدی) در کنار توربولاتورها می‌تواند عملکرد جمع‌کننده‌ها را بهبود بخشد. با این حال، چندین ویژگی مانند غلظت نانو ذرات، انواع مختلف نانو سیال و جمع‌کننده‌های هیبریدی، اشکال مختلف توربولاتور و غیره، همگی پارامترهای مؤثر بر عملکرد جمع‌کننده هستند.

کلمات کلیدی

جمع‌کننده خورشیدی
بهبود عملکرد لوله جاذب
توربولاتور
نانو سیال هیبریدی
بهینه‌سازی انرژی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

*نویسنده مسئول

سیده محدثه میری

ایمیل

mhdsh.miri@uoz.ac.ir

۱- مقدمه

در منابع پیشنهادشده است که برخی از آنها جایگزینی دسته لوله‌ها با قطر کوچک‌تر به جای یک لوله جاذب با قطر بزرگ [۴]، استفاده از سیال عامل مختلف [۵] مانند نانو سیالات [۶] یا ترکیب دو نانو سیال تحت عنوان نانو سیال هیبریدی برای حل مشکل عدم جذب کامل پهنای باند یا حل ناپایداری در دماهای بالا [۷]، اعمال شیب در جمع‌کننده سهموی برای دریافت بهتر و بیشتر اشعه خورشید [۸] می‌باشد. یکی از راهکارهای پرتکرار در مطالعات، افزایش سطح انتقال حرارت توسط توربولاتورها بوده که می‌تواند باعث بهبود عملکرد لوله جاذب در جمع‌کننده‌های خورشیدی شود. در این راستا استفاده از باله‌های داخلی ضمن افزایش سطح انتقال حرارت، می‌تواند به‌عنوان توربولاتور یا مغشوش‌کننده جریان، عملکرد جمع‌کننده‌ها را بهبود بخشد [۹].

ایران جزو مناطق با پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در جهان به حساب می‌آید که دارای ۲۹۰ روز آفتابی با تابش خورشیدی بالغ بر ۴/۵ تا ۵/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز می‌باشد [۱]. با توجه به افق کوتاه‌مدت برای دوام سوخت‌های فسیلی، امروزه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲]. یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر انرژی خورشیدی می‌باشد که توزیع بسیار گسترده‌ای در سراسر جهان داشته و از جمله تجهیزات کاربردی برای استفاده از آن، جمع‌کننده‌ها هستند. لوله جاذب یکی از اجزاء کلیدی جمع‌کننده در بهره‌برداری از توان خورشیدی است و عملکرد آن تعیین‌کننده‌ی میزان تابش جذب‌شده از خورشید می‌باشد [۳]. برای بهبود عملکرد لوله جاذب، جمع‌کننده خورشیدی راهکارهای مختلفی



خورشیدی سهموی بشقابی بکار رفته را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. دسته‌بندی آنها برای ارزیابی مقالات شامل تغییر سیالات کاری برای انتقال حرارت، جایگزینی سیالات عامل با نانوسیالات (تک و هیبریدی)، قرار دادن توربولاتورها با پیکربندی‌های مختلف طراحی و در نهایت ترکیب مزایای نانوسیال و ابزار ایجاد چرخش سیال (ژنراتور) بوده است. آنها در مقاله خود توضیحات مبسوطی در مورد اجزای مختلف تشکیل‌دهنده جمع‌کننده سهموی، فرمولیشن حاکم بر عملکرد هر بخش و نحوه عملکرد آن را ارائه نمودند. مقالات متعددی که بر روی جمع‌کننده‌های سهموی کار کردند را مرور نموده و در هر یک از دسته‌بندی‌های ارائه‌شده فوق، تعدادی مقاله را مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادند. اگرچه به شکل جداگانه بخش کوتاهی از مقاله خود را به ارزیابی و مرور مطالعات موجود در زمینه استفاده از نانو سیالات و همین‌طور بکار بردن توربولاتور در جمع‌کننده سهموی پرداخته بودند اما به‌طور خاص به مطالعه بر روی استفاده هم‌زمان از توربولاتور و نانو سیال هیبریدی تمرکز نکرده بودند. اکبرزاده و ولی پور [۱۹] پارامترهایی مانند تأثیر جنس و نوع پوشش لوله جاذب و پارامترهای طراحی بر بهبود راندمان حرارتی جمع‌کننده‌های سهموی را در منابع موجود مرور نمودند. همچنین اثر استفاده از نانو سیالات را نیز بر بهبود عملکرد جمع‌کننده‌های سهموی بررسی کردند. آنها نیز تأثیر توربولاتور بر عملکرد جمع‌کننده‌ها را مرور نمودند. تأثیر نانو سیالات را نیز به شکل جداگانه‌ای بررسی نمودند؛ اما تمرکز بر استفاده هم‌زمان از این دو عامل علی‌الخصوص نانوسیال هیبریدی جهت بهبود عملکرد جمع‌کننده‌ها مورد توجه آنها نبوده است. عبدالحامد و همکاران [۲۰] به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد جمع‌کننده سهموی به لحاظ هندسی و حرارتی پرداختند. آنها مشخصات هندسی اجزای مختلف جمع‌کننده و اثر تغییرات آنها بر بازده حرارتی و نوری جمع‌کننده را بررسی نمودند. در ادامه تأثیر اشکال مختلف توربولاتور بر عملکرد جمع‌کننده با تمرکز بر کاربری‌های مختلف در موارد خانگی، صنعتی و ... را بررسی کردند. اگرچه به‌صورت محدود به بررسی اشکال دیگر توربولاتور نیز پرداختند اما بیشتر به بررسی مطالعات موجود بر روی توربولاتورهای مارپیچ تمرکز کردند و اشاره متمرکز و دقیقی به سیالات استفاده‌شده در آنها ننموده‌اند. در واقع مقایسه دقیقی برای عملکرد جمع‌کننده‌ها همراه با توربولاتور و سیال نانو (مونو و هیبریدی) و سیالات ساده انجام نداده‌اند. زابلی و همکاران [۲۱] نیز تأثیر انواع توربولاتور و نانو سیالات را بر عملکرد جمع‌کننده‌های صفحه تخت را مرور کردند که تمرکز آنها بیشتر بر بررسی پارامترهای مختلف

وجود گردابه‌ها و اغتشاشات در جریان می‌تواند باعث بهبود پارامترهای مربوط به انتقال حرارت سیال شود [۱۵-۱۰]. توربولاتورها انواع و اشکال مختلفی دارند که در مطالعه حاضر دسته‌بندی آنها بر اساس شکل بوده و مطالعات انجام‌شده بر روی هر دسته مرور شده‌اند. در ادامه، تأثیر استفاده از نانو سیالات (به‌ویژه نانو سیال هیبریدی) در کنار توربولاتور در بهبود عملکرد لوله جاذب در جمع‌کننده‌های خورشیدی در مطالعات پیشین بررسی شده است.

۲- انواع توربولاتور

توربولاتورها در لوله‌ها در دو نوع کلی دسته‌بندی می‌شوند. در دسته اول با ایجاد دندان، موج، فرورفتگی یا برآمدگی در دیواره داخلی لوله نوعی از توربولاتور یا مغشوش‌کننده جریان شکل می‌گیرد؛ اما در دسته دوم با قرار دادن مانع یا عضو خارجی در لوله، گردابه یا اغتشاش در جریان سیال ایجاد می‌شود. نذیر و همکاران [۱۶] مهم‌ترین یافته‌های مطالعات عددی و تجربی بر روی عملکرد و تأثیر توربولاتورها از هر دو گروه ذکر شده را بررسی نمودند. بر اساس مطالعه آنها، اگرچه عدد ناسلت در لوله‌های موج‌دار در مقایسه با لوله‌های معمولی کمی بالاتر ثبت شده بود، اما به دلیل افت فشار پایین‌تر مربوط به تغییرات موجی شکل، به‌کارگیری آنها بیشتر گزارش شده است. در مقابل وجود توربولاتورهای مختلف جریان به‌عنوان مانع، با بالا بردن اختلاط و مغشوش کردن جریان علی‌رغم تولید افت فشار بالا باعث دستیابی به اعداد ناسلت بالاتری می‌شوند. در کنار ایجاد اغتشاش و گردابه‌ای که توسط توربولاتور در لوله جاذب اتفاق می‌افتد، سیال کاری نیز باید توانمندی بالایی در انتقال این حرارت به مصرف‌کننده نیز داشته باشد؛ یعنی نقش سیال عامل در کنار توربولاتور موضوعی است که در مطالعه نذیر و همکاران بررسی نشده است.

آی سا و همکاران [۱۷] در بخش اعظم مقاله مروری خود، مطالعات متعددی که اثر استفاده از انواع نانو سیالات (عمدتاً مونو نانو سیالات) بر روی عملکرد حرارتی جمع‌کننده‌های خورشیدی را مورد تحلیل قرار داده بودند را بررسی کردند. در ادامه به شکل بسیار مختصر چند نمونه توربولاتور (نوع میله‌ای و مارپیچ) استفاده‌شده در مطالعات موجود که در آنها نانو سیال نیز بکار رفته بود را مورد ارزیابی قرار دادند. در واقع آنها دسته‌بندی مشخصی بر روی اشکال مختلف توربولاتور به شکل گسترده انجام نداده و اثر نانوسیالات هیبریدی را توأم با توربولاتور بررسی ننموده‌اند. عابد و افغان [۱۸] راهکارهای مختلفی که در مقالات برای بهبود و افزایش بازده حرارتی و نوری جمع‌کننده‌های

آن مانند جنس نانو ذرات، نوع سیال پایه، کسر حجمی نانو ذرات و ... بر راندمان حرارتی جمع کننده صفحه تخت بوده است. تمرکز آنها بیشتر بر روی مونو نانوسیالات بوده که انواع پرکاربرد آن را شناسایی نمودند. همین‌طور اظهار داشته‌اند بیشترین نوع توربولاتور مورد استفاده در جمع کننده‌های صفحه تخت نوع ماریچ بوده که ۳۰٪ کاربردها را به خود اختصاص داده‌اند که بهبود بازده تا حدود ۸۶/۵٪ را به همراه داشته است. در نهایت به بررسی اثر کاربرد هم‌زمان اثر نانو سیال و توربولاتور در جمع کننده‌های صفحه تخت پرداختند. آنچه به‌طور واضح در مطالعه آنها به‌عنوان پیشنهاد ادامه بررسی‌ها برای محققین در آینده مطرح شده، بررسی و مرور بر روی مطالعات با کاربرد هم‌زمان توربولاتور و نانو سیالات هیبریدی و مونو به شکل مجزا می‌باشد. این موضوعی است که در مطالعه پیش رو به آن پرداخته شده است و وجه تمایز و نوآوری پژوهش حاضر با مطالعه آنها می‌باشد.

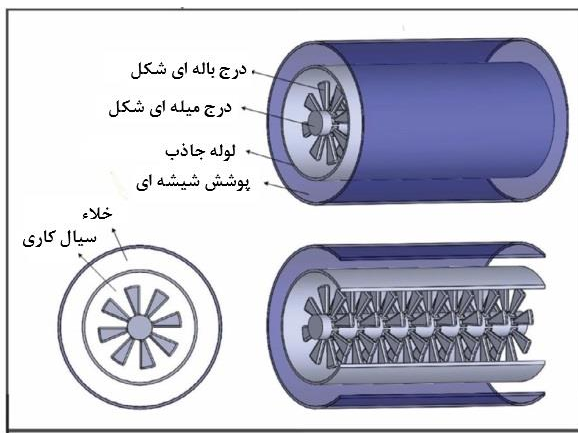
در پژوهش حاضر به بررسی انواع توربولاتورهای بکار رفته در لوله‌های جاذب جمع کننده‌های خورشیدی و تحلیل اثر آنها بر عملکرد جمع کننده پرداخته می‌شود. هم‌زمان استفاده از نانو سیالات (مونو یا هیبرید) نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. البته تمرکز بر تحلیل رفتار جمع کننده‌های خورشیدی با نانو سیالات هیبریدی همراه با توربولاتور می‌باشد. اگرچه بررسی توربولاتورها و نانو سیالات در جمع کننده‌های خورشیدی در مطالعات پیشین نیز وجود دارد اما وجه تمایز پژوهش حاضر با آنها در این است که در آنها دسته‌بندی دقیق و گسترده‌ای بر روی اشکال مختلف توربولاتور کمتر مشاهده می‌شود. در ضمن تمرکز هم‌زمان بر روی توربولاتور و بررسی نوع نانو سیال استفاده شده علی‌الخصوص نانو سیالات هیبریدی در هیچ از یک مقالات قبل دیده نمی‌شود. به‌عنوان نوآوری بعدی پژوهش حاضر باید به دو جدول ارائه شده در بخش ۳ اشاره نمود که دو پارامتر شاخص معیار ارزیابی عملکرد (PEC) و محدوده عدد رینولدز مورد ارزیابی در مقالات ارائه نموده است که از این جهت می‌تواند مهم و مفید باشد که در کاربردهای واقعی جمع کننده‌های خورشیدی و صنایع وابسته به انرژی خورشیدی (صنایع نمک‌زدایی آب دریا، گرمایش هوا، نیروگاه‌ها، تبرید و ...) اطلاعات مفید و دقیقی را برای استفاده‌کنندگان در اختیار قرار می‌دهد.

۱-۲- به‌کارگیری توربولاتورها با ایجاد تغییر در ساختار لوله جاذب (دسته اول)

در معرفی انواع توربولاتور بکار رفته در مطالعات پیشین می‌توان به ایجاد شیار، موج‌دار کردن لوله و یا ایجاد سوراخ در دیواره لوله اشاره

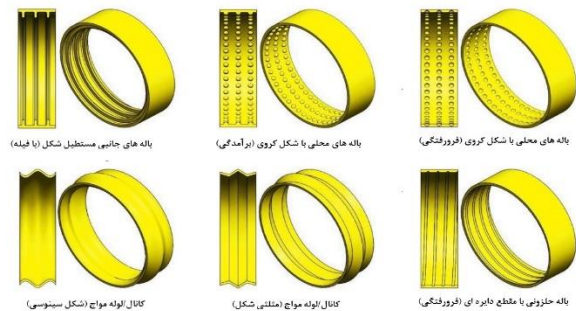
نمود که با اعمال این تغییرات در دیواره لوله جاذب، اغتشاش بیشتری در جریان ایجاد می‌شود. برخی از انواع این توربولاتورها در شکل (۱) قابل مشاهده است. در مطالعه ردی و ساتیانارایانا [۲۲] این نوع توربولاتور یافت شد. آنها با ایجاد اشکال موج‌دار با سطح مقطع‌های متفاوت (دایروی، دوزنقه‌ای، مثلثی و مربعی) در دیواره لوله، اثر آنها را بر عملکرد جمع کننده خورشیدی سهموی بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که باله‌های دوزنقه‌ای بیشتر از سایر اشکال، انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. مقایسه نتایج حاصل از بکار بردن لوله جاذب موج‌دار همراه با فرورفتگی و یا برآمدگی روی دیواره داخلی لوله با حالت وجود پره‌های ماریچ در لوله جاذب جمع کننده سهموی، بیانگر عملکرد بهتر در افزایش انتقال حرارت برای لوله جاذب با فرورفتگی در مقایسه با لوله با برآمدگی و یا با باله‌های ماریچ بوده است. از طرفی گودی با عمق بیشتر و گام باریک‌تر در جهت محیطی برای بهبود عملکرد افزایش انتقال حرارت مفید بوده است [۲۳]. موج‌های پره‌ای شکل داخلی و بررسی پارامترهای مرتبط با آن از جمله خستگی حرارتی، تلفات فشار، تنش‌های حرارتی-مکانیکی و تلفات حرارتی در مطالعه مونوز و آبانادرز [۲۴] یافت شد که اثراتی برابر با ۱۸٪ و ۱۰٪ تغییر به ترتیب در انتقال حرارت و افت فشار را باعث شده بودند. در عمل برخی جمع کننده‌ها علی‌رغم داشتن نرخ جریان هوای کمتر، به دماهای بالاتری باید برسند. با افزودن برآمدگی‌های پین شکل به دیواره لوله جاذب می‌توان چنین دماهای بالایی را تولید نمود که مطالعه آزمایشگاهی توسط ژائو و همکاران [۲۵] در این زمینه انجام شده است و نتایج برای سه نوع جمع کننده مختلف باهم مقایسه شدند. دمای خروجی جمع کننده‌های هوایی خورشیدی به‌طور قابل توجهی به سه عامل تابش خورشیدی، سرعت جریان هوا و پارامترهای هندسی باله پین بستگی دارد. بر اساس نتایج آنها هر چه نرخ جریان هوا کمتر باشد، استفاده از لوله‌های جاذب با پره داخلی مفیدتر است. از طرفی در جمع کننده‌های با نرخ جریان هوای بالاتر، افزایش افت فشار بیشتر از افزایش مقدار گرما بوده که در نتیجه جمع کننده‌های خورشیدی با لوله‌های صاف راندمان حرارتی-هیدرولیکی بالاتری را نشان داده‌اند. راندمان مؤثر جمع کننده در نرخ جریان هوا ۵۰ تا ۱۲۰ نیوتن‌متر مکعب در ساعت با و بدون استفاده از پره‌های پین شکل به ترتیب از ۴۲/۱۸، ۵۶٪ و از ۳۲/۴٪ تا ۴۱/۵٪ متغیر بود. بازده انرژی ابتدا با سرعت جریان هوا افزایش می‌یابد و قبل از کاهش بیشتر با سرعت جریان هوا به حداکثر می‌رسد.

در مقادیر بالاتر رینولدز باعث اختلال در عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات^۲ جمع کننده سهموی می‌گردد. علاوه آنها بر اساس نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی ۱۴٪ صرفه‌جویی در مصرف مواد داشته‌اند. مقایسه عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات برای لوله‌های جاذب صاف با پره‌های طولی شکل پر شده از سیال گازی توسط بلووس و همکاران انجام شده که بر اساس نتایج آنها طول پره بارانمان جمع کننده و افت فشار نسبت مستقیم داشته است. همچنین نوع پره‌دار بهبودی در راندمان برابر با ۸۲٪ نسبت به نوع صاف داشته [۲۹] و البته عدد ناسلت افزایش ۶۵/۲ برابری را نشان داده بود [۳۰].



شکل ۲: توربولاتور استفاده شده توسط راشد و همکاران [۲۸]

برخی از منابع موجود، پره‌های طولی میله‌ای با سطح مقطع‌های متفاوت را بررسی نمودند که شکل سطح مقطع در عملکرد کلی پره مؤثر بوده است و لذا میزان اغتشاش تولید شده و خصوصیات حرارتی جمع کننده را تحت الشعاع قرار می‌دهند. سطح مقطع توربولاتورهای میله‌ای اشکال مختلفی از جمله مستطیلی، مثلثی و مخروطی داشته‌اند که محققین، اثر آنها را در ایجاد اغتشاش و بهبود راندمان حرارتی بررسی نمودند. جمع کننده‌هایی که سیال عامل آنها در فاز گازی هستند معمولاً ضرایب انتقال حرارت پایینی دارند که برای جبران آن می‌توان از پره‌های میله‌ای شکل استفاده کرد. آناند و کومار [۵] از پره با سطح مقطع‌های مختلف مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای، T شکل و Y شکل برای بهبود عملکرد حرارتی جمع کننده سهموی استفاده کرده و با بررسی خصوصیات حرارتی آنها، بهترین شکل برای سطح مقطع را از بین آنها انتخاب نمودند. بر اساس گزارش آنها، بهترین نوع پره با پروفیل مستطیل شکل بوده که افزایش ضریب انتقال حرارت آن در مقایسه با لوله جاذب صاف ۲۳/۸۱٪ بوده است. انواع توربولاتور



شکل ۱: تغییرات ایجاد شده در دیواره لوله به عنوان توربولاتور [۱۶]

۲-۲- به کارگیری توربولاتور به شکل افزونه در لوله جاذب

قرار دادن افزونه‌های اضافی در لوله جاذب جمع کننده‌ها که جزو دسته دوم توربولاتورها می‌باشند، بیشتر مورد توجه محققین بوده است [۱۶]. این توربولاتورها اشکال مختلف با سطح مقطع‌های متفاوتی داشتند از جمله می‌توان به توربولاتورهای میله‌ای شکل با سطح مقطع‌های مختلف اشاره نمود. دسته دیگر شامل توربولاتورهای مارپیچ یا سیم پیچ شکل و دسته آخر توربولاتور، شامل صفحات سوراخ‌دار و محیط متخلخل می‌باشد که در ادامه به تفصیل به مرور مطالعات انجام شده در این زمینه‌ها پرداخته خواهد شد.

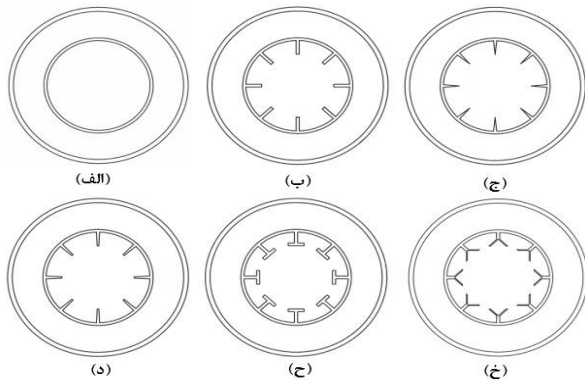
۲-۲-۱- توربولاتورهای میله‌ای و دنده‌ای شکل

یکی از انواع پر کاربرد توربولاتورها، نوع میله‌ای شکل آن است که برای بهبود خصوصیات حرارتی جمع کننده‌ها استفاده شده است [۲۶]. تغییر هندسه سطح مقطع پره میله‌ای شکل مانند افزایش طول و ضخامت آن باعث بهبود عدد ناسلت، راندمان حرارتی و همین‌طور افزایش ضریب اصطکاک جمع کننده شده بود. محل قرارگیری پره نیز مهم است. بر اساس مطالعات انجام شده قرار گرفتن پره در نیمه پایینی لوله جاذب باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود [۲۷]. الراشد و همکاران [۲۸] با به کارگیری یک توربولاتور میله‌ای پره‌دار (شکل ۲) در لوله جاذب یک جمع کننده متمرکز بشقابی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی و اقتصادی آن را بررسی نمودند. متغیرهای مورد بررسی آنها شامل تغییرات زاویه و گام پره، قطر میله و عدد رینولدز بوده است. طبق یافته‌های آنها زاویه‌های مختلف گام باله‌ها بر شاخص^۱ PEC پیش‌بینی شده در داخل جمع کننده سهموی، تأثیر معنی‌داری داشته که این شاخص تقریباً با افزایش گام باله‌ها تشدید می‌شود. همچنین مشاهده شد که شاخص PEC پیش‌بینی شده با افزایش عدد رینولدز کاهش یافته است. نتایج آنها حاکی از آن است که استفاده از توربولاتور میله‌ای پره‌دار در اعداد رینولدز کمتر از ۱۲۰۰۰ مناسب بوده است و

² Hydrothermal

¹ Performance Evaluation Criteria

عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات و ترمودینامیکی لوله جاذب بهبود یافته بود. همین‌طور در مقایسه با لوله صاف، عدد ناسلت $۰.۲۵۶/۳ - ۰.۸۳۸/۷$ و ضریب اصطکاک $۰.۴۴۰/۳ - ۰.۷۸۸/۸$ افزایش داشته و در معیارهای ارزیابی عملکرد، کاهش تولید کل آنتروپی و بازده اگزرژی‌تیک حداکثر مقدار $۰.۳۶۰/۳$ ، $۰.۹۳۳/۳$ افزایش را نشان داده بودند. آنها به‌طور کلی نتیجه گرفتند که درج ساختار هیبریدی فوم فلزی نیمه حلقوی و باله‌ای شکل ($SAFM^1$) گزینه خوبی برای بهبود عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات و ترمودینامیکی لوله جاذب در مقایسه با فوم فلزی نیمه حلقوی تک (SAM^2) یا فوم فلزی شکل باله (FM^3) است. درجه افزایش PEC بین $۱۹/۷ - ۲۳۴/۷$ ، راندمان اگزرژی بین $۱۱/۸ - ۱/۱$ و درجه کاهش تولید آنتروپی $۳۱۱/۷ - ۲۱/۵$ است.



شکل ۳: انواع توربولاتور میله‌ای با سطح مقطع‌های متفاوت الف) بدون توربولاتور ب) مستطیلی ج) مثلثی د) دوزنقه‌ای ح) Y شکل خ) T شکل [۵]

توربولاتورهای دنده‌ای نیز نوع دیگری از مغشوش کننده‌های جریان هستند که توسط محققینی از جمله ژو و همکاران [۳۷] در دو شکل دنده‌ای W و C در دیواره‌های لوله جاذب جایگذاری شدند. این نوع توربولاتورها اگرچه باعث بهبود عملکرد حرارتی می‌گردند اما افت فشار را نیز افزایش می‌دهند. همچنین شیانگتائو و همکاران [۳۸] با تعبیه پره پین شکل در نیمه پایینی لوله جاذب خصوصیات حرارتی و توزیع جریان سیال را داخل لوله جاذب جمع کننده سهموی بررسی کردند. آنها سه حالت تک پین، سه پین و تعبیه پین در نیمه پایینی لوله را باهم مقایسه نمودند که دریافتند با افزایش تعداد پین بازده حرارتی سیستم و البته افت فشار نیز افزایش می‌یابد. نتایج آنها بیانگر بهبود عدد ناسلت و عملکرد حرارتی جاذب به ترتیب تا ۹% و ۱۲% بوده است. یکی دیگر از اشکال توربولاتورهای استفاده‌شده در مطالعات نوع

استفاده‌شده در مطالعه مذکور در شکل (۳) نشان داده شده است. پره‌های طولی مستطیلی شکل به همراه یک محافظ داخلی بازتابنده کمکی در لوله جاذب در جمع کننده سهموی در مطالعه بلووس و تزیوانیدیس [۳۱] نیز مطالعه شده بود. دلیل استفاده از این دو امکان در کنار هم افزایش راندمان حرارتی با دمای عملیاتی بالاتر بوده است چراکه لایه محافظ باعث انعکاس تلفات حرارتی به سطح جاذب می‌شود. افزایش راندمان حرارتی و اگزرژی در سطوح دمای عملیاتی بالاتر و در نرخ‌های جریان حجمی پایین‌تر شدیدتر است. در همین راستا آنها بهبودی معادل ۰.۹% را در نتایج مربوط به افزایش حرارتی ثبت کردند. دبی جرمی ورودی به لوله جاذب نیز از جمله پارامترهایی است که تغییرات آن بر روی عملکرد جمع کننده‌ها با و بدون پره داخلی طولی در لوله جاذب [۳۲] و همراه با ارتفاع‌های مختلف پره [۳۳] توسط بلووس و همکاران با احتساب معیارهای ارزیابی بر پایه مفاهیم انرژی و اگزرژی بررسی شده بود. طبق نتایج آنها، حداکثر راندمان اگزرژی مربوط به ارتفاع ۱۰ میلی‌متر پره بوده که برابر با مقدار $۴۵/۹۵\%$ گزارش شده است. از طرفی تعداد و مکان مناسب پره‌های داخلی در لوله جاذب نیز بر عملکرد جمع کننده‌های سهموی مؤثر بوده است. با کمک معیار افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک، مشخص شده که قرارگیری پره‌های مستطیلی در قسمت پایینی جاذب جایی که شار گرمای خورشیدی متمرکز است عملکرد بهتری را نشان داده است. آنها به‌طور کلی نتیجه گرفتند که استفاده از باله در قسمت فوقانی افزایش قابل توجهی در عملکرد ارائه نمی‌دهد. همچنین تعداد بیشتر پره‌ها منجر به بازده حرارتی بالاتر و افت فشار بیشتر شده و علاوه بر این، معیار ارزیابی عملکرد (PEC) با افزایش تعداد باله بالاتر رفته بود [۳۴].

فیلیپ و همکاران [۳۵] بر روی توربولاتورهای با مقطع مثلثی و مستطیلی در لوله جاذب جمع کننده صفحه تخت کار کردند. طبق تحقیقات آنها افزایش زاویه حمله صفحه توربولاتور باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. عملکرد پره‌های مختلف با مقاطع متفاوت مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای در بستر یک ساختار نیمه حلقوی فوم فلزی جانمایی شده در نیمه پایینی لوله جاذب یک جمع کننده سهموی توسط پنگ و همکاران [۳۶] مطالعه شده بود. آنها تغییرات در انتقال حرارت جابجایی اجباری آشفته و جریان تحت شار حرارتی غیریکنواخت را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج گزارش شده،

² Semi-Annular Metal foam

³ Fin shape Metal foam

¹ Semi-Annular and Fin shape Metal foam

استفاده از تکنولوژی‌هایی چون سیم‌پیچ یا سیم مارپیچ در دیواره داخلی لوله، لوله با فرورفتگی و ... نیز توسط تو و بنیتو [۴۹] بررسی شده بودند. عملکرد توربولاتور به شکل سیم‌پیچ و نوار مارپیچ بر روی رفتار حرارتی جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت توسط کارسیا و همکاران [۵۰] مطالعه شده بود. بر اساس یافته‌های آنها، نوار پیچ‌خورده باعث افزایش افت فشار شده اما این موضوع برای سیم‌پیچ به‌شدت وابسته به هندسه آن بوده است که در صورت مقدار افت فشار آن کمتر از نوار تاب‌خورده بوده است؛ اما در مورد بهبود عملکرد حرارتی، همه انواع توربولاتورها باعث بهبود عملکرد لوله جاذب نسبت به لوله صاف‌شده بودند اما در کل سیم‌پیچ‌ها نسبت به توربولاتورهای مارپیچ بهبود بیشتری را به همراه داشتند. استفاده از سیم‌پیچ با مقطع مثلثی به‌عنوان توربولاتور برای بهبود عملکرد لوله جاذب جمع‌کننده سهموی توسط یلماز و همکاران [۵۱] مورد توجه بوده است. نتایج آنها بهبود قابل توجهی را در عملکرد حرارتی گیرنده با استفاده از میله تاب‌خورده سیم‌پیچ شکل در کل لوله، به دلیل افزایش اختلاط سیال، اختلال در لایه‌مرزی حرارتی و کاهش دمای لوله جاذب، نشان داده بود که انتقال حرارت تا 183% و راندمان حرارتی بین $0/4 - 1/4\%$ بهبود داشته‌اند. از آنجایی که استفاده از درج به‌ویژه با افزایش اعداد رینولدز باعث افت فشار قابل توجهی می‌شود، نرخ‌های تولید آنتروپی با استفاده از درج‌ها برای محدوده پارامترهای در نظر گرفته‌شده همچنان کاهش یافته است. همچنین در کمترین نرخ جریان، افزایش راندمان حرارتی قابل توجهی مشاهده شده بود، با این حال، انرژی خروجی بسیار کمتر بوده و گرادیان دما در لوله جاذب قابل توجه گزارش شده بود؛ بنابراین، استفاده از درج‌ها در نرخ‌های پایین جریان سیال عامل برای عملکرد ایمن گیرنده طی سال‌ها بدون از دست دادن عملکرد، ضروری به نظر می‌رسد. قاسمی [۵۲] از یک توربولاتور نواری پیچ‌خورده در لوله جاذب استفاده کرد. او با تغییر زاویه تاب خوردگی عملکرد هیدرودینامیکی جمع‌کننده را بررسی نمود که حداکثر بهبود راندمان حرارتی و ضریب اصطکاک را به ترتیب برابر با $45/04\%$ و $91/11\%$ به دست آورد. همچنین تعداد پیچ‌های داخلی یک لوله مارپیچ نیز بر میدان جریان و انتقال حرارت تأثیر دارد که توسط وانگ و همکاران [۵۳] مطالعه شد. شیخ‌الاسلامی و همکاران [۵۴] با در نظر گرفتن یک توربولاتور مارپیچی داخل مجرای دایره‌ای لوله جاذب یک جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت، اثر عدد رینولدز و زاویه مارپیچ را بر رفتار گرمایی نانو سیال داخل لوله مطالعه نمودند. همان نویسندگان [۵۵] تأثیر نوار مارپیچ در جریان آشفته نانو سیال را نیز با کمک قانون دوم

مخروطی شکل بوده است که بر اساس مطالعه ایزدی و همکاران [۳۹] استفاده از آن می‌تواند انتقال حرارت را $11/91\%$ بهبود دهد. مطالعه بر روی باله‌های ستاره‌ای شکل در لوله جاذب جمع‌کننده‌های سهموی توسط بلووس و تزیوانیدیس [۴۰] انجام شده بود. آنها محدوده دمای ورودی بین $400 - 600$ کلون با دبی حجمی 150 لیتر بر ثانیه را برای ابعاد مختلف باله‌ها بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که باله با ابعاد بزرگ‌تر باعث بهبود عملکرد از منظر معیارهای راندمان حرارتی، راندمان انرژی و راندمان کلی جمع‌کننده شده به قسمی که افزایش در عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت تا 60% بوده است. این پیشرفت‌ها منجر به کاهش تلفات حرارتی تا 14% شده بود. افزایش قابل توجهی در افت فشار و در نتیجه در تقاضای کار پمپاژ وجود داشته که تا 900% می‌رسید. بعلاوه درج‌های ستاره‌ای بهینه دارای باله‌هایی با ضخامت 5 میلی‌متر بودند. طول باله بهینه درج ستاره بین 20 میلی‌متر تا 30 میلی‌متر است. علاوه بر این، آنها نتیجه گرفتند زمانی که سیستم در دماهای بالاتر کار می‌کند، طول باله بهینه بیشتر بوده است. عملکرد توربولاتور ستاره‌ای همراه با لوله جاذب با پره‌های طولی داخلی با مقطع مستطیل شکل در جمع‌کننده‌های خورشیدی سهموی توسط وحیدی نیا [۴۱] بررسی شد. وی به این نتیجه رسید که هر چه ابعاد پره داخلی بزرگ‌تر باشد، اختلاط جریان بیشتر بوده و بازده انرژی و انرژی جمع‌کننده بهبود بیشتری می‌یابد که حداکثر مقدار این بهبود را برای بازده انرژی و انرژی برابر با $5/96\%$ و $6/76\%$ گزارش نمود. همین‌طور حداکثر معیار ارزیابی عملکرد نیز $1/62$ بوده است. علاءالدین و همکاران [۴۲] نیز دو نوع توربولاتور دنده‌ای پین شکل با مقطع دایره‌ای و توربولاتور دنده‌ای مایل محیطی را بررسی نمودند. بر اساس تحقیق آنها، توربولاتور شیب‌دار دنده‌ای به مقدار قابل توجهی عملکرد ترموهیدرولیک جمع‌کننده را بهبود داده است و عدد PEC آن به مقدار $1/46$ رسیده بود.

۲-۲-۲- توربولاتورهای مارپیچ و سیم‌پیچ

افزونه‌های مارپیچ به‌عنوان موانع بکار رفته در مسیر جریان اگرچه افت فشار را افزایش می‌دهند اما با تولید مولدهای گردابی باعث افزایش عملکرد حرارتی سیستم‌های انتقال‌دهنده حرارت می‌شوند [۴۳-۴۸]. در کاربرد موج‌های پره‌ای شکل داخلی، ویژگی‌هایی چون خستگی حرارتی، تلفات فشار، تنش‌های حرارتی-مکانیکی و تلفات حرارتی را می‌توان مدنظر قرارداد. در این راستا در مطالعه انجام‌شده بر روی لوله‌های باله‌دار مارپیچ که توسط مونوز و آبانادز [۲۴] انجام شده، مقدار 18% بهبود در انتقال حرارت و 10% افزایش افت فشار گزارش شده است.

ترمودینامیک ارزیابی کردند. شیخ‌الاسلامی و فرشاد [۵۶] یک لوله شش‌ضلعی را جایگزین لوله دایره‌ای دارای توربولاتور مارپیچ کردند که باعث اتلاف انرژی ۱۸٪ کمتر شده بود. همچنین آنها اثرات توربولاتور بر انرژی تولیدشده و خصوصیات انتقال حرارت لوله جاذب پر شده با نانو سیال آب/آلومینیوم را بررسی نمودند [۵۷]. مقایسه نتایج عملکرد بین جمع کننده خورشیدی صفحه تخت با لوله جاذب پره‌دار و توربولاتور مارپیچ با جمع کننده معمولی توسط کومار و چاند [۵۸] انجام شد. آنها با تغییر در نسبت پیچش از ۸ به ۲ دریافتند که با کاهش نسبت پیچش مقدار راندمان حرارتی از ۷۲/۵۳٪ به ۷۴/۴۲٪ افزایش می‌یابد؛ یعنی نوار پیچ‌خورده با حداقل نسبت پیچش از نظر حرارتی بهتر عمل می‌کند. از طرفی کاهش نسبت پیچش منجر به افزایش افت فشار در مجرا شده بود؛ بنابراین راندمان مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات پایین‌تر در نرخ جریان جرمی بالاتر و نسبت پیچش حداقل مشاهده شده بود. پرامانگ و ایامسا [۵۹] از توربولاتور حلقوی مارپیچ مخروطی در لوله جاذب جمع کننده صفحه تخت استفاده نمودند. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها تجربی، استفاده از این نوع توربولاتور باعث بهبود عدد ناسلت و راندمان حرارتی به میزان ۱۰-۴٪ و ۸-۴٪ شده بود.

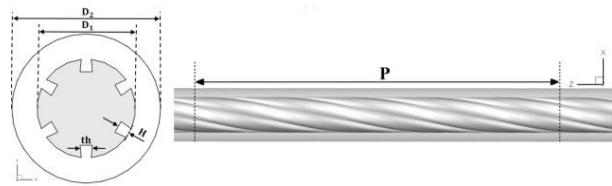
پره محوری مارپیچ داخلی با هندسه‌های مختلف و گام‌های متفاوت (شامل ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر) می‌تواند به‌عنوان توربولاتور بکار رود که باعث ۲۳/۱٪ بهبود در عملکرد حرارتی جمع کننده سهموی در مقایسه با نمونه ساده شده بود (شکل (۴)) [۶۰]. کاربرد پره‌های داخلی طولی سینوسی شکل در جمع کننده‌های سهموی با هدایت جریان به جهات مختلف و افزایش انتقال حرارت همرفت در نزدیک باله‌ها نیز توزیع یکنواخت دمای سیال را فراهم کرده و دمای محیطی گیرنده را کاهش داده بود. همچنین مشاهده شد که مهم‌ترین عاملی که باعث افزایش انتقال حرارت و ضریب اصطکاک می‌شود، مقدار دامنه برای باله با سطح جانبی سینوسی بوده است. علاوه تغییر دامنه هندسه سینوسی بر اختلاف دمای محیطی گیرنده مؤثرتر بوده است. در این مطالعه حداکثر بهبود عدد ناسلت به مقدار ۷۸٪ ایجاد شد [۶۱]. در پژوهشی دیگر، عملکرد یک نوار مارپیچ داخل جمع کننده سهموی در فرایندهای آنتالپی کم و بدون تغییر فاز در سیال حرارتی، مورد ارزیابی قرار گرفت. در حضور یک نوار پیچ‌خورده، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و راندمان حرارتی نسبت به موارد مرتبط با یک لوله خالی افزایش می‌یابد، زیرا هر دو نسبت پیچش (y/w) و عدد رینولدز کاهشی بوده‌اند. همچنین تجزیه و تحلیل بر اساس قانون

دوم ترمودینامیک نشان داده بود که افزایش بازده انرژی تنها در شرایط خاصی صورت می‌گیرد. علاوه بر این، حداقل نرخ برگشت‌ناپذیری ممکن است برای ترکیب خاصی از نسبت پیچش y/w و عدد رینولدز وجود داشته باشد [۶۲]. مشخصات هندسی نوار مارپیچ (شامل حالات مختلف برای پیچ‌وتاب نوار و نسبت عرض نوار مارپیچ) جزو پارامترهای تأثیرگذار بر ایجاد اغتشاش و بهبود خصوصیات حرارتی جمع کننده‌ها گزارش شده که بر اساس نتایج ام‌وسگی و همکاران [۶۳] بهبود قابل‌توجهی در حدود ۱۶۹٪ را در عملکرد حرارتی جمع کننده نسبت به لوله ساده ایجاد کرده بود. همچنین کاهش اختلاف دمای محیطی لوله جاذب به مقدار ۶۸٪ و افزایش راندمان حرارتی به مقدار ۱۰٪ نسبت به لوله جاذب ساده گزارش شده بود. علاوه، هم انتقال حرارت و هم اصطکاک سیال با کاهش نسبت پیچش و با افزایش نسبت عرض، افزایش یافتند. انتقال حرارت در محدوده ۶۹/۰۵-۲/۱ برابر، افزایشی بوده در حالی که اصطکاک سیال در محدوده ۵/۶-۱۴/۱ در مقایسه با گیرنده با یک لوله جاذب ساده افزایش یافته بود. فاکتورهای تقویت حرارتی برای مقایسه توان پمپاژ ثابت در محدوده ۷۴-۰/۲۷-۱۷ بوده است. استفاده از نوارهای با پیچ حلزونی برای همگن کردن توزیع دمای لوله جاذب و بهبود راندمان حرارتی جمع کننده توسط سانگ و همکاران [۶۴] پیشنهاد شد. بر اساس نتایج آنها در محدوده رینولدز مورد مطالعه، استفاده از این نوع توربولاتور به میزان زیادی افت گرما، دمای ماکزیمم و گرادیان دما را کاهش داده به قسمی که نشان از عملکرد مناسب توربولاتورهای حلزونی شکل (شکل (۵)) برای بهبود انتقال حرارت در لوله‌های جاذب جمع کننده‌های خورشیدی می‌باشد. همچنین آنها اثر زاویه تابش خورشیدی بر توزیع شار حرارتی در اطراف سطح خارجی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و دریافتند که تأثیر زاویه عرضی بر توزیع شار بیشتر از زاویه طولی است. همچنین زاویه عرضی برابر با ۱۱/۵۶ میلی رادیان باعث تغییر نسبی اتلاف حرارت با افزایش دمای ورودی شده بود و حداکثر اختلاف دمای محیطی نیز افزایش یافته که اثر آن با افزایش عدد رینولدز کاهشی بوده است (شکل (۶)).

یکی دیگر از انواع مغشوش کننده‌های جریان موانع سوراخ‌دار هستند که مانند بافل‌ها در مبدل‌های حرارتی عمل می‌کنند. به دلیل برخورد سیال با این موانع و عبور از داخل سوراخ‌های موجود، اغتشاشاتی در داخل جریان ایجاد شده که باعث بهبود خصوصیات حرارتی جمع کننده‌های خورشیدی می‌شود که برای لوله‌های با موانع دارای ۳ و ۱ سوراخ بهبودی به ترتیب برابر با ۱۱۵٪، ۱۰۸٪ نسبت

برای ایجاد اغتشاش در جریان داخل لوله جاذب بوده که توسط ردی و همکاران [۶۷] بکار گرفته شد. آنها با تغییر در نسبت‌های مختلف غلظت روغن ترمینول VP-1، سرعت جریان و پارامترهای هندسی را مورد بررسی قرار دادند. بررسی انتقال حرارت ترکیبی رسانش-همرفت-تابش با اعمال محیط‌های متخلخل نیز در جمع‌کننده‌های خورشیدی به‌عنوان یک مبدل حرارتی امکان‌پذیر است. دهقان و همکاران [۶۸] اثرات تغییر در پارامتر شکل محیط متخلخل و پارامترهای تابش بر عملکرد حرارتی را با روش تفاضل محدود تجزیه و تحلیل نمودند. آنها دریافتند که با گنجاندن تعریف هدایت تابش، انتقال حرارت کلی افزایش یافته و عدد ناسلت با پارامتر شکل محیط متخلخل نیز تغییر می‌کند به این معنی که اگر جریان در سطح مقطع یکنواخت‌تر باشد، انتقال حرارت بهبود می‌یابد. تأثیر فوم فلزی متخلخل بر عملکرد یک جمع‌کننده صفحه تخت توسط سعدالدین و همکاران [۶۹] به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شد. آنها ضخامت بهینه محیط متخلخل، همچنین عملکرد حرارتی و افت فشار در جمع‌کننده با کانال متخلخل را به دست آوردند که باعث بهبود ۸۲٪ عدد ناسلت شده بود. بر اساس حل عددی، با افزایش سرعت جریان، گرادیان دمایی بدون بعد در دیواره بالایی کانال افزایش یافته و اختلاف دمای کمتری بین دیواره و سیال ایجاد شده که در نتیجه منجر به عدد ناسلت بیشتر شده بود. با وجود افزایش افت فشار بدون ابعاد در هنگام استفاده از محیط متخلخل، اما این رشد آن قدر چشمگیر نیست که نشان‌دهنده نیاز به منبع انرژی بیشتر باشد. بر اساس تعریف PEC، با افزایش نرخ جریان از ۰/۵ به ۲ لیتر بر دقیقه، عملکرد جمع‌کننده از ۰/۶ به ۰/۳۹ کاهش می‌یابد. ضمناً آنها با ترکیب نتایج عددی و آزمایشگاهی توانستند حداکثر بازده حرارتی و عدد ناسلت را به مقدار ۱۸/۵٪ و ۸۲٪ بهبود بخشند. عملکرد حرارتی دو جمع‌کننده صفحه تخت مشابه با جاذب‌تر توسط جویباری و همکاران [۷۰] مقایسه شده بود. آنها کانال اولی را با محیط متخلخل پر نموده در حالی که دومی کاملاً خالی بوده است. بر اساس نتایج آنها، تخلخل در دی‌های کم تأثیر بسیاری بر روی منحنی‌های مشخصه جمع‌کننده داشته و محیط متخلخل باعث کاهش فشار معمولی شده که با افزایش عدد رینولدز به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد. همین‌طور عدد ناسلت در جمع‌کننده کانال متخلخل ارزش بیشتری دارد و مقدار آن با استفاده از رسانه متخلخل نسبتاً تا ۸۲٪ افزایش می‌یابد. همچنین از تجزیه و تحلیل آنتروپی متوجه شدند که افت فشار بیشتر تأثیر زیادی بر تولید آنتروپی ندارد.

به لوله بدون مانع سوراخ‌دار ثبت کرده بودند. همچنین مقادیر ضریب اصطکاک با افزایش تعداد سوراخ‌های روی موانع کاهش می‌یابد.



شکل ۴: لوله ماریچج بررسی شده در مطالعه زابلی و همکاران [۶۰]



شکل ۵: شماتیک لوله جاذب با توربولاتور ماریچج حلزونی [۶۴]

۲-۲-۲- توربولاتورهای سوراخ‌دار و متخلخل

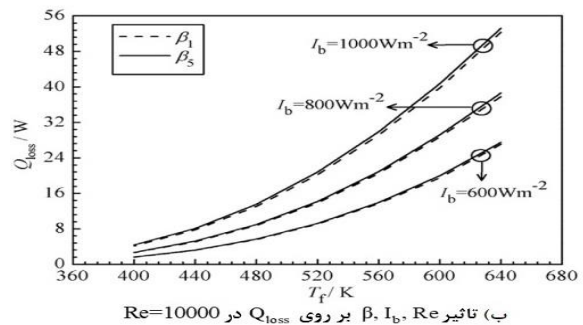
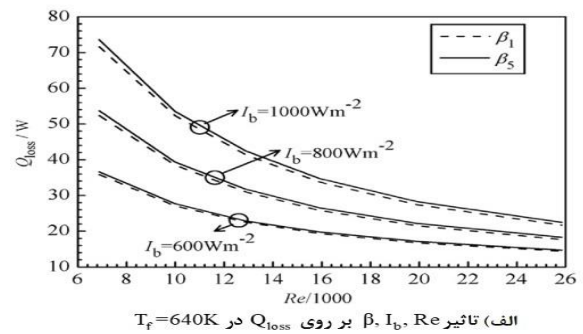
در مورد لوله بدون موانع سوراخ‌دار، مقادیر ضریب اصطکاک کمتر از تمام مقادیر مربوط به حالت درج موانع سوراخ‌دار بوده است [۶۵]. اموسگی و همکاران [۶۶] نیز در این راستا خصوصیات هندسی موانع سوراخ‌دار از جمله زاویه و جهت صفحه، فاصله و قطر صفحه را بر عملکرد حرارتی و ترمودینامیکی جمع‌کننده سهموی خورشیدی بررسی نمودند. آنها دریافتند عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به‌شدت به فاصله و اندازه درج و همچنین عدد رینولدز جریان بستگی دارد. برای محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی آنها، دما و پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده، افزایش عدد ناسلت ۱۳۳/۵-۸٪ برابر و افت ضریب اصطکاک ۹۵-۱/۴ برابر بوده است در حالی که ضریب افزایش حرارتی از ۱۰/۵-۰/۴۴ برابر گزارش شد. همچنین آنها بیان داشتند که استفاده از راندمان حرارتی اصلاح‌شده جمع‌کننده برای ارزیابی عملکرد، مناسب‌تر است زیرا بهره واقعی در عملکرد گیرنده و افزایش متناظر در قدرت پمپاژ را در نظر می‌گیرد. همین‌طور کاهش گرادیان دمای لوله جاذب برای کاربردهایی که به‌سرعت جریان پایین نیاز دارند، جایی که گرادیان دما بالاتر از ۵۰ کلوین است، مفید بوده است. کاهش دمای لوله جاذب نیز نقش مهمی در کاهش تلفات تابش داشته است؛ بنابراین کاهش گرادیان دما به مقادیر کمتر از ۵۰ کلوین عملکرد گیرنده را بیشتر بهبود بخشیده مشروط بر اینکه عملکرد به‌دست‌آمده کمتر از افزایش قدرت پمپاژ نباشد. همین‌طور آنها با تغییر در نوع سیال مورد استفاده در محدوده اعداد رینولدز مختلف و دمای متفاوت، شرایط هندسی بهینه با بهترین راندمان حرارتی اصلاح‌شده را بین ۸-۱/۲٪ گزارش کردند. استفاده از پره‌ها یا محیط متخلخل نیز روش دیگری

متخلخل تحت جابجایی اجباری بررسی نمودند. نتایج آنها حاکی از افزایش عدد ناسلت با کاهش عدد لوئیس بوده و همچنین روند مشابهی را نیز برای عدد اشمیت گزارش نمودند.

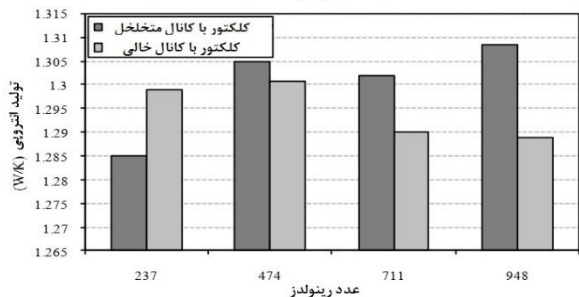
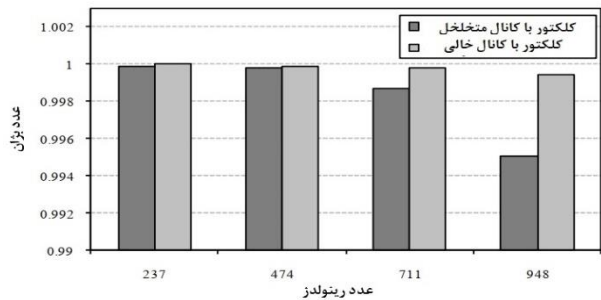
۳- تأثیر نانو سیال در عملکرد جمع‌کننده‌ها با و بدون توربولاتور

برای افزایش اثربخشی کلی جمع‌کننده خورشیدی، بهبود عوامل طراحی و ضریب انتقال حرارت جابجایی بین لوله‌های جاذب و سیال، راهکارهای مختلفی از سوی محققین پیشنهاد شده است. یکی از آنها استفاده از نانو سیال به جای سیال پایه ساده می‌باشد. اکثر تحقیقات نشان می‌دهد جایگزین کردن سیال کاری ساده با نانو سیالات اعم از نانو سیال تک یا هیبریدی می‌تواند منجر به افزایش راندمان حرارتی جمع‌کننده شود [۷۲]. وحیدی نیا و همکاران [۷۳] عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک جمع‌کننده سهموی خورشیدی را با نانو سیال هیبریدی نانولوله کربنی چند دیواره/اکسید آهن/ترمینول وی پی ۱ مطالعه کردند که باعث بهبود راندمان انرژی جمع‌کننده در حدود ۲/۵٪ و بهبود راندمان انرژی آن را نیز در حدود ۲٪ بهبود گزارش نمودند.

فتبری و هیهات [۷۴] تأثیر نوع، غلظت و درصد اختلاط نانو ذرات اکسید منیزیم و نانولوله‌های کربنی را بر خواص تابشی و راندمان جذب جمع‌کننده خورشیدی به صورت تجربی مطالعه نمودند. بر اساس مشاهدات آنها، افزایش غلظت نانو ذرات و هیبریدی شدن آن و افزایش عمق نفوذ، خواص تابشی و راندمان جذب تابش را تا ۹۰٪ بهبود داده بود. نانو سیال هیبریدی $Cu-TiO_2/H_2O$ همراه با مولدهای تولید گردابه در جمع‌کننده خورشیدی توسط نیک‌نژادی و همکاران [۷۵] مورد توجه قرار گرفته بود. بر اساس نتایج حاصله آنها، افزودن نانو سیال در کنار توربولاتور باعث بهبود عدد ناسلت و البته افزایش ضریب اصطکاک شده و نحوه قرارگیری مولدهای گردابی (افقی، عمودی و ضربدری) باعث تغییر در مقدار شاخص ارزیابی عملکرد شده بود. عملکرد نانو سیال و محیط متخلخل به شکل توأم و تأثیر آن بر راندمان جمع‌کننده خورشیدی توسط پنجا و همکاران [۷۶] مطالعه شده است. با اعمال شار حرارتی ثابت به مقدار $800-1000 W/m^2$ بر روی سطح داخلی دیواره بیرونی لوله جاذب و تغییر در کسر حجمی نانو ذرات ۷-۲٪ در سرعت‌های جریان جرمی متفاوت باعث ثبت ضریب عملکردی برابر با ۱/۹۹ و ۱/۹۷ و بازده حرارتی برابر با ۷۹/۰۳٪ و ۷۷/۹۳٪ برای دو نانو سیال Al_2O_3 و CuO شده بود. ترکیب هیبریدی



شکل ۶: تغییرات زاویه عرضی و شدت تابش خورشیدی بر گرمای اتلافی از لوله جاذب و توربولاتور حلزونی ماریچی استفاده‌شده در مطالعه سانگ و همکاران [۶۴]



شکل ۷: تأثیر محیط متخلخل بر الف) عدد بژان و ب) تولید انرژی [۷۰] تأثیر محیط متخلخل بر روی عدد بژان و تولید انرژی در شکل (۷) قابل نشان داده شده است. استفاده از محیط متخلخل به دلیل بهبود پتانسیل جذب انرژی خورشیدی توسط سیال عامل، بازده نوری را افزایش داده و تلفات حرارتی را در مقادیر کمتر عدد رینولدز کاهش داده بود. در اعداد رینولدز بزرگ‌تر، سهم بیشتری از تابش رسیده به جمع‌کننده به محیط تلف‌شده و منجر به رشد اتلاف حرارت شده بود. ارمغانی و همکاران [۷۱] تأثیر انتقال حرارت نانو سیال را در کانال

مرکب حاوی یک سیس پیچ با سطح مقطع شش ضلعی و یک توربولاتور مارپیچ داخل سیس پیچ مذکور در لوله جاذب جمع کننده سهموی بشقابی پر شده با نانو سیال هیبریدی CuO-SWCNT/Water توسط حسینی اصفهانی و همکاران [۸۳] بکار رفته است. نرخ انتقال حرارت جمع کننده سهموی با توربولاتور مذکور بین ۶۰-۲۰٪ بهبود داشته است. معیار ارزیابی عملکرد نیز بهبود قابل توجهی (حدود ۲۰٪) را نسبت به نمونه بدون توربولاتور نشان داده است. در ضمن بازده انرژی با سیال نانو هیبریدی با کسر حجمی ۲٪ به مقدار ۳۱/۷٪ بهبود داشته است.

در مطالعه آجینا و همکاران [۸۴] افزودن نانوسیال سیلیکون کاربید بر پایه آب مقطر باعث بهبود رسانایی حرارتی سیال تا ۳۰/۳٪، راندمان حرارتی جمع کننده صفحه تخت تا ۳۵/۵۳٪ و راندمان انرژی تا ۳۷/۴٪ شده بود. بعلاوه با افزایش سرعت جریان جرمی، بازده انرژی کاهش می‌یابد. باین حال، افزایش غلظت نانوسیال منجر به افزایش بازده انرژی شده بود. بعلاوه با فرض ثابت ماندن سرعت جریان ثابت، در مقایسه با آب مقطر، بازده انرژی نانوسیالهای SiC/DW بالاتر بود. بالاترین راندمان اکسرژی در ۰/۱٪ نانوسیال SiC ثبت شد. استفاده از نانو سیال TiO₂/Water در کنار توربولاتور باعث کاهش اتلاف حرارتی در حدود ۲۸/۲۶٪ شده در حالی که راندمان حرارتی را به مقدار ۳۸/۸٪ بهبود داده بود [۸۵]. مقایسه عملکرد توربولاتور ستاره‌های ۴ و ۸ پره با توربولاتور میله‌ای و لوله جاذب بدون توربولاتور در مطالعه بیبرینگرو و همکاران [۸۶] یافت شد. آنها از نانو سیال هیبریدی MWCTN-TiO₂/Syltherm800 استفاده نمودند که مقایسه نتایج با سیال ساده Syltherm800 حاکی از عملکرد بهتر نانو سیال هیبریدی بوده است که توانسته راندمان حرارتی را تا ۲/۷٪ بهبود دهد. از بین توربولاتورهای بررسی شده توسط آنها، نوع ستاره‌ای ۸ پره بیشترین عملکرد حرارتی را داشته که عدد ناسلت ۱۴۹٪، راندمان حرارتی ۵/۱۲٪ و ضریب اصطکاک نیز به مقدار ۶/۵ برابر نسبت به لوله بدون توربولاتور افزایش داشته است.

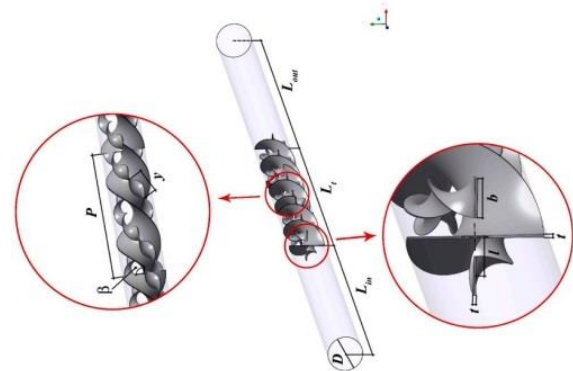
مصطفی و همکاران [۸۷] بر روی دو نوع توربولاتور با شکل نواری مارپیچ با تعداد کانال‌های مختلف داخل لوله جاذب جمع کننده سهموی مطالعه کردند. آنها دریافتند افزایش تعداد کانال‌های نواری مارپیچ باعث بهبود بازده جمع کننده خورشیدی به‌ویژه در رینولدزهای بالا می‌شود. آنها با اعمال شار ثابت ۱۲۰۰ وات بر دیواره لوله جاذب، بر اساس معیارهای عدد ناسلت و بازده جمع کننده، بهترین نوع توربولاتور را انتخاب نمودند. چراکه افزایش غلظت نانو ذرات و عدد

دو نانو سیال Al₂O₃/Syltherm800 و TiO₂/Syltherm800 با درصد‌های اختلاط مختلف در لوله جاذب یک جمع کننده خورشیدی با توربولاتورهای از نوع فرورفتگی‌های بیضی شکل نیز باعث بهبودی حدود ۳۸٪ در عدد ناسلت نسبت به حالت بدون توربولاتور شده بود. همین‌طور معیار ارزیابی عملکرد نیز برابر با ۱/۸۱ و راندمان حرارتی نیز ۶٪ افزایش داشته است [۷۷]. وحیدی نیا و همکاران [۷۸] نیز عملکرد جمع کننده سهموی با جاذب پره‌دار میله‌ای به‌عنوان توربولاتور و پر شده با نانو سیال هیبریدی MWCTN-Fe₂O₃/Therminol VP-1 را از منظر مفاهیم انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی مطالعه نمودند. بر اساس نتایج آنها، استفاده از نانو سیال هیبریدی باعث بهبود در راندمان انرژی و انرژی جمع کننده شده بود. اگرچه الحاق پره‌ها به لوله جاذب باعث افزایش هزینه جمع کننده شده اما به لحاظ انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی به مقدار ۱۸٪ صرفه‌جویی شده بود.

کرمی و همکاران [۷۹] نیز عملکرد جمع کننده خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانو سیال با نانولوله‌های کربنی را با جمع کننده صفحه تخت به‌طور تجربی مقایسه نمودند. آنها بازده جمع کننده خورشیدی جذب مستقیم با سیال پایه و نانولوله کربنی را به ترتیب ۴/۷٪ و ۲۲٪ بیشتر از جمع کننده صفحه تخت گزارش نمودند. محمد و همکاران [۸۰] نیز از توربولاتورهای مخروطی در لوله جاذب جمع کننده سهموی بشقابی برای ایجاد اغتشاش و بهبود عملکرد حرارتی آن استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند بکار بردن توربولاتور مخروطی و استفاده از روغن سیلیکونی و نانولوله کربنی به‌جای روغن خالص عملکرد حرارتی جمع کننده را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین بهبود راندمان حرارتی و راندمان انرژی را ۱۱/۵ و ۱۸/۲ درصد گزارش نمودند. نتایج بررسی اثر توربولاتور ترکیبی مارپیچ (نشان داده شده در شکل (۸)) در لوله جاذب جمع کننده با کمک نانو سیال اکسید مس-آب بیانگر کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز است. در ضمن آنها دریافتند که توربولاتور ترکیبی باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی شده بود [۸۱]. دزفولی زاده و همکاران [۸۲] عملکرد یک توربولاتور مارپیچی را در لوله جاذب با سه سطح مقطع مختلف دایره‌ای، بیضی عمودی و بیضی افقی بررسی پر شده با نانو سیال هیبریدی MWCTN-GO/Syltherm800 بررسی کردند. آنها دریافتند که تغییر سطح مقطع گیرنده تأثیر زیادی بر عملکرد هیدروپنماتیکی جمع کننده دارد تا جاییکه شاخص ارزیابی عملکرد PEC در تمام حالات مورد بررسی بزرگ‌تر از یک بوده است. توربولاتور

رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب PEC شده بود. اخیراً، نانو سیالات هیبریدی به دلیل عملکرد در محدوده وسیع‌تری از دما و رفع مشکلات ناپایداری مربوط به اغلب نانو سیالات مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در تحقیقات، استفاده از نانو سیالات هیبریدی مانند $MWCNT+Fe_3O_4$ بهبود قابل‌توجهی تا ۲۶/۳٪ را در عملکرد جمع‌کننده صفحه تخت موجب شده است. همچنین استفاده از نانوسیال هیبریدی علی‌رغم کاهش اندک در ضریب اصطکاک (۱۸٪/۹۱) باعث افزایش قابل‌توجه ضریب انتقال حرارت به میزان ۲۶/۲۹٪ نیز شده است [۸۸].

استفاده از توربولاتورهای مارپیچ محوری همراه با یک نانو سیال هیبریدی $Cu-Al_2O_3$ با سیال پایه آب به‌عنوان سیال عامل داخل لوله جاذب جمع‌کننده در تحقیق القاعد و همکاران [۹۱] یافت شد. آنها اثر توربولاتور را در کسرهای حجمی متفاوت در محدوده اعداد رینولدز ۱۸۰۰۰-۶۰۰۰ بر روی معیارهای ارزیابی راندمان حرارتی، راندمان انرژی و افت فشار جمع‌کننده محاسبه نمودند. علاوه بر بهبود کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و PEC می‌شود. نانو سیال هیبریدی $GAMWCNT$ با نانولوله‌های کربنی چند جداره بر اساس تکنیک‌های تجزیه و تحلیل پایداری، از جمله طیف‌سنجی فرابنفش مرئی و پتانسیل زتا، در سیال پایه بسیار پایدار هستند. در مطالعات آمر و همکاران [۹۲] اگرچه بازده انرژی با افزایش غلظت وزنی این نانو سیال هیبریدی بهبود داشته، اما با افزایش نرخ جرمی جریان کاهش یافته بود. همین‌طور افزایش غلظت نانوسیال $GAMWCNT$ باعث بهبود شاخص عملکرد شده بود به قسمی که دوره بازپداخت ۱/۸۹۷ سال برای جمع‌کننده صفحه تخت با نانوسیال هیبریدی به دست آمد که ۶/۲۲۸٪ کوتاه‌تر از شرایط استفاده از آب به‌عنوان سیال عامل انتقال حرارت بوده است. آنها نتیجه گرفتند که جمع‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت با نانوسیال $GAMWCNT$ به‌عنوان سیال انتقال حرارت مؤثرتر هستند و نسبت به جمع‌کننده‌های با سیال عامل آب در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌کنند. استفاده از نانوسیالات هیبریدی چند جداره-ای/آب، گرافن/آب، آب اکسید مس، اکسید آلومینیوم/آب، اکسید تیتانیوم/آب و اکسید سیلیکون/آب در جمع‌کننده‌های صفحه تخت



شکل ۸: توربولاتور مارپیچ مرکب استفاده‌شده در مطالعه زیانگ و همکاران [۸۱]

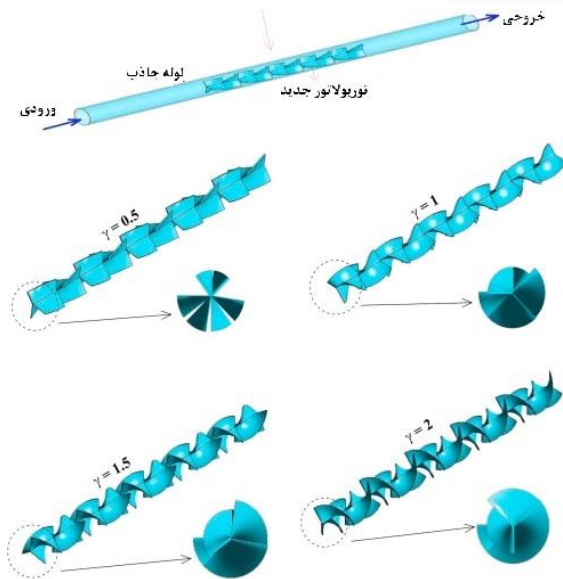
عظیمی و صفاریان [۸۹] عملکرد دو سیال کاری مختلف آب و نانو سیال هیبریدی $Fly-Ash-Cu/Water$ (۸۰:۲۰ حجم درصد) در جمع‌کننده صفحه تخت با لوله جاذب زیگزاگ را بررسی کردند. آنها علاوه بر محاسبه خصوصیات حرارتی و هیدرودینامیکی (از جمله عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی، ضریب اصطکاک و دمای خروجی در غلظت‌های مختلف نانو ذرات، دماهای مختلف سیال ورودی و نرخ جریان جرمی متغیر) مقدار آنتروپی تولیدشده را نیز محاسبه و گزارش نمودند. بر اساس نتایج آنها، استفاده از نانو ذرات منجر به افزایش دمای خروجی در نرخ جریان جرمی خاص می‌شود. همچنین افزایش غلظت نانو ذرات دمای خروجی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر نداده اما باعث افزایش تولید آنتروپی اصطکاک می‌شود. علاوه بر این، پمپاژ سیال کاری با دبی جرمی بالاتر، دمای خروجی را کاهش داده و تولید آنتروپی را به دلیل وجود اصطکاک افزایش می‌دهد. مقادیر افزایش عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی و تولید آنتروپی اصطکاک با افزایش دبی سیال به ترتیب برابر با ۳۳/۳۳٪، ۴۱٪ و ۸۱٪ شده بود. سمیعی‌زاده و همکاران [۹۰] رفتار حرارتی یک جمع‌کننده سهموی با توربولاتور میله‌ای با استفاده از سیال هیبریدی نانو

که نانوسیالات هیبریدی ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک را افزایش می‌دهند. هم‌زمان استفاده از نانوسیال هیبریدی $Cu-GO/Water$ دو فازی در کنار توربولاتور با اشکال هندسی مختلف (شکل ۹) در لوله جاذب یک جمع‌کننده صفحه تخت توسط نقید و همکاران [۹۹] مورد توجه قرار گرفته بود. آنها دریافتند که راندمان انرژی جمع‌کننده تحت تأثیر کسر حجمی نانو ذرات، سرعت ورودی، شکل هندسی توربولاتور و شرایط مرزی جمع‌کننده می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه آنها برای تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر در نسبت شکل^۱ توربولاتور (۷) در کسر حجمی‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. بر اساس شکل، استفاده از توربولاتور در لوله جاذب جمع‌کننده صفحه تخت منجر به عملکرد حرارتی-هیدرولیکی بهتری نسبت به لوله جاذب‌کننده بدون توربولاتور می‌شود همچنین، افزایش زاویه انحنا (۷) به‌طور قابل توجهی بر سرعت انتقال حرارت و افزایش افت فشار (Δp) تأثیر گذاشته بود. در ضمن پراکندگی نانوذرات مس و گرافن در آب باعث بهبود خواص حرارتی و افزایش عملکرد حرارتی شده بود. مصطفی و همکاران [۱۰۰] تأثیر عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک جمع‌کننده صفحه تخت را با سه سیال کاری از جمله آب، اکسید آلومینیوم/HYBN-مس-آب، و ن و سیال مونواکسید آلومینیوم-آب مورد ارزیابی قرار دادند. طبق نتایج، استفاده از نانوسیال بجای سیال پایه آب باعث کاهش دمای سطح جاذب شده و همین‌طور مناسب‌ترین سیال عامل جمع‌کننده، نانوسیال هیبریدی است. علاوه بر این، انرژی جمع‌کننده با استفاده از نانوسیال هیبریدی بیشتر از سایر سیالات عامل بوده و حداکثر افزایش آن با استفاده از نانوسیالات مونو و هیبریدی نسبت به آب به ترتیب $3/86$ و $4/23$ درصد بوده است. عملکرد ارزیابی معیار جمع‌کننده همین‌طور در حضور نانوسیال هیبریدی بزرگ‌تر از مونو سیال اکسید آلومینیوم-آب گزارش شد. آنها دریافتند که حداکثر تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی شامل دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و اکسیدهای گوگرد در جمع‌کننده پنل خورشیدی زمانی رخ می‌دهد که آب به‌عنوان سیال عامل اعمال شود و کمترین مقدار این آلاینده‌ها در هنگام استفاده از نانو سیال هیبریدی رخ داده بود. شیخ زاده و همکاران [۱۰۱] عملکرد یک توربولاتور در داخل یک کانال دما ثابت را بررسی نمودند. آنها عملکرد نانو سیال هیبریدی آب-مس-اکسید سیلیسوم با کسر حجمی ۱-۳٪ را، به‌صورت دوفازی شبیه‌سازی نموده و تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سیال را در کانال مذکور بررسی نمودند. آنها با تغییر در زاویه

توسط ورما و همکاران [۹۳] مطالعه شد که به ترتیب می‌تواند باعث بهبود راندمان انرژی آن نسبت به سیال پایه به مقدار $29/32$ ٪، $21/46$ ٪، $16/67$ ٪، $10/86$ و $6/97$ ٪ شود. همچنین نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله‌های کربنی چند جداره علاوه بر بهبود خصوصیات حرارتی و اپتیکی (بهبود راندمان نوری به مقدار $78/1$ ٪ و افزایش اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال تا 56 ٪) باعث صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش سطح جمع‌کننده تا 36 ٪ و کاهش انتشار CO_2 شده و دوره بازپرداخت کربن را تا $36/2$ ٪ کاهش داده بود [۹۴]. اثر استفاده از نانولوله‌های کربنی چند جداره‌ای کووالانسی CF-MWCNTs و نانو پلاکت‌های گرافن عامل‌دار کووالانسی (CF-GNPs) با نیتريد بور شش‌ضلعی (h-BN) نیز در آب مقطر در جمع‌کننده‌های صفحه تخت در نرخ جریان جرمی مختلف توسط حسین و همکاران [۹۵] مطالعه شده است. آنها دریافتند که عملکرد جمع‌کننده تخت با استفاده از نانوسیال هیبریدی بهتر از نانوسیال تک به نظر می‌رسد که بیشترین بهبود جمع‌کننده را تا 85 ٪ گزارش کردند. الشازلی و همکاران [۹۶] اثر نانو سیالات MWCNT حالت هیبریدی $50-50$ برای $MWCNT/Al_2O_3$ را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند که نتایجشان حاکی از تأثیر مستقیم غلظت نانو ذرات و سرعت جریان سیالات بر عملکرد حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت بوده است. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از نانوسیال هیبریدی $MWCNT/Al_2O_3$ افزایش راندمان را به ترتیب 26 ٪، 29 و 18 ٪ برای $1/5$ ، $2/5$ و $3/3$ لیتر در متر ارائه می‌دهد؛ بنابراین جایگزینی 50 ٪ از MWCNT با Al_2O_3 اقتصادی‌تر و کم‌خطرتر می‌باشد. بررسی تأثیر نانو سیال هیبریدی $MWCNT+Fe_3O_4/Water$ بر روی عملکرد حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت در غلظت‌های مختلف نانو سیال و نرخ‌های متفاوت جریان بیانگر افزایش $26/3$ ٪ در ضریب انتقال حرارت بوده در حالی که افت فشار ناشی از ضریب اصطکاک نیز حدود 19 ٪ کاهش داشته است [۹۷]. در مطالعه نبی و همکاران [۹۸] استفاده از المان‌های تولیدکننده اغتشاش در تمامی موارد مطالعه شده به دلیل ایجاد جریان چرخشی، اختلاط بهتر و سطح تماس بیشتر بین جریان سیال و دیواره داغ جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت، ضریب انتقال حرارت را بیش از حالت پایه افزایش داده بود. آنها حالت بهینه توربولاتور را نیز تعیین نمودند. سپس با بررسی اثر نانوسیال هیبریدی SWCNT-CuO/ H_2O در جمع‌کننده با بهترین حالت القاکننده تعیین شده در مرحله قبل و مقایسه نتایج با آب خالص نتیجه گرفتند

¹ Pitch Ratio

شده درحالی‌که مقدار افت فشار را نیز افزایش داده بود. همان نویسندگان [۱۰۷] در پژوهشی دیگر از یک توربولاتور پیچشی کنگره‌دار همراه با نانو سیال هیبریدی برای بهبود عملکرد مبدل حرارتی استفاده کردند که نتایج آنها بهبود در عملکرد حرارتی را نشان داده بود. فرشاد و شیخ‌الاسلامی [۱۰۸] نیز با افزودن توربولاتور پیچشی و نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم سعی در بهبود عملکرد حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت داشتند. محدوده عدد رینولدز موردبررسی آنها بین ۴۰۰۰-۲۰۰۰۰ بوده است. آنها نتیجه گرفتند افزایش در نسبت قطر و نسبت پیچش نوار، باعث بهبود نرخ انتقال شده و همین‌طور افت فشار را نیز افزایش می‌دهد به طوری‌که بیشترین مقدار ضریب عملکرد برابر با ۱/۰۸ در نسبت قطر ۰/۱۴ و نسبت پیچش ۷ در عدد رینولدز ۴۰۰۰ گزارش شده بود. عملکرد یک جمع‌کننده سهموی خورشیدی با توربولاتور نواری پیچ‌خورده و نانو سیال هیبریدی CuO/SWCNT بر پایه آب توسط اصفهانی و همکاران [۱۰۹] بررسی شد. حداکثر مقدار مربوط به معیار ارزیابی عملکرد (PEC) را برابر ۳/۵۲ در شرایط عدد رینولدز ۱۲۰۰۰ و کسر حجمی ۲٪ گزارش نمودند.

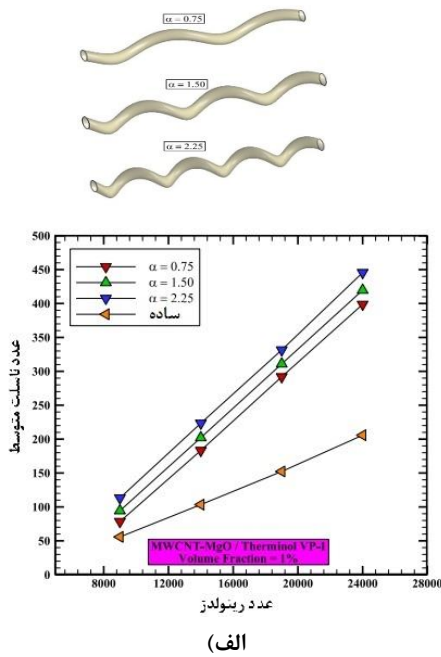


شکل ۹: توربولاتور مورد استفاده توسط نقید و همکاران [۹۹]

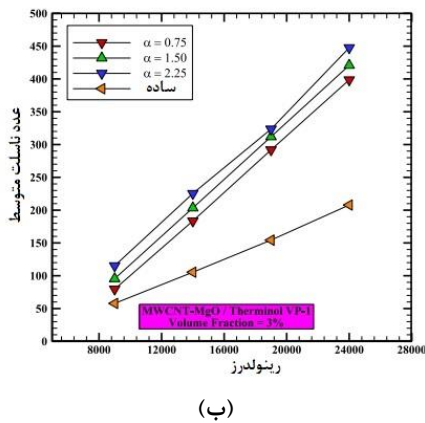
در مطالعه دیگری، استفاده از توربولاتور مارپیچی در لوله‌های جاذب حاوی نانو سیال هیبریدی MgO-MWCNT/Therminol VP-1 توسط الصراف و همکاران [۱۱۰] پیشنهاد شده بود. آنها با تغییر شرایط هندسی توربولاتور مارپیچ در اعداد رینولدز مختلف و کسر حجمی‌های متفاوت، تغییرات عدد ناسلت را بررسی نموده که در شکل (۱۱) نشان داده شده

توربولاتور متوجه افزایش در عدد ناسلت و ضریب اصطکاک شدند. بیشترین افزایش عدد ناسلت مربوط به کسر حجمی ۳٪ در عدد رینولدز ۹۰۰۰ با زاویه توربولاتور ۶۰ درجه بوده که مقدار آن برابر با ۸۳/۱۴۵٪/گز/ش شده است. ترکیب هم‌زمان توربولاتور و مولد گرداب و عملکرد آنها در مبدل حرارتی در مطالعه‌ای دیگر شیخ زاده و همکاران [۱۰۲] مورد بررسی قرار گرفته بود. آنها از نانو سیال هیبریدی با نانولوله کربنی-مس/آب استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها، استفاده هم‌زمان از توربولاتور و مولد گرداب باعث بهبود شاخص ارزیابی حرارتی-هیدرولیکی به مقدار بیشتر از ۱ شده بود. عسکریان و همکاران [۱۰۳] نیز اثرات هم‌زمان توربولاتور و ورتکس ژنراتور را بر عملکرد مبدل حرارتی با نانو سیال هیبریدی آب/مس-نانولوله کربنی مطالعه نمودند. آنها با افزایش سرعت جریان ورودی به مبدل، بهبود عملکرد حرارتی و افزایش در افت فشار مبدل را مشاهده نمودند که بیشترین مقادیر گزارش شده مربوط به کسر حجمی ۴٪ در عدد رینولدز جریان ۳۲۰۰۰ بوده است. تحلیل انرژی، اقتصادی-زیست‌محیطی یک جمع‌کننده خورشیدی سهموی با نانو سیال هیبریدی نانولوله کربنی چندجداره-اکسید مس/آب در کسر حجمی ۲-۶٪ همراه با توربولاتور پیچ‌خورده توسط حسنی و همکاران [۱۰۴] انجام شد. بر اساس نتایج آنها، حداکثر عملکرد حرارتی برای نوار پیچ‌خورده در نسبت پیچش ۱ در عدد رینولدز ۱۲۰۰۰ و کسر حجمی ۲٪ حاصل شده که برابر با ۳/۵۲/۵ برابر ۳/۳ گزارش شده بود. رحمتی و همکاران [۱۰۵] عملکرد یک مبدل حرارتی را لوله مارپیچ و لوله مستقیم را به صورت تجربی باهم مقایسه نمودند. آنها مخلوطی از نانو ذره اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم را سیال پایه آب باهم ترکیب نموده و نانو سیال هیبریدی خود را با قطر متوسط ذرات ۲۰-۳۰ نانومتر ساختند. بر اساس نتایج آنها، لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم باعث بهبود عدد ناسلت به مقدار ۶/۶٪ شده بود. همین‌طور مقدار افزایش اختلاف دمای بهینه نانو سیال هیبریدی در لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم ۱۰٪ بوده است. جمعیتی و پور محمدیان [۱۰۶] دو نوار تابیده متقاطع را به عنوان توربولاتور به یک جمع‌کننده خورشیدی سهموی پر شده با نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم جهت تقویت انرژی تشعشعی اضافه نمودند. آنها با تغییر در تعداد نوارهای تابیده شده، مقادیر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک را ارزیابی نمودند. اندازه‌گیری‌های آنها حاکی از این بود که افزایش درصد نانو ذرات در سیال پایه باعث بهبود خصوصیات حرارتی جمع‌کننده

باشد، حالت مورد بررسی سودمند فرض می‌شود و افزایش حرارتی بالاتر از مقدار است. از سوی دیگر کاهش در افت فشار، زمانی که PEC کمتر از یک باشد،



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: هندسه مارپیچ استفاده شده برای توربولاتور توسط الصراف و همکاران و تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی الف) $\phi = 1\%$ و ب) $\phi = 3\%$ مربوط به نانو سیال هیبریدی با تغییر هندسه [۱۱۰]

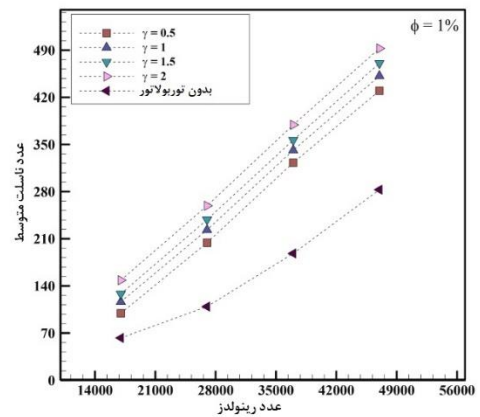
برای حالت مورد بررسی بهتر از مقدار بررسی شده در مرجع [۳۴] نمی‌باشد. مقدار PEC با کمک فرمول زیر بیان می‌گردد:

$$PEC = \left(\frac{Nu_{av}}{Nu_{av,0}} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (1)$$

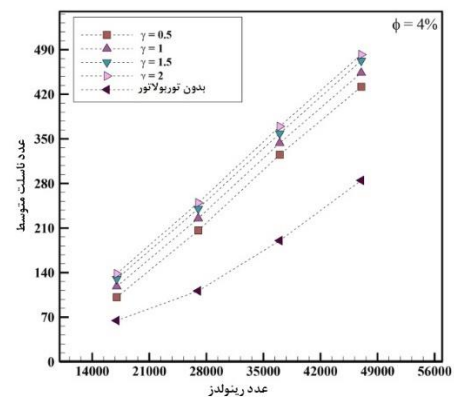
که در آن مقادیر Nu_{av} و $Nu_{av,0}$ به ناسلت اندازه‌گیری شده و ناسلت حالت مرجع و البته f و f_0 به فاکتور اصطکاک اندازه‌گیری شده و

است. طبق گزارش ارائه شده، استفاده از لوله مارپیچی در مقایسه با لوله ساده در جمع کننده خورشیدی، عدد ناسلت و افت فشار را به ترتیب به میزان $11/121\%$ و $52/309\%$ افزایش داده و باعث بهبود معیار PEC می‌شود.

برای ارزیابی عملکرد جمع کننده‌های خورشیدی باید بالانسی بین بهبود مشخصات حرارتی و انرژی مورد نیاز برای پمپاژ برقرار باشد [۶۹]. به این منظور شاخص معیار ارزیابی عملکرد (PEC) برای بررسی عملکرد مبدل حرارتی خورشیدی برای ارزیابی توسعه انتقال حرارت



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر در شکل توربولاتور مارپیچ در کسر حجمی الف) $\phi = 1\%$ و ب) $\phi = 4\%$ در مطالعه نقید و همکاران [۹۹]

واقعی در اکثر مطالعات پیشین که بر روی جمع کننده‌های خورشیدی با توربولاتور و با/بدون نانو سیال مطالعه کردند استفاده شده است. در عمل، این توان باکار لازم برای پمپاژ سیال (W_p) به توان سوم نرخ جریان حجمی (V^3) مرتبط است. برای حالت مرجع، این شاخص برابر با یک است. برای سایر موارد، این شاخص می‌تواند مقداری بیش از یک یا کمتر از آن داشته باشد. هنگامی که مقادیر بالاتر از یک داشته

این جدول ضمن بیان نوع جمع کننده و نوع توربولاتور استفاده شده، نوع و جنس نانو سیال نیز ذکر شده است. متغیرهای مورد بررسی، محدوده عدد رینولدز مورد مطالعه و نتایج حاصل از تحقیق نیز به طور خلاصه آورده شده است.

حالت مرجع برمی‌گردد. در این راستا بررسی‌های انجام شده پیرامون این شاخص با حضور توربولاتور و افزودن نانو سیال که توسط محقق ارائه شده است، در جدول (۱) قابل دستیابی است. در جدول (۲) مطالعاتی لیست شده‌اند که انواع توربولاتور همراه با نانو سیال را در لوله جاذب جمع کننده‌های خورشیدی در نظر گرفتند. در

جدول ۱: محدوده تغییرات شاخص عملکرد جمع کننده (PEC) با توربولاتور و نانو سیال

نویسندگان	نوع جمع کننده	نوع و شکل توربولاتور	نوع سیال کاری	پارامتر مورد بررسی و اثر آن بر مقدار شاخص PEC	محدوده تغییرات شاخص PEC
سعدالدین و همکاران [۶۹]۲۰۱۷	صفحه تخت	محیط متخلخل 	فوم فلزی مس به همراه آب به عنوان محیط متخلخل	نرخ جریان حجمی سیال (۲-۰/۵ لیتر بر دقیقه)	با افزایش نرخ جریان جرمی شاخص PEC کاهشی در محدوده ۰/۶-۰/۴
بلووس و همکاران [۳۲]۲۰۱۸	سه‌موی بشقابی	فین داخلی (۱، ۲، ۸ عدد) 	-	تغییر در تعداد و جانمایی فین‌ها در لوله	۱ فین: ۱/۰۸۴-۱ ۲ فین: ۱/۱۴۱-۱ چند فین: ۱/۳۱۷-۱ (ماکزیمم مقدار برای تعداد ۸ فین)
پنگ و همکاران [۳۶]۲۰۲۱	سه‌موی بشقابی	فین داخلی 	محیط متخلخل فوم فلزی	تغییر در سطح مقطع فین (مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای) با تغییر در اعداد رینولدز	روند کاهشی با افزایش عدد رینولدز محدوده تغییرات ۴/۷-۲/۵ افزایش PEC تا مقدار ۴/۷ با فین مثلثی شکل
الراشد و همکاران [۲۸]۲۰۲۱	سه‌موی بشقابی	فین ستاره‌ای داخلی 	نانو سیال هیبریدی (20%-80%) Oil-Al ₂ O ₃ -MWCNT	تغییرات در زاویه فین‌ها و قطر میله وسط تغییرات در مقدار پیچ فین با اعداد رینولدز مختلف	با افزایش متغیرهای زاویه فین و عدد رینولدز مقادیر PEC کاهشی محدوده تغییرات ۰/۷-۱/۳
آرانی و منفردی [۶]۲۰۲۳	سه‌موی بشقابی	دو لوله غیر هم‌مرکز 	نانو سیال Syltherm 800 oil/γ-AlOOH	تغییرات در زوایای قوس عایق، مقدار معرف خارج مرکز بودن دو لوله و کسر حجمی و قطر نانو سیال با اعداد رینولدز	با افزایش عدد رینولدز تغییرات PEC افزایشی در محدوده تغییرات بین ۵-۱ برای متغیرهای مختلف بیشترین تغییرات PEC با تغییر در قطر نانو ذرات اتفاق می‌افتد

		ایجاد فرورفتگی، برآمدگی و موج			
با افزایش رینولدز مقادیر کاهشی برای PEC در محدوده ۱-۱/۴۲	تغییر در شکل توربولاتورها در اعداد رینولدز مختلف	-	مارپیچ در لوله	سه‌موی بشقابی	هوآنگ و همکاران ۲۰۱۵ [۲۳]
روند کاهشی برای PEC در محدوده تغییرات ۰/۶ - ۲/۱	تغییر در شکل توربولاتور مارپیچ و تغییر در کسر حجمی نانو ذرات در اعداد رینولدز مختلف	نانو سیال هیبریدی $SiO_2 - MWCNT$	توربولاتورهای نواری پیچ‌خورده	سه‌موی بشقابی	مصطفی و همکاران ۲۰۲۲ [۸۷]
روند افزایشی برای PEC در محدوده ۰/۸ - ۰/۹۷	تغییر در کسر حجمی نانو ذرات و شکل توربولاتور با اعداد رینولدز مختلف	نانو سیال هیبریدی $Cu-Al_2O_3/Water$	توربولاتور مارپیچ جدید	سه‌موی بشقابی	القاعد و همکاران ۲۰۲۲ [۹۱]
روند کاهشی برای PEC در محدوده ۱/۳۵ - ۱/۴۵۵	تغییر در عدد هارتمن در اعداد رینولدز مختلف	نانو سیال هیبریدی $MgO-MWCNT /Therminol VP-1$	لوله‌های مارپیچ	صفحه تخت	الصراف و همکاران ۲۰۲۳ [۱۱۰]

جدول ۲: مروری بر مطالعات انجام‌شده بر روی لوله جاذب با توربولاتور و پرشده با نانو سیال

نویسندگان	نوع جمع‌کننده خورشیدی	نوع سیال مورد استفاده معمولی-نانوسیال	شکل توربولاتور	محدوده رینولدز مورد مطالعه	نتایج
سراسر و همکاران ۲۰۲۲ [۸۵]	صفحه تخت	نانو سیال $TiO_2/Water$	صفحه‌ای با مقطع مستطیلی	۱۳۰۰-۱۹۰۰	کاهش نرخ انتقال حرارت جمع‌کننده با استفاده از نانو سیال افزایش ۳۹٪ راندمان حرارتی با استفاده از توربولاتور و نانو سیال
نبی و همکاران ۲۰۲۲ [۹۸]	صفحه تخت	نانوسیال هیبریدی $CNTs/CuO$	مبلاه‌ای با مقطع مربعی به شکل فرورفتگی و برآمدگی در محیط دایره	۰-۲۰۰۰۰	افزایش ضریب انتقال حرارت به مقدار حداکثر ۹۹٪ افزایش ضریب اصطکاک به مقدار حداکثر ۱۲٪ نانو سیال هیبریدی باعث افزایش ۱۶٪/۵ بازده حرارتی شده
نقید و همکاران ۲۰۲۳ [۹۹]	صفحه تخت	نانو سیال هیبریدی مس-گرافن	پره‌ای مارپیچ نوآورانه	۱۴۰۰۰-۵۶۰۰۰	افزایش افت فشار به علت وجود توربولاتور، بهبود راندمان انرژی با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز به مقدار ۱۶٪

الصراف و همکاران ۲۰۲۳ [۱۱۰]	صفحه تخت	نانو سیال هیبریدی MgO-MWCNT /Therminol VP-1	مارپیچ ایجاد شده در لوله جاذب	۰-۲۰۰۰۰۰	بهبود عدد ناسلت به مقدار ۱۲۱٪، افزایش ضریب اصطکاک به مقدار ۳۱۰٪ به علت استفاده از لوله مارپیچ و بهبود راندمان انرژی و آگزرژی با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات
ژیانگ و همکاران ۲۰۱۹ [۸۱]	-	CuO/H ₂ O	توربولاتور پیچیده مرکب مارپیچ	۵۰۰۰،۱۵۰۰۰	کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز وجود توربولاتور باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی شده
الراشد و همکاران ۲۰۲۱ [۲۸]	سهموی بشقابی	نانو سیال هیبریدی MWCNT / Al ₂ O ₃	لوله میانی دایره‌ای همراه با فین ستاره‌ای	۰-۱۰۰۰۰۰	بهترین محدوده عدد رینولدز برای کاربرد توربولاتور معرفی شده و صرفه اقتصادی ۱۴٪ حاصله از آن
سمعی زاده و همکاران ۲۰۲۲ [۹۰]	پارابولیک بشقابی	نانو سیال هیبریدی Oil-Cu-Al ₂ O ₃	فین طولی با مقطع مستطیل در نیمه پایین لوله جاذب	5000-500000	بهبود ۱۲٪ در راندمان حرارتی و افزایش ۵٪ در ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز پایین مؤثرتر بودن ذرات مس سه برابر ذرات اکسید آلومینیوم
ساجید خان و همکاران ۲۰۲۰ [۱۱۱]	سهموی بشقابی	Al ₂ O ₃ /Water	فین طولی با مقطع مستطیل نوار پیچ خورده	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	بهبود راندمان جمع کننده و ضریب انتقال حرارت به ترتیب با توربولاتور پیچ خورده ۱۷۵٪ و ۲۳٪/۱۱۸ با توربولاتور طولی ۱۰٪/۴ و ۲۶٪/۱۰۳
بن عبد الرحمن و همکاران ۲۰۱۶ [۲۶]	سهموی بشقابی	نانو ذرات مختلف با سیال پایه DOWTHERM A شامل Cu،C، Al ₂ O ₃ ، Sic	فین طولی با مقاطع مختلف	۲۵۷۰۰-۲۵۷۰۰۰	بهبود عدد ناسلت نسبت به حالت بدون توربولاتور بین ۱/۳-۱/۸ برابر
محمد و همکاران [۸۰]	سهموی بشقابی	روغن سیلیکونی و نانولوله کربنی (Ag-SWCNT, Ag-MWCNT, Ag-MgO)	توربولاتور میله‌ای با مقطع مخروطی	۰-۱۰۰۰۰۰	بهبود راندمان حرارتی و راندمان آگزرژی تا ۱۱/۵٪ و ۱۸/۲٪ حداکثر کاهش نرخ تولید انترویی ۴۲٪/۷
شیخ‌الاسلامی و همکاران ۲۰۱۸ [۵۴]	صفحه تخت	CuO	توربولاتور مارپیچ	رینولدز بی‌بعد ۰/۵-۱/۵	افزایش عدد ناسلت با زیاد شدن مقدار نرخ اندازه عرضی و عدد رینولدز
مصطفی و همکاران	سهموی بشقابی	SiO ₂ - MWCNT	نواری مارپیچ	۵۰۰۰-۲۵۰۰۰	مقایسه عملکرد دو نوع توربولاتور و انتخاب بهترین نوع آن

۲۰۲۲					
[۸۶]					
القاعد و همکاران	سهموی بشقابی	نانو سیال هیبریدی	مارپیچ محوری	۶۰۰۰-۱۸۰۰۰	مقایسه عملکرد لوله با دو مارپیچ متفاوت در اعداد رینولدز مختلف و کسر حجمی‌های متفاوت نانو سیال حداکثر فاکتور عملکرد برابر ۰/۹۹
۲۰۲۲					
[۹۱]					
عظیمی و صفاریان	صفحه تخت	نانو سیال هیبریدی	لوله جاذب زیگزاگ	۸۰۰-۱۶۰۰	افزایش دبی سیال بالاتر باعث افزایش عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی و تولید آنتروپی اصطکاکی به ترتیب حدود ۳۳/۳۳٪، ۴۱٪ و ۸۱٪
۲۰۲۳					
[۸۹]					

۴- نتیجه‌گیری

یکی از راهکارهای پیشنهادشده توسط محققین بهبود راندمان جمع‌کننده‌های خورشیدی، استفاده از توربولاتورهای به‌منظور ایجاد اغتشاش و بهبود خصوصیات حرارتی آنها بوده است. همچنین استفاده از نانو سیال (مونو یا هیبریدی) بجای سیال پایه نیز در شرایط با و بدون توربولاتور در لوله‌های جاذب جمع‌کننده‌های خورشیدی توسط محققین بررسی شده بود. در پژوهش حاضر مروری بر مطالعات انجام‌شده در این دو حوزه با استفاده از نانو سیال هیبریدی در کنار توربولاتور ارائه شده است. اگرچه میزان ایجاد بهبود در خصوصیات عملکردی جمع‌کننده‌ها باوجود توربولاتور و استفاده از نانو سیال هیبریدی به عوامل متعددی چون نوع جمع‌کننده، محدوده دبی جرمی جریان سیال و عدد رینولدز موردبررسی، شکل توربولاتور، نوع نانو سیال و کسر حجمی آن و ... بستگی دارد، اما می‌توان نتایج کلی زیر را از پژوهش‌های پیشین استنباط نمود که در ذیل به آنها اشاره می‌گردد:

- در توربولاتورهای نوع اول که شامل ایجاد تغییراتی در ساختار لوله جاذب می‌باشد، ایجاد فرورفتگی نسبت به برآمدگی باعث بهبود بیشتری در ضرایب انتقال حرارت شده که عمق بیشتر، گام باریک‌تر و اعداد بیشتر در جهت محیطی در میزان بهبودها مؤثر بوده‌اند. از طرفی ایجاد امواج در سطح لوله با سطوح مقطع مختلف، نوع ذوزنقه‌ای نسبت به سایر اشکال بیشترین تأثیر را در بهبود راندمان حرارتی داشته است.
- در توربولاتورهای دسته دوم که قرار دادن یک افزونه داخل لوله جاذب می‌باشد، وجود باله‌ها و سایر تجهیزات مانند فوم فلزی حلقوی به شکل مجزا و توأم در نیمه تحتانی لوله جاذب اثر بیشتری بر بهبود

عملکرد لوله جاذب داشته است. همین‌طور هر چه تعداد فین‌ها بیشتر باشد، بهبود مؤثرتری در معیارهای عملکردی حرارتی و آگزژی و شاخص PEC حاصل می‌شود تا جایی که مقادیر بهبود برای PEC و راندمان آگزژی در حدود ۱۹/۷٪ و ۲۳۴/۷٪ گزارش شده است. همین‌طور کاهش در تولید آنتروپی نیز به میزان ۳۱۱/۷٪ نیز رسیده بود.

- در مقایسه بین توربولاتور سیم‌پیچ شکل یا نوار تابیده و پیچ‌خورده نقش سیم‌پیچ در ایجاد اغتشاش و بهبود معیارهای عملکردی جمع‌کننده بسیار مؤثرتر برآورد شده بود. میزان تأثیر افزونه‌های مارپیچ به مشخصات متعددی از جمله زاویه تاب خوردگی، نسبت پیچ و ... بستگی داشته که تغییرات آنها می‌تواند باعث بهبود عملکرد تا ۴۵/۰۴٪ و ۷۴/۴۲٪ شود. همچنین اعمال تغییرات هم‌زمان در حالات مختلف نوار پیچ‌خورده و نسبت عرض آن توانسته بود بهبودی تا ۱۶۹٪ را در عملکرد جمع‌کننده خورشیدی نسبت به حالت بدون توربولاتور ایجاد کند.

- در توربولاتورهای نوع سوراخ‌دار و محیط‌های متخلخل مشخصاتی چون فاصله و ابعاد صفحه سوراخ‌دار، تعداد سوراخ و تغییر در پارامترهای شکل محیط متخلخل نیز در مقدار تأثیر آنها بر عملکرد جمع‌کننده مؤثر بوده است. این تغییرات برای توربولاتور از نوع صفحه سوراخ‌دار با ۳ سوراخ تا ۱۱۵٪ و برای محیط متخلخل تا ۱۸/۵٪ در راندمان حرارتی گزارش شده بود.

- استفاده از نانو سیال در کنار توربولاتور باعث بهبود عملکرد جمع‌کننده خورشیدی می‌شود. علاوه بر آن جایگزینی نانو سیال هیبریدی نیز باعث بهبود مضاعفی در عملکرد خواهد شد؛ اما مشخصات متعددی

- [2] Yadegari, M. and M. Ghassemi, Investigation of the Effects of Temperature, Mass flow rate of the injected fuel, pore diameter, porosity and ambient pressure on the amount of pollutants in the combustion chamber. Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME, 2022. 23(1): p. 122-146.
- [3] Pal R. K. and Ravi Kumar K., Coupled Thermo-Structural analysis of absorber tube for direct steam generation in parabolic trough solar collector, Sol. Energy, 2023, 266: p. 112148.
- [4] Gong J. hu, Yang C., Wang J., and Lund P. D., Comparative study of optical and thermal model for a large-aperture parabolic trough concentrator with smaller diameter absorber tube bundle, Energy Reports, 2023, 9(S12): p. 435–443.
- [5] Anand S. and Kumar S., Optimization of gaseous working fluid and internally finned absorber tube for enhancing the thermal performance of parabolic trough solar collector, Appl. Therm. Eng., 2024, 239: p. 122078.
- [6] Abbasian A. A. and Monfaredi F., Insulator roof, acentric absorber tube and nanofluid effect on parabolic trough collector efficiency via two-phase flow simulation, J. Therm. Anal. Calorim., 2023, 148(22): p. 12481–12499.
- [7] Chen Z., Han X., and Ma Y., Performance analysis of a novel direct absorption parabolic trough solar collector with combined absorption using MCRT and FVM coupled method, Renew. Energy, 2023, 220: p. 119727.
- [8] Shyam A., Ahmed K. R. A., Christopher S. S., Iniyan S., Thermal performance enhancement in a solar parabolic trough collector with optimized secondary optics, Clean Technol. Environ. Policy, 2023, no. 0123456789, doi: 10.1007/s10098-023-02649-2.
- [9] Mahmoud MS, Abbas AS, Khudheyer AF., Solar parabolic trough collector tube heat transfer analysis with internal conical pin fins, J Green Eng 2020, 10: p.7422–36.
- [10] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis., Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in

چون غلظت نانو ذرات، نوع نانو سیال هیبریدی، نوع جمع کننده و شکل توربولاتور و ... همگی بر مقدار بهبود در شاخص‌های عملکردی جمع کننده مؤثر بوده‌اند.

• در جمع‌کننده‌های موردبررسی با توربولاتور و نانو سیال هیبریدی بیشترین بهبود در عملکرد راندمان حرارتی و راندمان انرژی جمع کننده به ترتیب ۲۹٪ و ۲۹/۳۲٪ گزارش شده بود. همین‌طور کاهش دوره بازپرداخت هزینه کربن تا ۳۶/۲٪ نیز کاهش داشته است.

۵- تقدیر و تشکر

مقاله پیش رو با حمایت و پشتیبانی دانشگاه زابل با گرنت شماره IR UOZ GR 5425 موردتحقیق و تحلیل قرار گرفته است.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
d	قطر، m
H	ارتفاع، m
P	طول یک پیچش، m
t	ضخامت، mm
Q_{loss}	گرمای اتلافی، W
T	دما، K
I_b	شدت تابش مستقیم طبیعی، W / m^2
L	طول، m
Re	عدد رینولدز
Nu	عدد ناسلت
Be	عدد بزان
Δp	افت فشار
f	ضریب اصطکاک
علائم یونانی	
β	زاویه عرضی، درجه
γ, α	نسبت پیچ
زیرنویس	
0	مرجع
av	متوسط
اختصارات	
Performance Evaluation Criteria	PEC
Semi-Annular and Fin shape Metal foam	SAFM
Semi-Annular Metal foam	SAM
Fin shape Metal foam	FM

۷- منابع

- [1] <https://www.data.irimo.ir/>

- collectors, *Int J Energy Research*, pp. 1-46, 2020
- [19] Akbarzade S., Valipour M.S., Heat transfer enhancement in parabolic trough collectors: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 92, pp. 198-218, 2018
- [20] Abdulhamed A.J., Adam N.M., Ab-Kadir M., Hairuddin A.A., Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 822-831, 2018
- [21] Zaboli M., Saedodin S., Mousavi Ajarostaghi S.S., Karimi N., Recent progress on flat plate solar collectors equipped with nanofluid and turbulator: state of the art, *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 109921-109954, 2023.
- [22] Reddy KS, Satyanarayana GV. Numerical study of porous finned receiver for solar parabolic trough concentrator. *Eng Appl Comput Fluid Mech*, 2008, 2: p.172–84.
- [23] Huang Z., Yu G.L., Li Z.Y., Tao W.Q., Numerical study on heat transfer enhancement in a receiver tube of parabolic trough solar collector with dimples, protrusions and helical fins, *Energy Procedia*, 2015, 69: p. 1306 – 1316.
- [24] Munoz J, Anades A., Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools. *Appl Energy*, 2011, 88: p.4139–49.
- [25] Zhao Z. , Bai F., Zhang X., Wang Z., Experimental study of pin finned receiver tubes for a parabolic trough solar air collector, *Sol. Energy*, 2020, 207(6): p. 91–102.
- [26] Benabderrahmane A., Aminallah M., Laouedj S., Benazza A., Solano J.P., Heat Transfer Enhancement in a Parabolic Trough Solar Receiver using Longitudinal Fins and Nanofluids, *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(5): p. 410–417.
- [27] Adel L., Ghazali M., Enhancing Thermal Performance of a Parabolic Trough Collector with Inserting Longitudinal Fins in the Down Half of the Receiver Tube, *Journal of Thermal Science*, 2021, 30(5): p. 545–552.
- [11] Yadegari, M. 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, *The European Physical Journal Plus*, 2020, 135(7): p. 548.
- [12] Yadegari, M. and A.B. Khoshnevis., Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems, *The European Physical Journal Plus*, 2020, 135(6): p. 534.
- [13] Yadegari, M., An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm, *The European Physical Journal Plus*, 2021, 136(10): p. 10-19.
- [14] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis., A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42: p. 1-15, 2020.
- [15] Haghghatjoo, H., M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis., Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel, *The European Physical Journal Plus*, 2022, 137(9): p. 1042.
- [16] Shahzad Nazir M., Shahsavar A., Afrand M., Arici M., Nizetic S., Ma Zh., Oztop H.F., A comprehensive review of parabolic trough solar collectors equipped with turbulators and numerical evaluation of hydrothermal performance of a novel model, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2020, 45: p. 101103.
- [17] Aissa A., Qasem N., Mourad A., Laidoudi H., Younis O., Guedri K., Alazzam A., A review of the enhancement of solar thermal collectors using nanofluids and turbulators, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 220, pp. 119663, 2023
- [18] Abed N., Afgan I., An extensive review of various technologies for enhancing the thermal and optical performances of parabolic trough

- [37] Zhou Y., Bu sinnah Z.A., Yasin Y., Salman N.A., Jaber A.S., Abdulkadhim A.H., AL-Khafaji M. O., Nasajpour-Esfahani N., Marashi M., Golzar A., Toghraie D., A twophase simulation for analyzing the hydraulic-thermal performance of Cu–Water nanofluid within a tube enhanced with W- and C-shaped ribs, *Case Studies Thermal Eng.*, 2023, 43: p.102794.
- [38] Xiangtao G, Fuqiang W, Haiyan W, Jianyu T, Qingzhi L, Huaizhi H. Heat transfer enhancement analysis of tube receiver for parabolic trough solar collector with pin fin arrays inserting. *Sol Energy* 2017, 144: p.185–202.
- [39] Izadi, M. Alshehri, H.M. Hosseinzadeh, F. Shokri Rad, M. Hamida, M. Bechir Ben, Numerical study on forced convection heat transfer of TiO₂/water nanofluid flow inside a double-pipe heat exchanger with spindle-shaped turbulators, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 150: p. 612–623.
- [40] Bellos E., Tzivanidis Ch., Investigation of a star flow insert in a parabolic trough solar collector, *Applied Energy*, 2018, 224: p. 86–102.
- [41] Vahidinia F., Evaluation of energy and exergy of a parabolic trough solar collector equipped with internal fin and star turbulator absorber tube, *Journal of Applied and Computing Sciences in Mechanics*, 2024, 36 (2): p. 1-17 (In Persian).
- [42] Allauddin U., Rafique M., Malik O., Rasid O., Waseem A., King P., Karim M., Almond H., Investigation of the Thermo-hydraulic performance of a roughened Parabolic trough collector, *Appl. Therm. Eng.*, 2023, 219: p. 119523.
- [43] Dovom A.R.M., Aghaei A., Joshaghani A.H., Dezfulizadeh A., kakavandi A.A., Hassani oshaghani A., Dezfulizadeh A., azadi kakavandi A., Numerical analysis of heating aerosol carbon nanofluid flow in a power plant recuperator with considering ash fouling: a deep learning approach, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2022, 141: p. 75–90.
- Science, 2020, <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1256-8>
- [28] Abdulwahab AA Rashed, Alsarraf AAJ. Thermo-hydraulic and economic performance of a parabolic trough solar collector equipped with finned rod turbulator and filled with oil-based hybrid nanofluid, *J Taiwan Inst Chem Eng*, 2021, 124: p.192–204.
- [29] Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D. Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Appl Energy* 2017, 205: p.540–61.
- [30] Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D. Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Sol Energy* 2017, 157: p.514–31.
- [31] Bellos E., Tzivanidis C., Enhancing the performance of a parabolic trough collector with combined thermal and optical techniques, *Appl. Therm. Eng.*, 2019, 164: p. 114496, 2020.
- [32] Bellos E., Tzivanidis C., Daniil I., Energetic and exergetic investigation of a parabolic trough collector with internal fins operating with carbon dioxide, *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 2017, 8(2): p. 109–122, doi: 10.1007/s40095-017-0229-5.
- [33] Bellos E., Tzivanidis C., Daniil I., Antonopoulos K. A., The impact of internal longitudinal fins in parabolic trough collectors operating with gases, *Energy Convers. Manag.*, 2017, 135: p. 35–54.
- [34] Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D., Optimum number of internal fins in parabolic trough collectors, *Appl. Therm. Eng.*, 2018, 137: p. 669–677.
- [35] Felipe AS, Dezan DJ, Pantaleao AV, Salviano LO. Longitudinal vortex generator applied to heat transfer enhancement of a flat plate solar water heater. *Appl Therm Eng*, 2019, 158: p.113790.
- [36] Peng H., Li M., Hu F., Feng S., Performance analysis of absorber tube in parabolic trough solar collector inserted with semi-annular and fin shape metal foam hybrid structure, *Case Stud. Therm. Eng.*, 2021, 26: p. 101112.

- [52] Ghasemi S.E., Hydrothermal analysis of turbulent fluid flow inside a novel enhanced circular tube for solar collector applications, *Waves Random Complex Media*, 2023, 33: p. 225–236.
- [53] Wang D., Ashraf Ali M., Sharma K., Fahad Almojil S., Alizadeh A., Fahmi Alali A., Ibrahim Almohana A., Multiphase numerical simulation of exergy loss and thermohydraulic behavior with environmental considerations of a hybrid nanofluid in a shell-and-tube heat exchanger with twisted tape, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 147: p. 1–10.
- [54] Sheikholeslami M., Jafaryar M., Li Z., Nanofluid turbulent convective flow in a circular duct with helical turbulators considering CuO nanoparticles, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2018, 124: p. 980–989.
- [55] Sheikholeslami M., Jafaryarab M., Li Z., Second law analysis for nanofluid turbulent flow inside a circular duct in presence of twisted tape turbulators, *J. Mol. Liquids*, 2018, 263: p. 489–500.
- [56] Sheikholeslami M., Farshad S.A., Investigation of solar collector system with turbulator considering hybrid nanoparticles. *Renew Energy*, 2021, 171: p. 1128–58
- [57] Farshad S.A., Sheikholeslami M., Numerical examination for entropy generation of turbulent nanomaterial flow using complex turbulator in a solar collector. *Physica A*, 2020, 550: p.123–951.
- [58] Kumar R, Chand P., Performance prediction of extended surface absorber solar air collector with twisted tape inserts. *Sol Energy* 2018, 169: p. 40–8.
- [59] Promvong P., Eiamsa-ard S., Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert, *Int. Commun. Heat Mass Tran.*, 2007, 34 (7), p. 849–859.
- [60] Zaboli M., Ajarostaghi S. S. M., Saedodin S., Pour M. S., Thermal performance enhancement using absorber tube with inner helical axial fins in a parabolic trough solar collector, *Appl. Sci.*, 2021, 11(16): p. 1-22.
- [44] Yadegari M and Bak Khoshnevis A 2021 Numerical and Experimental Study of Characteristics of the Wake Produced Behind an Elliptic Cylinder with Trip Wires. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering.*, 45(1): p.265-285.
- [45] Yadegari, M., A. Bak Khoshnevis, and M. Boloki, An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2023. 47(1): p. 67-80.
- [46] Mansouri, Z., M. Yadegari, and A. Bak 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. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023. 45(9): p. 459.
- [47] Bak Khoshnevis, A., M. Boloki, and M. Yadegari, The Investigation of the effect of the helical strakes' height on the cylindrical wake. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2020. 10(1): p. 223-236.
- [48] Sadeghi, M., Yadegari, M. & Khoshnevis, A.B. Numerical investigation of the flow characteristics around two sequential cylinders with circular and square cross-sections. *J Mar Sci Technol* 29, 2024, p.315–332.
- [49] Too YCS, Benito R. Enhancing heat transfer in air tubular absorbers for concentrated solar thermal applications. *Appl Therm Eng.*, 2013, 50: p.1076–83
- [50] García A, Herrero-Martin R, Solano JP, P´erez-García J. The role of insert devices on enhancing heat transfer in a flat-plate solar water collector. *Appl Therm Eng.*, 2018, 132: p.479–89.
- [51] Yılmaz İ. H., Mwesigye A., Göksu T. T., Enhancing the overall thermal performance of a large aperture parabolic trough solar collector using wire coil inserts, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2020, 39: p. 100696.

- numerical analysis. *Energy Convers Manag*, 2017, 153: p. 278–87.
- [70] Javaniyan Jouybari H, Saedodin S, Zamzamian A, Nimvari ME. Experimental investigation of thermal performance and entropy generation of a flat-plate solar collector filled with porous media. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, 127: p. 1506–17.
- [71] Armaghani T., Maghrebi M.J., Nazari M., The effects of fluid/nanoparticle and fluid/solid heat transfer parameters on forced displacement heat transfer of nanofluids in a porous channel: with the condition of thermal imbalance, *Journal of modeling in engineering*, 2016, 44 (In Persian).
- [72] Abdullatif Alshuhail L. , Shaik F., Syam Sundar L , Thermal efficiency enhancement of mono and hybrid nanofluids in solar thermal applications – A review, *Alexandria Eng. J.*, 2023, 68: p. 365–404.
- [73] Vahidinia F., Khorasani-Zade H., Aghaee A., Studying the thermal and hydrodynamic performance of a linear parabolic solar collector using hybrid nanofluid of MWCNTs/ Fe_2O_3 - Terminol VP, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 2022, 2: p. 82-95 (In Persian).
- [74] Ghanbari R., Heihat M.M., Experimental investigation of the effect of magnesium oxide hybrid nanofluid and multi-walled carbon nanotubes on increasing solar radiation energy absorption efficiency, *Amirkabir Mechanical Engineering Journal*, 2022, 54(5): p. 1101-1124, (In Persian).
- [75] Niknejadi M., Alizade A., Zekri H., Ruhani B., Nasajpour-esfahani N., Fadhil G., Engineering Analysis with Boundary Elements Numerical simulation of the thermal-hydraulic performance of solar collector equipped with vector generators filled with two-phase hybrid, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 151: p. 670-685.
- [76] Panja S. K., Das B., Mahesh V., Numerical study of parabolic trough solar collector ' s thermo-hydraulic performance using CuO and Al $2O_3$ nanofluids, *Appl. Therm. Eng.*, 2024, 248: p. 123-179.
- [61] Kursun B. Thermal performance assessment of internal longitudinal fins with sinusoidal lateral surfaces in parabolic trough receiver tubes. *Renew Energy* 2019, 140: p.816–27.
- [62] Jaramillo O. A., Borunda M., Velazquez-Lucho K. M., Robles M., Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: An analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts, *Renew. Energy*, 2016, 93: p. 125–141.
- [63] Mwesigye A., Bello-Ochende T., Meyer J. P., Heat transfer and entropy generation in a parabolic trough receiver with wall-detached twisted tape inserts, *Int. J. Therm. Sci.*, 2016, 99: p. 238–257, 2016.
- [64] Song X., Dong G., Gao F., Diao X., Zheng L., Zhou F., A numerical study of parabolic trough receiver with nonuniform heat flux and helical screw-tape inserts, *Energy*, 2014, 77: p. 771–782.
- [65] Fahim T., Laouedj S., Abderrahmane A., Driss Z., Tag-Eldin E.S.M., Guedri K., Younis O., Numerical study of perforated obstacles effects on the performance of solar parabolic trough collector, *Front. Chem.*, 2023, 10: p. 1–11.
- [66] Mwesigye A., Bello-Ochende T., Meyer J. P., Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts, *Appl. Energy*, 2014, 136: p. 989–1003.
- [67] Reddy KS, Ravi Kumar K, Satyanarayana GV. Numerical investigation of energy efficient receiver for solar parabolic trough concentrator. *Heat Transfer Eng.*, 2008, 29: p.961–72.
- [68] Dehghan M, Rahmani Y, Domiri Ganji D, Saedodin S, Valipour MS, Rashidi S. Convection-radiation heat transfer in solar heat exchangers filled with a porous medium: Homotopy perturbation method versus numerical analysis. *Renew Energy* 2015, 74: p.448–55.
- [69] Saedodin S, Zamzamian SAH, Nimvari ME, Wongwises S, Jouybari HJ. Performance evaluation of a flat-plate solar collector filled with porous metal foam: Experimental and

- [85] Sarasar M. B., Saedodin S., Rostamian S. H., Doostmohammadi M., Khaledi O., The effect of vortex generator insert and TiO₂/Water nanofluid on thermal efficiency and heat transfer of flat plate solar collector, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2022, 53: p. 102617.
- [86] Byiringiro J., Chaanaoui M., Halimi M., Heat transfer enhancement of a parabolic trough solar collector using innovative receiver configurations combined with a hybrid nanofluid: CFD analysis Performance Evaluation criterion, *Renew. Energy*, 2024, 233: p. 121169.
- [87] Mustafa J., Alqaed S., Aybar H., Husain S., Investigation of the effect of twisted tape turbulators on thermal-hydraulic behavior of parabolic solar collector with polymer hybrid nanofluid and exergy analysis using numerical method and ANN, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2022, 144: pp. 81–93.
- [88] Said Z., Sharma P., Syam Sundar L., Nguyen V. G., Tran V. D., Le V. V., Using Bayesian optimization and ensemble boosted regression trees for optimizing thermal performance of solar flat plate collector under thermosyphon condition employing MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2022, 53: p. 102708.
- [89] Azimy N., Saffarian M. R., Investigation of thermal characteristics and entropy generation in a solar collector including Fly Ash-Cu hybrid nanofluids: Numerical approach using mixture model, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 152: pp. 169–184.
- [90] Samiezadeh S., Khodaverdian R., Doranehgard M. H., Chehrmonavari H., Xiong Q., CFD simulation of thermal performance of hybrid oil-Cu-Al₂O₃ nanofluid flowing through the porous receiver tube inside a finned parabolic trough solar collector, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2021, 50: p. 101888.
- [91] Alqaed S., Mustafa J., Sharifpur M., Alharthi M. A., Numerical simulation and artificial neural network modeling of exergy and energy of parabolic trough solar collectors equipped
- [77] Pazarlioglu H.K., Ekiciler R., Arslan K., Mohammed N.A.M., Exergetic , Energetic , and entropy production evaluations of parabolic trough collector retrofitted with elliptical dimpled receiver tube filled with hybrid nanofluid, *Appl. Therm. Eng.*, 2023, 223: p. 120004.
- [78] Vahidinia F., Khorasanizadeh H., Aghaei A., Energy , exergy , economic and environmental evaluations of a finned absorber tube parabolic trough collector utilizing hybrid and mono nanofluids and comparison, *Renew. Energy*, 2023, 205: p. 185–199.
- [79] Karami M., Delfani Sh., Akhavan Bahabadi M.A., Experimental study of direct absorption solar collector performance using carbon nanotube nanofluid, *Iranian Energy Journal*, 1997, 21(2): p. 99-109, (In Persian).
- [80] Mohammed H.A., Vuthaluru H.B., Liu S., Heat transfer augmentation of parabolic trough solar collector receiver's tube using hybrid nanofluids and conical turbulators, *J Taiwan Inst Chem Eng.*, 2021, 125: p.215–42.
- [81] Xiong Q., Jafaryar M., Divsalar A., Sheikholeslami M., Shafee A., Dat D., Khan M. H., Tlili I., Lijk Z., Macroscopic simulation of nanofluid turbulent flow due to compound turbulator in a pipe, *Chem. Phys.*, 2019, 527: p. 110–475.
- [82] Dezfulizadeh A., Aghaei A., Sheikhzadeh G. A., Engineering Analysis with Boundary Elements Comprehensive 3E analyses of a parabolic trough collector equipped with an innovative combined twisted turbulator, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 150: p. 507–527.
- [83] Hosseini Esfahani A., Aliehyaei M., Hassani Joshaghani A., Najafizadeh M.M., Energy, exergy, economic and environmental analysis of parabolic trough collector containing hybrid nanofluid equipped with turbulator, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 150: p. 492–506.
- [84] Ajeena A. M., Farkas I., Víg P., Energy and exergy assessment of a flat plate solar thermal collector by examine silicon carbide nanofluid: An experimental study for sustainable energy, *Appl. Therm. Eng.*, 2024, 236: p. 121844.

- utilizing a two-phase model, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 156: p. 90–113.
- [100] Mustafa J., Alqaed S., Sharifpur M., Evaluation of energy efficiency, visualized energy, and production of environmental pollutants of a solar flat plate collector containing hybrid nanofluid, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 53: p. 102399.
- [101] Sheikhzade Gh.A., Aghaee A.R., Dezfouli-Zade A., Sepehri Rad M., Numerical investigation of turbulator effect on thermal-hydraulic performance of two-phase hybrid nanofluid inside constant temperature channel, *The 5th National Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, 2020, Tehran, (In Persian).
- [102] Sheikhzade Gh.A., Asgarian M.S., Aghaee A.R., Numerical simulation of geothermal heat exchanger equipped with turbulator containing two-phase hybrid nanofluid, *Journal of Energy, Engineering and Management*, 2024, 14(2), (In Persian).
- [103] Asgarian M.S., Sheikhzade Gh.A., Aghaee A.R., Investigating the effects of turbulator and vortex generator in geothermal heat exchanger containing two-phase hybrid nanofluid, *The 31st annual international conference of mechanical engineering of Iran and the 9th conference of Iran's power plant industry*, 2023, (In Persian).
- [104] Hosseini A., Ehyaei M.A., Hassani Joshaghani A., Najafi-Zade M.M., Economic, Exergy, and Environmental Analyses of Parabolic Trough Solar Collector with Turbulator Containing Polymer Hybrid Nanofluid, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 2023, 12(4): p. 80-99, (In Persian).
- [105] Rahmati A. R., Chitsazi F., Reiszadeh M., Evaluation of Performance of both Spiral and Direct Tube Heat Exchanger Using the Hybrid Nano fluid, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2020, 10(1): p. 193-207, (In Persian).
- with innovative turbulators containing hybrid nanofluids, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2023, 148(16): p. 8611–8626.
- [92] Amar M., Akram N., Chaudhary G.Q., Kazi S. N., M. Soudagar M.E., Mubarak N.M., Kalam M.A, Energy, exergy and economic (3E) analysis of flat-plate solar collector using novel environmental friendly nanofluid, *Sci. Rep.*, 2023, 13(1), p. 1–21, 2023.
- [93] Verma S. K., Tiwari A. K., Chauhan D. S., Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids, *Energy Convers. Manag.*, 2017, 134:p. 103–115, 2017.
- [94] Henein S. M., Abdel-Rehim A. A., El-Nagar K., Energy, economic and environmental analysis of an evacuated tube solar collector using hybrid nanofluid, *Appl. Therm. Eng.*, 2023, 219: p. 119671.
- [95] Hussein O. A., Habib K., Muhsan A. S., Saidur R., Alawi O. A., Ibrahim T. K., Thermal performance enhancement of a flat plate solar collector using hybrid nanofluid, *Sol. Energy*, 2020, 204: p. 208–222.
- [96] Elshazly E., Abdel-Rehim A. A., El-Mahallawi I., 4E study of experimental thermal performance enhancement of flat plate solar collectors using MWCNT, Al₂O₃, and hybrid MWCNT/ Al₂O₃ nanofluids, *Results Eng.*, 2022, 16: p. 100723.
- [97] Said Z., Sharma P., Sundar L.S., Nguyen V.G., Tran V.D., Le V.V., Improving the thermal efficiency of a solar flat plate collector using MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids and ensemble machine learning, *Case Stud. Therm. Eng.*, 2022, 40: p. 102448.
- [98] Nabi H., Pourfallah M., Gholinia M., Jahanian O., Increasing heat transfer in flat plate solar collectors using various forms of turbulence-inducing elements and CNTs-CuO hybrid nanofluids, *Case Stud. Therm. Eng.*, 2022, 33: p. 101909.
- [99] Negeed E. S. R., Alhazmy M., Bokhary A. Y. F., Abulkhair H., Almas M. A., Hedia H. S., Numerical simulation of flat plate solar collector equipped with a turbulator containing water/copper-graphene hybrid nanofluid

-
- [108] Farshad S.A., Sheikholeslami M., Numerical modeling of increasing thermal efficiency of nanofluid in flat plate solar collector equipped with twist strip, *Journal of Modelling in Engineering*, 1999, 17(57): p. 295-313, (In Persian).
- [109] Esfahani A.H., Alihyaei M., Hassani Joshaghani A., Najafizadeh M.M., Economic, Exergy, and Environmental Analyses of Parabolic Trough Solar Collector with Turbulator Containing Polymer Hybrid Nanofluid, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 2023, 12(4): p. 80-99.
- [106] Jameati M., Pour Mohammadian H., The effect of using two crossed irradiated strips in order to enhance the reception of radiant energy in a linear parabolic solar collector, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, 2020, 11(4): p. 1-10, (In Persian).
- [107] Jameati M., Pour Mohammadian H., Improving the performance of two-fluid convoluted torsional heat exchanger containing hybrid nanofluids, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, 2020, 11(4): p. 1-10, (In Persian).



Effect of Elliptical Cylinder Arrangement on Turbulent Flow and Heat Transfer in Horizontal Channels

Diyar Azizi¹, Mehrdad Malekzadeh*², Ramin Ghasemi Asl³

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, the turbulent flow behavior in a horizontal channel containing elliptical cylinders with aspect ratio 0.45 and 0.5 and Reynolds number 5000 has been studied. Also, by using the finite element method to solve heat and fluid equations, the effect of parameters such as heat transfer rate, Nusselt number, temperature distribution and velocity distribution on fluid flow has been investigated. The results of this study show that the presence of cylinders increases the vortices and changes the flow patterns from symmetrical to asymmetrical. Also, as the Reynolds number increases, the flow becomes increasingly turbulent and the rotating mechanics of the cylinders contribute to a different distribution of temperature and velocity. In the investigation of the flow around elliptical cylinders, it has been observed that the temperature maximum point occurs between the third and fourth cylinders in the case of constant properties and behind the fifth cylinder in the case of variable properties. Also, the fluid velocity has a greater effect on the heat transfer rate than the heat exchange surface. Reducing the aspect ratio leads to a decrease in the amount of heat transfer in the turbulent flow, and the temperature contours in this flow are more uniform, which is due to the mixing and transverse vibrations of the turbulent flow. These findings can help to improve the design of heat transfer and flow control systems in engineering applications.

Keywords

Circular Cylinders
Elliptical Cylinders
Fluid Heat Flow
Steady and Transient Flow
Vortex

Received: 09.03.2024

Revised: 10.20.2024

Accepted: 10.26.2024

*Corresponding Author

Mehrdad Malekzadeh

Email

hamed.kavosh@gmail.com

1- Introduction

The results and discussions section provides a comprehensive analysis of the simulation outcomes. It is noteworthy that non-dimensional time is employed in this study to standardize results and facilitate direct comparison between different conditions. By non-dimensional time, the effects of time and velocity measurement units are neutralized, making the simulation results comparable. Time is defined as a non-dimensional variable using the equation where t represents real-time in seconds, U_{∞} is the free-stream velocity in m/s, and L is the channel length in meters. The selected time intervals range uniformly from $t=0$ to $t=1$ second, chosen to effectively capture the dynamic temperature changes and the effects of

elliptical cylinder arrangement on turbulent flow and heat transfer within the channel.

According to the findings, the highest temperature point under constant properties was found between the third and fourth cylinders, whereas variable property considerations indicated this peak occurring behind the fifth cylinder. It was observed that the fluid velocity exerted a more profound impact on the heat transfer rates compared to the heat exchange surface area. A notable decrease in the aspect ratio resulted in an overall reduction of heat transfer significantly within the turbulent regime; however, the temperature contour displayed a more uniform distribution due to the mixing and



crossflow oscillations prevalent in turbulent flows. The analysis of the results yielded from simulations demonstrated that the configuration of the elliptical cylinders considerably influenced the characteristics of turbulent flow and heat transfer efficiency within the horizontal channels. Notably, the aligned arrangement of cylinders led to increased interactions and mixing, resulting in the highest heat transfer coefficients. In contrast, more arbitrary arrange bearings exhibited lower thermal performance, underpinning the critical role of geometric configuration within turbulence.

2- The problem study

In the turbulent flow scenario with an aspect ratio of 0.5, dynamics showcased significant variations. A Reynolds number set at 5000 established a state of fully turbulent flow, prompting an examination of how the arrangement of elliptical cylinders impacted the formation of vortices, lift coefficients, local and mean Nusselt numbers, as well as temperature and velocity distributions over time. The simulation yielded distinct velocity contour variations reflecting a non-symmetrical flow due to the dominance of inertial forces over viscous forces, thereby fostering the occurrence of flow separation. The velocity contour results indicated the highest velocity beneath the fifth cylinder, marked by increased vortex formation, which correlates with the dynamic increase in fluid speed and the diminishing influence of viscous forces leading to flow separation. This distribution revealed a stark contrast behind the cylinders where velocity significantly decreased, attributed to the pressure drops and drag forces generated.

3- Result

The findings further emphatically illustrated that, as the Reynolds number rose, the flow transitioned from a temporarily symmetrical state to an unsteady and asymmetric behavior behind the cylinders. Notably, low Reynolds numbers yielded symmetrical vortex formations, but as values increased, vortices transitioned into a turbulent chaotic state. Furthermore, the interactions due to cylinder rotations and increased spacing resulted in diminished fluid speeds in certain regions,

particularly between the fourth and fifth cylinders, with a minimal overall impact on heat transfer rates, as the reductions in speed were not sufficiently substantial to alter thermal dynamics significantly. In contrast, when assessing turbulent flow within a channel using an aspect ratio of 0.45, a comparative examination concerning heat transfer parameters—such as temperature distribution, Nusselt numbers (local and averaged), and fluid velocity distribution—was executed. Although the Reynolds number remained fixed at 5000, outcomes indicated that increasing this dimensionless number mitigated some aspect ratio influences. In broad strokes, parameters such as speed, temperature distribution, and Nusselt numbers were diminished compared to the 0.5 aspect scenario, revealing that the rotary motions of the cylinders adversely influenced the flow dynamics behind subsequent cylinders.

Evidently, the investigation into the turbulent flow indicated that increased velocity engendered flow separation over the cylinder clusters, leading to the formation of larger vortices. However, cylinder rotations and spacing inversely correlated with flow speed, resulting in smaller vortices and reduced turbulence, thereby lessening heat transfer rates due to diminished momentum exchange across fluid layers. The aspect ratio of 0.45 emerged as a geometric parameter significantly shaping flow patterns and vortex formations. The temperature distribution in a turbulent regime also demonstrated elevated heat transfer rates compared to steady-state conditions. However, this was less pronounced when set against the 0.5 aspect ratio scenario, showcasing how the flow behind cylinders was influenced adversely by the lower aspect ratios considered. In summary, changes in the aspect ratios meticulously affected flow fields and thermal dynamics, paving the path for optimization in the design of cooling channels and heat exchanger systems. The findings indicate that the interplay between geometric shapes, arrangements, and flow conditions are pivotal in determining heat transfer efficiency across engineering applications, underscoring the importance of optimizing aspect ratios for enhanced thermal performance. Thus, investigation of turbulent flows around elliptical

cylinders in a controlled environment delineates critical insights underlying the importance of geometry in fluid dynamics and heat transfer evaluations. The cascading effects of aspect ratios and Reynolds number influence significantly necessitate further studies aimed at comprehensive understanding and application in engineering designs. The overall revelations from the present study contribute invaluable knowledge to the ongoing efforts in optimizing thermal systems, ultimately enhancing the functionality and efficiency in various practical settings across industrial domains.

4- References

- [1] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis, Numerical and experimental study of characteristics of the wake produced behind an elliptic cylinder with trip wires. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2021. 45: p. 265-285.
- [2] Yadegari, M., A. Bak Khoshnevis, and M. Boloki, An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2023. 47(1): p. 67-80.
- [3] Sadeghi, M., M. Yadegari, and A.B. Khoshnevis, Numerical investigation of the flow characteristics around two sequential cylinders with circular and square cross-sections. *Journal of Marine Science and Technology*, 2024: p. 1-18.
- [4] Mansouri, Z., M. Yadegari, and A. Bak 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. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023. 45(9): p. 459.
- [5] Aslan, E., et al., Numerical and experimental investigation of tube bundle heat exchanger arrangement effect on heat transfer performance in turbulent flows. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 2023. 43(2): p. 175-190.
- [6] Brodnianská, Z. and S. Kotšmíd, Heat transfer enhancement in the novel wavy shaped heat exchanger channel with cylindrical vortex generators. *Applied Thermal Engineering*, 2023. 220: p. 119720.



تأثیر چیدمان سیلندر بیضوی بر جریان آشفته و انتقال حرارت در کانال های افقی

دیار عزیزی^۱، مهرداد ملک زاده^{۲*}، رامین قاسمی اصل^۳

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران.

چکیده

کلمات کلیدی

سیلندره‌های بیضوی
جریان حرارت و سیالات
جریان آشفته
گردابه
ضریب منظر

در این مطالعه، رفتار جریان آشفته در یک کانال افقی حاوی سیلندره‌های بیضوی با ضریب منظر ۰.۴۵ و ۰.۵ و عدد رینولدز ۵۰۰۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین، با استفاده از روش اجزا محدود برای حل معادلات حرارت و سیالات، تأثیر پارامترهایی مانند میزان انتقال حرارت، عدد ناسلت، توزیع دما و توزیع سرعت بر جریان سیال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که حضور سیلندرها باعث افزایش گردابه‌ها و تغییر الگوهای جریان از متقارن به نامتقارن می‌شود. همچنین، با افزایش عدد رینولدز، جریان به‌طور فزاینده‌ای آشفته شده و مکانیک چرخشی سیلندرها به توزیع متفاوت دما و سرعت کمک می‌کند. در بررسی جریان حول سیلندره‌های بیضوی، مشاهده شده است که نقطه ماکزیمم دمای در حالت خواص ثابت بین سیلندر سوم و چهارم و در حالت خواص متغیر پشت سیلندر پنجم رخ می‌دهد. همچنین، سرعت سیال تأثیر بیشتری بر میزان انتقال حرارت نسبت به سطح تبادل حرارتی دارد. کاهش ضریب منظر منجر به کاهش میزان انتقال حرارت در جریان مغشوش می‌شود و کانتورهای دما در این جریان یکنواخت‌تر هستند که به علت اختلاط و ارتعاشات عرضی جریان آشفته است. این یافته‌ها می‌توانند به بهبود طراحی سیستم‌های انتقال حرارت و کنترل جریان در کاربردهای مهندسی کمک کنند.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

*نویسنده مسئول

مهرداد ملک زاده

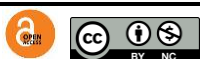
ایمیل

hamed.kavosh@gmail.com

۱- مقدمه

انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، نگ و همکاران [۱۱] جریان آرام جابجایی آزاد دو سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در یک سیلندر بیضوی ایزوترمال افقی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین از قانون ویسکوزیته بهبودیافته برای تعیین خواص سیال غیر نیوتنی استفاده کردند. پارامترهای مورد بررسی در کارشان شامل ضرایب اصطکاک محلی و نرخ انتقال حرارت از سطح سیلندر (عدد ناسلت محلی) به‌عنوان تابعی از زاویه سیلندر بیضوی با ضریب منظرهای مختلف بوده است. ضرایب اصطکاک محلی برای سیال غیر نیوتنی بیشتر از سیال نیوتنی گزارش شده است. همچنین، مقدار انتقال حرارت کل برای سیلندر بیضوی با موقعیت ضعیف‌تر بیشتر از حالت ضخیم بوده است. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که رفتار نازک شدن برشی متفاوت به‌طور قابل توجهی بر الگوهای جریان و توزیع دما تأثیر می‌گذارد و منجر به بهبود عملکرد حرارتی در کاربردهای عملی می‌شود. در یک مطالعه

انتقال حرارت در جریان سیال یک جنبه ضروری مدیریت حرارتی در سیستم‌های مهندسی است [۳-۱۱]. پیکربندی هندسی اجسام، مانند سیلندرها، نقشی محوری در تأثیرگذاری بر الگوهای جریان، ضرایب انتقال حرارت و عملکرد کلی حرارتی ایفا می‌کند [۶-۴]. درحالی‌که سیلندره‌های دایروی به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند، سیلندره‌های بیضوی نسبت ابعاد منحصر به فردی را ارائه می‌دهند که می‌تواند دینامیک جریان و ویژگی‌های انتقال حرارت متفاوتی را ارائه دهد [۷]. مطالعات قبلی [۹-۷] نشان داده‌اند که شکل و آرایش سیلندرها به‌طور قابل توجهی بر دینامیک جریان تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، سیلندره‌های دایروی به‌طور گسترده در تجزیه و تحلیل شرایط جریان آرام و آشفته استفاده شده است [۱۰]. مقایسه نشان می‌دهد که سیلندره‌های بیضوی رفتارهای جدایش جریان و تشکیل گردابه‌ها را بهبود می‌دهند که به نوبه خود بر نرخ



شگفت‌آوری خوب بود. رجانی و همکاران [۱۸] همچنین از روش گردابه‌های بزرگ همراه با مدل دینامیکی مقیاس زیر شبکه برای مطالعه پیچیدگی ساختار جریان سه‌بعدی در اطراف سیلندر مدور استفاده کردند. مشخص شد که نتایج مدل دینامیکی مقیاس زیر شبکه به‌طور کلی با آزمایش‌ها مطابقت دارد. با این حال، پیش‌بینی‌ها در ناحیه گردابه‌های دور، به‌ویژه برای پیش‌بینی‌های سرعت جریان، دقت کمتری داشتند. همچنین مشخص شد که استفاده از مدل دینامیکی مقیاس زیر شبکه منجر به تطابق بهتر با داده‌های اندازه‌گیری شده از ادبیات قبلی برای کمیت‌های میانگین و کمیت‌های نوسانات است، اما تفاوت در مقایسه با نتایج با استفاده از مدل استاندارد اسمانگورینسکی ناچیز بود. این نشان می‌دهد که استفاده از یک مدل مقیاس زیر شبکه دینامیکی سودمند نیست. با این حال، در عمل، از آنجایی که پیش‌بینی‌ها به‌شدت به ثابت اسمانگورینسکی وابسته هستند و این برای مسائل مختلف جریان تغییر می‌کند، مدل دینامیکی اسمانگورینسکی که به‌طور خودکار ثابت معادله را تنظیم می‌کند، هنوز مزایای مشخصی دارد.

اصلان و همکاران [۱۹] به بررسی عددی و تجربی تأثیر آرایش مبدل حرارتی دسته‌ای لوله بر عملکرد انتقال حرارت در جریان‌های آشفته پرداختند. در مطالعه آن‌ها از روش حجم محدود برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. آن‌ها همچنین از ضرایب نسبت برای کاهش زمان محاسبات استفاده کردند. در مطالعه آن‌ها عدد رینولدز از ۹۸۹ به ۶۳۵۲ تغییر یافته است، در حالی که عدد پراوندتل ۰.۷۰ باقی‌مانده است. آن‌ها گزارش کردند که مقادیر ناسلت و ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز در تمام پیکربندی‌های هندسی افزایش می‌یابند. طبق نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه آن‌ها، با کاهش فاصله بین ردیف‌ها، عدد ناسلت و افت فشار به ترتیب اثرات منفی و مثبت را تجربه می‌کنند. برودنیانسکا و همکاران [۲۰] به بررسی افزایش انتقال حرارت در کانال مبدل حرارتی موج‌دار با مولدهای گردابه استوانه‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که قرار دادن مولدهای گردابه استوانه‌ای در کانال‌های مورد بررسی برای دستیابی به انتقال حرارت کارآمدتر و در نتیجه کاهش مصرف انرژی مؤثر بوده است. کونیجی و همکاران [۲۱] به تجزیه و تحلیل با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی جهت بررسی انتقال حرارت توسط همرفت آزاد بر روی یک استوانه عمودی با پره‌های دایروی با مقطع مثلثی پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که نرخ انتقال حرارت از آرایه باله‌ها در هر دو رژیم آرام و آشفته با مقادیر بالاتر نسبت قطر باله‌های

مشابه، سئو و همکاران [۱۲] اثر اندازه سیلندر بیضوی بر میزان انتقال حرارت در یک کانال مستطیلی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها از روش شرط مرزی غرق‌شده برای تعیین مرز دیوار سیلندر در روش حجم محدود استفاده کردند. محدوده عدد رینولدز آن‌ها بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ بوده است. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار انتقال حرارت وابسته به شعاع سیلندر بیضوی است. یافته‌های آن‌ها تأیید کرد که پیکربندی هندسی به‌طور قابل‌توجهی بر راندمان انتقال حرارت همرفتی تأثیر می‌گذارد. ویجی و همکاران [۱۳] ارتعاش عرضی ناشی از جریان بر روی یک سیلندر بیضوی با ضریب منظرهای مختلف را بررسی کردند. سیلندر مورد مطالعه آن‌ها به یک ارتعاش در جهت جریان سیال محدود شده بود و عدد رینولدز را ثابت و برابر با ۱۰۰ در نظر گرفتند. ضریب منظر در کار آن‌ها از ۰.۱ تا ۱ متغیر بود. نتایج آن‌ها نشان داد که پاسخ‌گویی سیلندر بیضوی با ضریب منظر ۰.۱ تقریباً دو برابر مدل مشابه با سیلندر دایروی بوده است. آن‌ها گزارش کردند که افزایش نسبت سطح سیلندر بیضوی به‌طور کلی باعث ایجاد ارتعاشات و گردابه‌های بزرگ‌تر می‌شود. اونگ و همکاران [۱۴] جریان‌های عدد رینولدز بالا را در رژیم‌های اعداد رینولدز فوق بحرانی بر روی یک سیلندر دایروی با استفاده از مدل ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز ناپایدار بررسی کردند. تمرکز این مطالعه ارزیابی این موضوع بود که آیا مدل برای طراحی تحت این شرایط جریان قابل‌استفاده است یا خیر. طبق نتایج آنها مشخص شد که مدل آنها به دلیل ناهمسانگردی تلاطم در چنین جریان‌هایی، خطاهایی را ایجاد می‌کند. کراوچنکو و معین [۱۵] از مدل‌های شبیه‌سازی گردابی بزرگ بر اساس (۱) یک مدل دینامیکی در مقیاس زیر شبکه (۲) یک مدل استاندارد اسمانگورینسکی و (۳) بدون استفاده از یک مدل دینامیکی در مقیاس زیر شبکه استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که پیش‌بینی پارامترهای کلیدی جریان با مطالعات قبلی با استفاده از مدل دینامیکی در مقیاس زیر شبکه در مقایسه با بقیه مدل‌ها مطابقت بهتری داشته است، اگرچه تأثیر مدل بر روی بهبود نتایج چندان چشمگیر نبوده است. پارک و همکاران [۱۶] همچنین از مدل دینامیکی برای محفظه سیلندر دایروی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که در مقایسه با مدل اسمانگورینسکی بهتر عمل می‌کند، اما تفاوت‌ها معنی‌دار نبودند. پانوندو و همکاران [۱۷] از روش گردابه‌های بزرگ با شبکه‌های ظریف برای پیش‌بینی جریان در اطراف یک سیلندر دایروی استفاده کردند و پیش‌بینی‌های خود را با نتایج تجربی که آن‌ها نیز به دست آورده بودند مقایسه کردند. در واقع، تطابق با سرعت آزمایشی و پروفیل‌های مؤلفه تنش رینولدز به‌طور

چیدمان‌های مختلف سیلندره‌های بیضوی بر جریان مغشوش و انتقال حرارت پرداخته است. نتایج این مطالعه در بهینه‌سازی طراحی مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های خنک‌کننده صنعتی که از کانال‌های افقی استفاده می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- بیان مسئله

هندسه مورد مطالعه در این مقاله شامل یک کانال دوبعدی مستطیلی شکل است که در داخل آن سیلندره‌های بیضوی شکل قرار داده شده‌اند. در این مطالعه، کانال به صورت افقی و مشتمل بر ۵ عدد سیلندر بیضوی می‌باشد. کانال دارای طول ۲۳ واحد بوده و از مختصات ۱۲- در دهنه ورودی شروع شده و تا مختصات ۱۱+ در دهنه خروجی پایان می‌پذیرد. سیلندره‌های بیضوی در نیمه اول سمت چپ کانال قرار گرفته و مراکز آن‌ها از مختصات افقی $y=0$ کانال عبور می‌کند. کل عرض کانال نیز ۴ واحد بوده که سیلندرها در مرکز این عرض واقع شده‌اند. سیلندر اول به فاصله ۱/۵ واحد از دهنه ورودی قرار گرفته و فاصله مراکز سیلندرها از یکدیگر مساوی و برابر ۲ واحد می‌باشد. زاویه چرخش هر سیلندر نیز نسبت به سیلندر قبلی ۲۲/۵ درجه بوده که برای سیلندر اول زاویه صفر و برای سیلندر پنجم ۹۰ درجه می‌باشد. سیلندره‌های بیضوی دارای اندازه‌هایی برابر بوده، به گونه‌ای که قطر بزرگ سیلندر ۱/۴ واحد و قطر کوچک سیلندر ۰/۷ می‌باشد. مشخصات فیزیکی و مختصات طولی و عرضی مسئله دسته سیلندره‌های بیضوی در کانال افقی در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین مشخصات فیزیکی و مختصات طولی و عرضی مسئله نیز در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مختصات طولی و عرضی مسئله

علائم	عنوان	اندازه
a	قطر کوچک سیلندر بیضوی (cm)	۰/۷
b	قطر بزرگ سیلندر بیضوی (cm)	۱/۴
c	عرض دهنه ورودی (cm)	۴
d	طول کانال (cm)	۲۳
e	فاصله دهنه ورودی از اولین سیلندر بیضوی (cm)	۱/۵
f	فاصله ابتدای سیلندر بیضوی از لبه پایینی کانال (cm)	۲
g	فاصله دو سیلندر بیضوی از یکدیگر (cm)	۲

بی‌بعد و فواصل بی‌بعد آن‌ها افزایش می‌یابد. علی و همکاران [۲۲] به مطالعه اتلاف گرما و جریان سیال در چاه حرارتی مجهز به باله‌های نیمه بیضوی پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که استفاده از باله‌های نیمه بیضوی منجر به بهبود قابل توجهی در انتقال حرارت می‌شود. راندمان به دست آمده در مطالعه آن‌ها در مقایسه با چاه‌های حرارتی معمول، به دلیل افزایش سطح همرفتی و آشفتگی جریان بهبود یافته است.

بهارا و همکاران [۲۳] در مطالعه خود به بررسی انتقال دنباله بر روی یک سیلندر دایروی شکل پرداختند. در مطالعه آن‌ها از یک رویکرد عددی المان محدود تثبیت شده استفاده شده است. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که انتقال به جریان سه‌بعدی از طریق بی‌ثباتی حالت A در عدد رینولدز ۲۰۰ رخ می‌دهد که در ابتدا با ساختارهای حالت A پایدار مشخص می‌شود که بعداً به دلیل ظهور نایجایی‌های گردابی که دوره تناوب گسترده‌ای را مختل می‌کنند، بدتر می‌شوند. جریان این نایجایی‌ها که به صورت دوره‌ای ظاهر می‌شوند و ناپدید می‌شوند، با نوسانات فرکانس ریزش گردابه همراه هستند و منجر به ضرایب آیرودینامیکی پایین‌تر، از جمله تغییرات درگ و لیفت می‌شوند. مطالعه آن‌ها همچنین نشان داد که این ساختارها منجر به کاهش شدید فرکانس اساسی و مدولاسیون دامنه می‌شود. سلیمی پور و همکاران [۲۴] در مطالعه‌ای به بررسی جریان سیال و ویژگی‌های انتقال حرارت یک سیلندر بیضوی افقی تحت اثر شناوری حرارتی پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که عایق‌بندی قسمت زیرین سیلندر عملکرد آیرودینامیکی را بهبود می‌بخشد در حالی که مصرف انرژی حرارتی را در مقایسه با یک سیلندر کاملاً هم‌دمای کاهش می‌دهد. یافته‌های مطالعات دیگر نشان داد که با افزایش زاویه حمله، ضریب درگ افزایش می‌یابد. مطالعات مشابه دیگری نیز در این زمینه انجام شده است که نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند [۲۷-۲۵].

باین‌حال، عدد ریچاردسون تأثیر کمی بر ضریب درگ داشت. مطالعات موجود عمدتاً بر روی هندسه‌های دایروی یا معمولی متمرکز شده‌اند و اثرات خاص چیدمان سیلندره‌های بیضوی بر جریان مغشوش و انتقال حرارت در کانال‌های افقی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه باهدف پر کردن این خلأ علمی، به بررسی دقیق تأثیرات چیدمان‌های مختلف سیلندره‌های بیضوی بر رفتار جریان مغشوش و انتقال حرارت می‌پردازد. در این مطالعه، رفتار گردابه‌ها و تغییر الگوهای جریان از حالت متقارن به نامتقارن به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش با تحلیل دقیق تغییرات در ساختارهای گردابه‌ای و الگوهای جریان، به درک بهتر از چگونگی تأثیر

تنظیم شده است تا جریان آزادانه خارج شود. برای دیواره‌های کانال شرط مرزی عدم لغزش با دمای ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین، برای سطوح سیلندره‌های بیضوی شرط مرزی عدم لغزش با شرط دمای آدیاباتیک در نظر گرفته شده است تا گرادیان سرعت در مرزهای جامد را به‌طور دقیق نشان دهد.

۳- معادلات حاکم

به‌طور کل، معادلات حاکم بر جریان سیال بر روی دسته سیلندرها توسط معادلات دیفرانسیل جزئی که از قوانین بقای جرم و ممنتوم (ناویر-استوکس) استخراج شده‌اند تعیین می‌شوند. برای جریان پایا، لزج و تراکم ناپذیر، معادلات ممنتوم و پیوستگی برای به دست آوردن میدان سرعت و توزیع فشار در محدوده موردنظر با توجه به شرایط مرزی مناسب حل می‌شوند. از آنجایی که در این مقاله کانال موردنظر دوبعدی در نظر گرفته شده است، معادلات مربوطه در حالت دوبعدی استفاده می‌شود [۲۸].

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله ممنتوم در جهت X:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

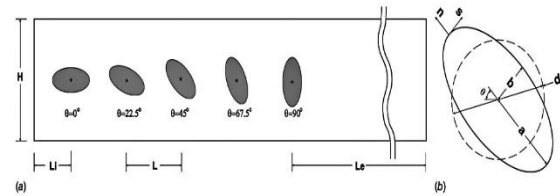
معادله ممنتوم در جهت Y:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

که در معادلات بالا، u و v مؤلفه‌های سرعت در جهت X و Y به ترتیب هستند. همچنین، چگالی، فشار سیال و ویسکوزیته دینامیکی هستند. در این مقاله فرض شده است که جریان تراکم ناپذیر است. معادلات حاکم ۱ تا ۳ برای محدوده شکل ۱ در نرم‌افزار کامسول مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، در این مقاله از پارامتری تحت عنوان ضریب منظر استفاده شده است که از رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۹].

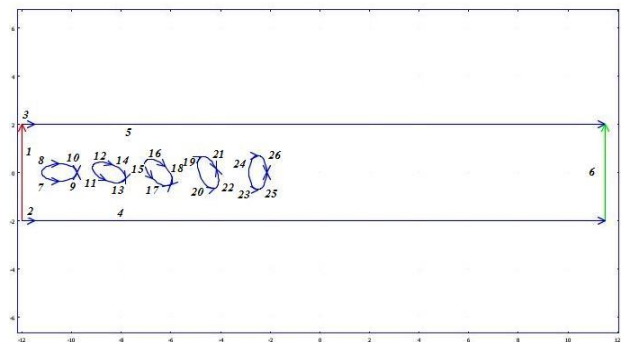
$$AB = \frac{b}{a} \quad (4)$$

که در معادله بالا، a اندازه طول محور بزرگ سیلندر بیضوی و b اندازه طول محور کوچک سیلندر بیضوی می‌باشد. با استفاده از این تعریف، پارامترهایی مانند عدد رینولدز، ضریب نیروی پسا و برآ به شکل زیر تعریف می‌شوند. در معادلات زیر، FD نیروی درگ، CD ضریب نیروی پسا و CL ضریب نیروی برآ می‌باشند [۲۹].

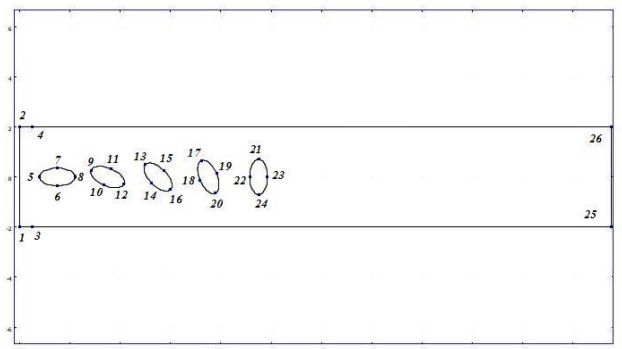


شکل ۱. شماتیکی از یک کانال افقی به همراه سیلندره‌های بیضوی.

هندسه مورد استفاده در این مقاله از ۲۶ خط مرزی تشکیل شده که در شکل ۲ الف نشان داده شده است. این خطوط مرزی در واقع قسمتی از بدنه کانال یا منحنی اطراف سیلندره‌های بیضوی هستند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، دهنه ورودی کانال با خط شماره ۱ و خروجی با خط شماره ۶ مشخص شده است. همچنین هر استوانه بیضوی نیز از ۴ منحنی شماره‌دار تشکیل شده است. هر نقطه نیز دارای شماره‌ای منحصر به خود می‌باشد و همین‌طور سیلندره‌های بیضوی با چهار نقطه مشخص می‌شود. کانال نیز با نقاط ۱ و ۲ در قسمت ورودی و نقاط ۷ و ۸ در خروجی کانال مشخص می‌گردند. نقاط مرزی مسئله نیز در شکل ۲ ب نشان داده شده است.



الف) خطوط مرزی



ب) نقاط مرزی

شکل ۲. نمایی از خطوط و نقاط مرزی سیلندره‌های بیضوی.

برای شبیه‌سازی در این مقاله، ورودی سیال به کانال یک پروفیل جریان آشفته کاملاً توسعه‌یافته تعریف شده است که برای آن شرط مرزی «سرعت ورودی» اعمال شده است. در خروجی کانال، شرط مرزی «فشار خروجی» در نظر گرفته شده است که فشار گنج صفر

در این قسمت نتایج به دست آمده از حل عددی از مقاله حاضر برای یک کانال با سیلندره‌های بیضی شکل با نتایج به دست آمده از مقاله پایه [۳۰] مورد مقایسه قرار می‌گیرد. برای مقایسه کار حاضر از کانتر توزیع دما در جریان عبوری از روی سیلندره‌های بیضوی در طول کانال استفاده شده است. شکل ۳ مقایسه‌ای از کانتر توزیع دما در جریان عبوری از دسته سیلندره‌های بیضوی در کانال افقی ارائه شده توسط علوی و همکاران [۳۰] با مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای جریان آرام داخل کانال، عدد رینولدز مطابق با مطالعه علوی و همکاران [۳۰] برابر با ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. فیزیک‌های منابع و خواص سیال در زیر فضای ماژول

سیالاتی.

ردیف	عنوان	مقدار	واحد	علائم
۱	چگالی	1.2	Kg / m^3	ρ
۲	لزجت دینامیکی	1.5×10^{-3}	Pa.s	μ
۳	لزجت انبساط	0	Pa.s	K_{dv}
۴	نیروی حجمی در جهت X	0	N / m^3	F_x
۵	نیروی حجمی در جهت Y	0	N / m^3	F_y

همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان سیال با عبور از سیلندره‌های داغ شروع به گرم شدن می‌کند و با عبور جریان سیال در طول کانال انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این توزیع انتقال حرارت در بین سیلندرها در مطالعه حاضر در مقایسه با مطالعه علوی و همکاران [۳۰] به خوبی نشان داده شده است. تأثیر این دریافت حرارت در پخش دما در اطراف سیلندرها به صورت عبور جریان سیال داغ در اطراف سیلندره‌های بیضوی نمود پیدا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توافق خوبی بین خطوط جریان به دست آمده در کار حاضر با خطوط جریان مقاله پایه وجود دارد.

همین‌طور، در این مطالعه، اعتبارسنجی جریان آشفته نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت هندسه مورد مطالعه همان هندسه ذکر شده در بخش جریان آرام می‌باشد با این تفاوت که سرعت جریان ورودی به کانال به صورتی در نظر گرفته شده است که جریان داخل کانال آشفته باشد. در این بخش عدد رینولدز برحسب قطر سیلندر ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{2ua}{v} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u^2 a} \quad (6)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho u^2 a} \quad (7)$$

برای تکمیل معادلات ناویر استوکس که در بالا به آن اشاره شد نیاز به ارائه کمیت‌ها و بیان یک سری اطلاعات دیگر می‌باشد. این کمیت‌ها شامل سه مجموعه؛ خواص سیال زیر فضا، تثبیت معادلات زیر فضا و اندازه مقادیر اولیه می‌باشد. خواص سیال زیر فضا به وسیله چگالی، لزجت دینامیکی، لزجت انبساط، نیروی حجمی در جهت X، نیروی حجمی در جهت Y بیان می‌شود. مقادیر این ضرایب در جدول ۲ آورده شده است. معادلات مربوط به سیستم زیر فضای حرارتی و سیالاتی که شامل کلیه معادلات برای کلیه زیر فضاهای حرارتی و سیالاتی می‌باشد در زیر ارائه شده است [۲۸]:

$$\nabla \cdot \Gamma = F \quad (8)$$

$$c = -\frac{\partial \Gamma}{\partial \nabla u} \quad (9)$$

$$a = -\frac{\partial F}{\partial u} \quad (10)$$

$$\gamma = \Gamma \quad (11)$$

$$\beta = -\frac{\partial F}{\partial \nabla u} \quad (12)$$

$$\alpha = -\frac{\partial \Gamma}{\partial u} \quad (13)$$

$$f = F \quad (14)$$

که در معادلات بالا، c ضریب پخش، a ضریب جذب، f ترم منبع، α ضریب جابجایی شار نگهدارنده، β ضریب جابجایی و Γ سیرکولیشن است.

۴- اعتبار سنجی

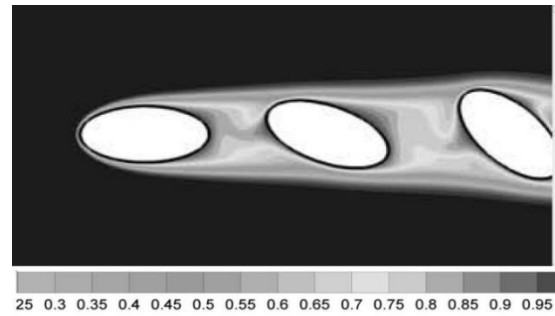
برای اطمینان از صحت حل عددی نیاز به مقایسه نتایج حاصله از نرم‌افزار کامسول با سایر مطالعات تجربی و عددی است. از آنجائی که مطالعات درباره جریان حول سیلندر بیضوی کم است، مطابق روش عملکرد مطالعه علوی و همکاران [۳۰]، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از جریان حول سیلندر مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه در هر دو حالت جریان آرام و جریان آشفته انجام شده است.

این مقاله، برای بررسی استقلال از شبکه از کانتور دما و نمودار توزیع دما در فاصله ۱۰ سانتی متری از دهانه ورودی کانال برای هر سه شبکه استفاده و محاسبه شده است. شکل ۵ و شکل ۶ کانتور توزیع دما و نمودار تغییرات دما در فاصله ۱۰ سانتی متر از دهانه ورودی کانال را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، کانتور توزیع دما برای شبکه بندی ریز به خوبی انتقال حرارت حول سیلندرهای بیضوی را نشان می دهد و در مقایسه با نتایج شبکه های بسیار ریز و ریز تر، دقت قابل قبولی را نشان می دهد. شبکه های معمولی و درشت انحرافات گرادیان دمایی بالایی از حالت بسیار ریز دارند که بیانگر دقت پایین محاسبات آن ها می باشد.

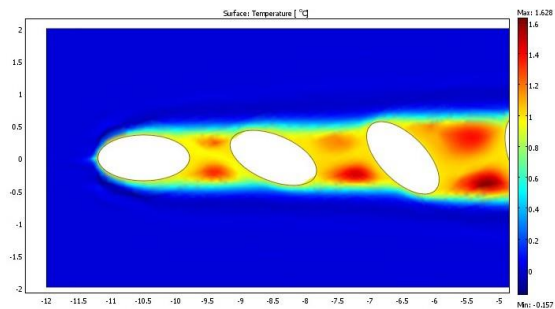
جدول ۳. عدد رینولدز متوسط به دست آمده در از کار حاضر در جریان مغشوش در مقایسه با نتایج سایر محققین.

	Correlation	Re=10000
Present study(Num.)	-	64.42
Fand(1965)	$Nu = (0.35 + 0.34Re^{0.5} + 0.15Re^{0.58})Pr^{0.3}$	59.31
Virk(1970)	$Nu = 0.5Pe^{0.5}$	59.58
Dogals & Churchill(1956)	$Nu = 0.46Re^{0.5} + 0.00128Re$	59.80
Churchill & Brenstein(1977)	$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/4}Pr^{1/3}}{[1+(0.4Pr)^{1/4}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{1/2} \right]$	53.63
Zhukauskas & Ziugzda (۱۹۸۵)	$Nu = 0.23Re^{0.60}$	57.77
McAdams(1954)	$Nu = 0.24Re^{0.60}$	60.29
Reither(1925)	$Nu = 0.35Re^{0.56}$	60.82
Hilpert(1933)	$Nu = 0.609Re^{0.466}, Re < 4000$ $Nu = 0.172Re^{0.618}, Re > 4000$	51.05

همین طور، برای این شبکه ها، توزیع دما در بین سیلندرها نیز قابل مشاهده نیست. این امر توسط نمودارهای توزیع دما نیز قابل مشاهده است. طبق شکل ۶، الگوی تغییرات دما در سیلندرهای بیضوی برای شبکه های بسیار ریز، ریز تر و ریز مشابه هستند، اما برای شبکه های درشت و معمولی، نمودار توزیع دما نمی تواند به طور دقیق روند تغییرات دما را نشان دهد. همین طور، شکل ۶ خطوط توزیع دما را نشان می دهد که انرژی حرارتی در اطراف سیلندرهای بیضوی متمرکز شده است و مناطق مشخصی از دماهای افزایش یافته و کاهش یافته به دلیل تأثیر هندسه بر الگوهای جریان می باشند. این نمایش دقیق تر به تصویری دقیق تر از تعامل بین جریان آشفته و تبادل



الف) مطالعه علوی و همکاران [۳۰]



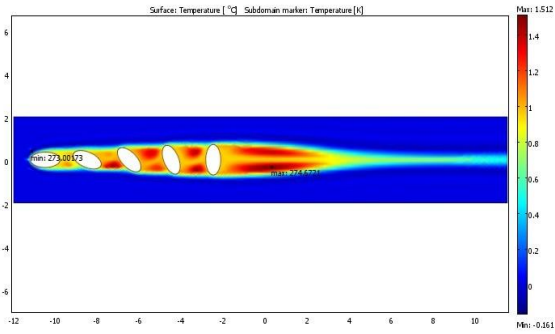
ب) مطالعه حاضر

شکل ۳. مقایسه کانتور توزیع دما کار حاضر با مطالعه علوی و همکاران [۳۰].

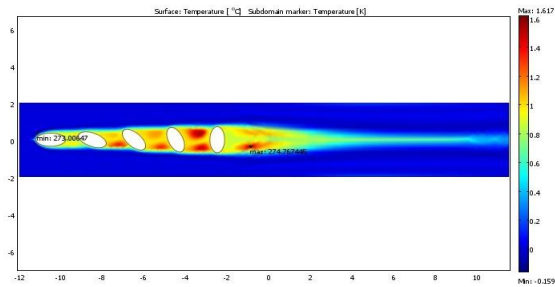
در جدول ۳، به صورت مشابه، عدد رینولدز متوسط به دست آمده در تحقیق جاری با نتایج سایر محققان مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می گردد با وجود اینکه مسئله دوبعدی در نظر گرفته شده و در نتیجه از اثرات سه بعدی و نوسانات خارج از صفحه جریان بر اثر توربولانس صرف نظر شده است، نتایج به دست آمده توافق خوبی با نتایج تجربی دارد. نتایج عددی اعتبار سنجی برای عدد ناسلت در مطالعه حاضر تنها در یک مورد حداکثر ۲۰ درصد انحراف با مطالعه هیلبرت و همکاران دارد و حداقل ۵ درصد انحراف با مطالعه ریدر و همکاران دارد. در مقایسه با مابقی مطالعات، مطالعه حاضر میانگین ۷ درصد خطا داشته است که نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است.

۵- استقلال از شبکه

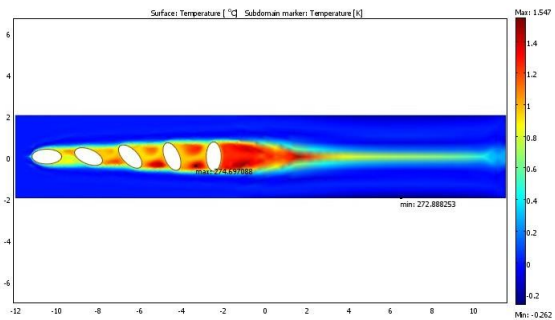
در بررسی استقلال از شبکه برای چیدمان سیلندرها بیضوی در این مقاله، از پنج نوع شبکه با تفکیک پذیری مختلف شامل شبکه های بسیار درشت، درشت، معمولی، ریز و بسیار ریز استفاده شده است. هر شبکه بندی تحت شرایط مرزی و پارامترهای جریان یکسان قرار گرفته است تا اطمینان حاصل شود که تفاوت های مشاهده شده در زمینه توزیع دمایی تنها به تغییرات در اندازه شبکه نسبت داده می شود. هدف از این بررسی، اطمینان از دقت و پایایی نتایج شبیه سازی ها می باشد. شکل ۴ نمایی از شبکه بندی در حالت های مختلف را نشان می دهد. در



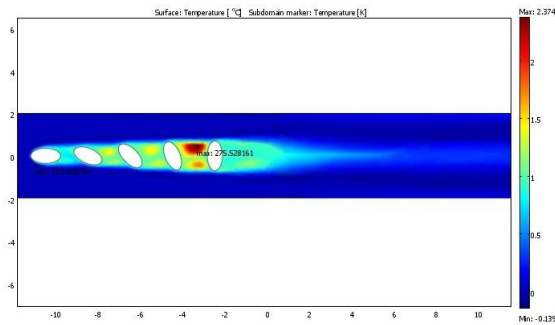
الف) شبکه بسیار ریز



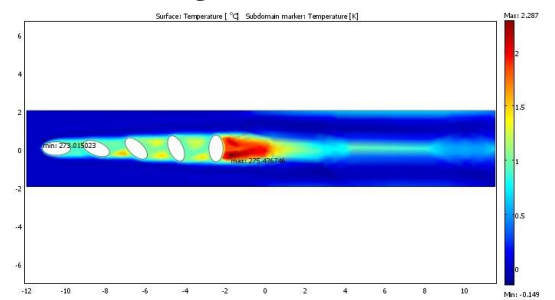
ب) شبکه ریز تر



ج) شبکه ریز

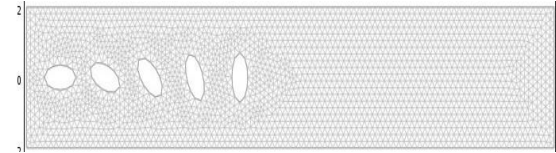


د) شبکه معمولی

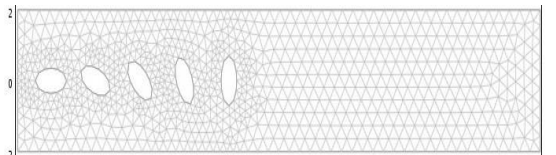


ه) شبکه درشت

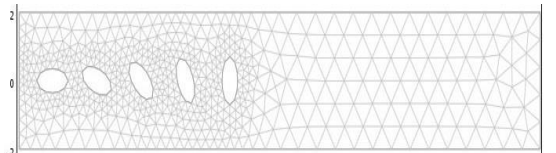
حرارت سطحی اجازه می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه جدا شدن جریان و نقاط اتصال مجدد بر توزیع دما در سراسر کانال تأثیر می‌گذارد.



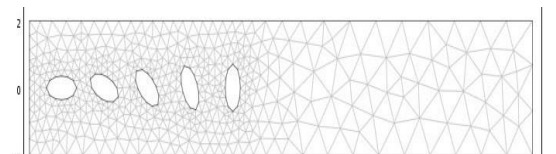
الف) شبکه بسیار ریز



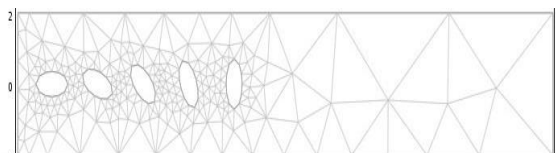
ب) شبکه ریز تر



ج) شبکه ریز



د) شبکه معمولی



ه) شبکه درشت

شکل ۱. نمایی از شبکه‌بندی در حالت‌های مختلف.

لذا، طبق کانتورها و نمودار توزیع دما، به دلیل زمان محاسباتی بسیار کمتر برای شبکه‌بندی ریز و دقت محاسباتی مناسب آن، شبکه‌بندی ریز به‌عنوان شبکه‌بندی مرجع برای ادامه شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل ۵. کانتور توزیع دما برای شبکه‌بندی بسیار ریز، ریز و معمولی.

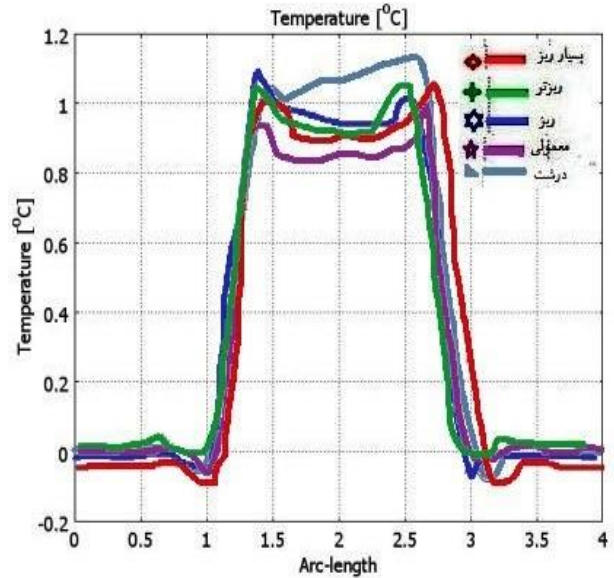
در کانال‌های افقی تأثیر می‌گذارد. شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی نشان داد که پیکربندی‌های خاص سیلندرها منجر به افزایش شدت آشفتگی و تغییر الگوهای جداسازی جریان می‌شود که به نوبه خود نرخ انتقال حرارت همرفتی را بهبود می‌بخشد. نکته قابل توجه، آرایش هم‌تراز سیلندرها به دلیل افزایش فعل‌وانفعالات و اختلاط بی‌سیم، بالاترین ضریب انتقال حرارت را نشان می‌دهد، در حالی که آرایش‌های مبهم عملکرد حرارتی کمتری را نشان می‌دهند.

۶-۱- جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۵

در این قسمت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای حالت جریان مغشوش داخل کانال همراه با سیلندره‌های بیضوی با ضریب منظر ۰.۵ بررسی می‌شود. در این حالت، عدد رینولدز جریان برابر با ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است که در این مقدار جریان کاملاً مغشوش است. همچنین، تأثیر چیدمان سیلندره‌های بیضوی در طول کانال بر تشکیل گردابه، ضریب نیروی برآ، عدد ناسلت محلی و متوسط، توزیع دما و سرعت برحسب زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۷ تغییرات کانتور سرعت بی‌بعد با توجه به زمان بی‌بعد در جریان مغشوش داخل کانال نشان داده شده است.

در این حالت، اثر نیروی اینرسی به نیروی لزجی غلبه کرده در نتیجه جریان حول سیلندرها متقارن نبوده و پدیده جدایش جریان رخ می‌دهد. همان‌طور که از کانتورهای زیر مشاهده می‌شود، توزیع سرعت بی‌بعد در کانال در قسمت زیر سیلندر پنجم بیشترین بوده و گردابه‌های بیشتری در این قسمت تولید شده‌اند که دلیل آن افزایش سرعت سیال و کم شدن اثر نیروی لزجی و به دنبال آن جدایش جریان می‌باشد. این در حالی است که توزیع سرعت در پشت سیلندرها بسیار کم بوده که دلیل آن حضور دسته سیلندرها است که منجر به کاهش فشار و نیروی درگ در پشت سیلندرها است.

همان‌طور که در بالا اشاره شد، با افزایش عدد رینولدز، جریان از حالت آرام و تقریباً متقارن در پشت سیلندرها به حالت غیرمتقارن و نوسانی تغییر رفتار می‌دهد. در اعداد رینولدزهای پایین، در پشت سیلندرها دو عدد گردابه متقارن به وجود می‌آید. هرچه عدد رینولدز زیاد شود گردابه‌ها از حالت متقارن خارج شده و نامتعادل می‌شوند. همین‌طور، در جریان مغشوش گردابه‌های تشکیل شده تقریباً حالت مغشوش دارند. در اعداد رینولدز بالاتر جریان پشت سیلندرها کاملاً مغشوش می‌باشد.



شکل ۶. نمودار توزیع دما در فاصله ۱۰ سانتی‌متر از دهانه ورودی در شبکه‌بندی‌های مختلف.

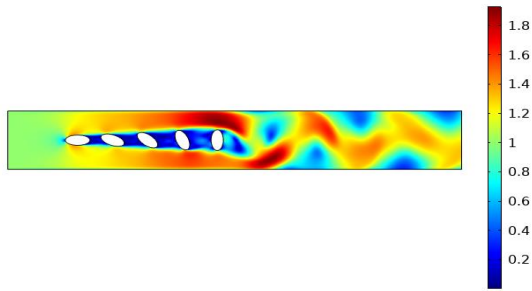
۶- نتایج و بحث‌ها

در این قسمت، به بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در این مقاله برای انجام شبیه‌سازی از زمان بی‌بعد استفاده شده است. استفاده از زمان بی‌بعد در این مقاله به منظور استانداردسازی نتایج و فراهم کردن امکان مقایسه مستقیم بین شرایط مختلف، انجام شده است. با بی‌بعد کردن زمان، تأثیرات واحدهای اندازه‌گیری زمان و سرعت خنثی شده و نتایج شبیه‌سازی قابل مقایسه خواهند بود. در واقع، زمان به عنوان متغیری بی‌بعد با استفاده از معادله زیر تعریف شده است.

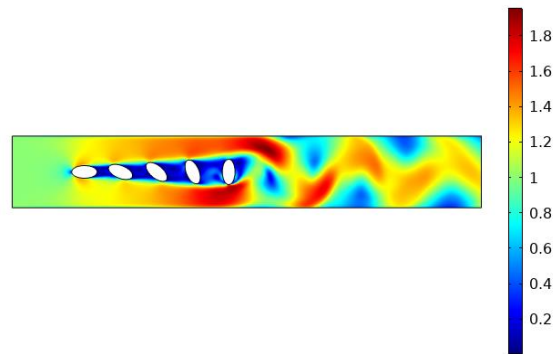
$$T = \frac{t * U_{\infty}}{L} \quad (15)$$

که در معادله بالا، t زمان واقعی برحسب ثانیه، سرعت جریان آزاد (جریان ورودی) برحسب m/s و L طول کانال برحسب متر می‌باشد. معیار انتخاب زمان‌ها بر اساس فواصل زمانی یکنواخت و پیوسته از $t=0$ تا $t=1$ ثانیه بوده است. این فواصل به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتوانند به خوبی تغییرات دینامیکی دما و تأثیرات چیدمان سیلندر بیضوی بر جریان آشفتگی و انتقال حرارت در داخل کانال را نشان دهند. در ادامه، به تحلیل نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده بر روی جریان عبوری از دسته سیلندره‌های بیضوی در کانال افقی در رژیم جریان آشفتگی در ضریب منظر ۰.۵ و ۰.۴۵ پرداخته می‌شود. نتایج این مطالعه نشان داد که آرایش سیلندره‌های بیضوی به‌طور قابل توجهی بر ویژگی‌های جریان آشفتگی و راندمان انتقال حرارت

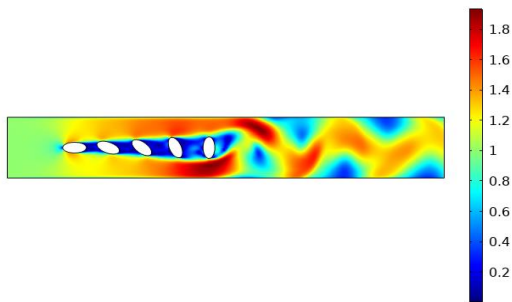
Re(1)=5000 Time=1 s Surface: spf2.U/U_mean (1)



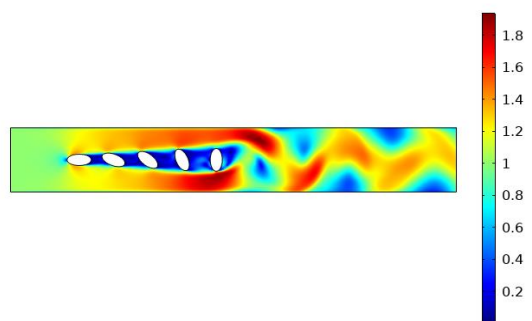
Re(1)=5000 Time=0.5 s Surface: spf2.U/U_mean (1)



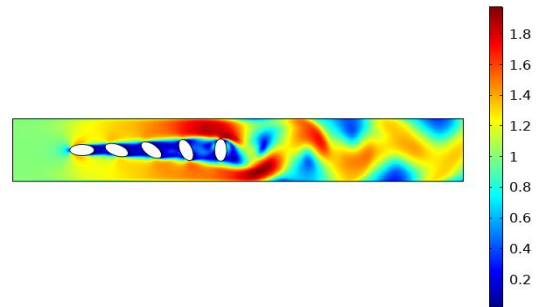
Re(1)=5000 Time=0.9 s Surface: spf2.U/U_mean (1)



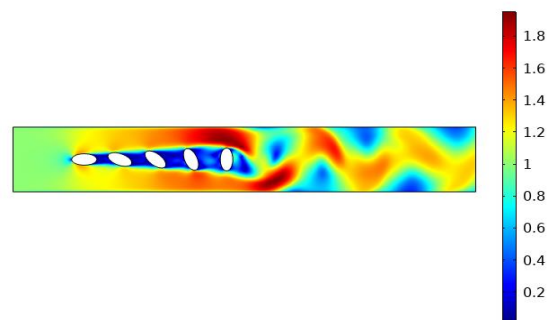
Re(1)=5000 Time=0.7 s Surface: spf2.U/U_mean (1)



Re(1)=5000 Time=0.6 s Surface: spf2.U/U_mean (1)



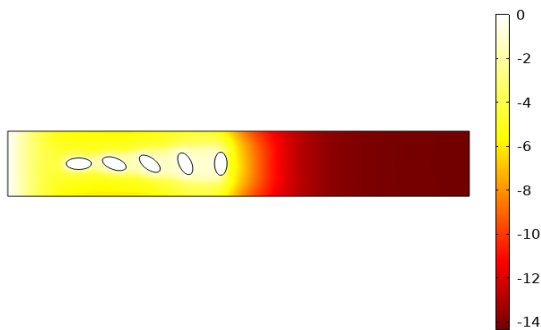
Re(1)=5000 Time=0.8 s Surface: spf2.U/U_mean (1)



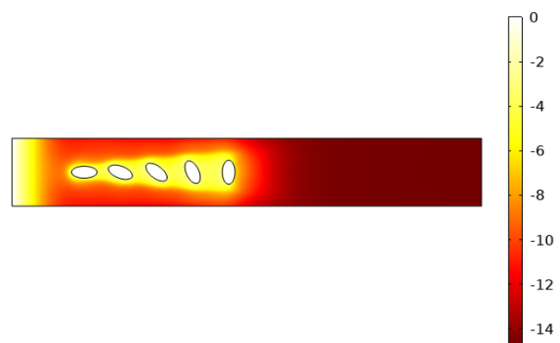
شکل ۷. کانتور سرعت بی‌بعد با تغییرات زمان بی‌بعد در عدد رینولدز ۵۰۰۰.

همین‌طور، با توجه به چرخش سیلندرها در طول کانال و بیشتر شدن فضای بین سیلندرها، سرعت جریان در این نواحی (مخصوصاً بین سیلندر چهارم و پنجم) کمتر شده و در نتیجه اندازه گردابه‌ها به مقدار کمی کاهش می‌یابد. در مقایسه با جریان آرام، تغییر چندانی در اندازه گردابه‌های تشکیل شده در این نواحی دیده نشده و لذا می‌توان نتیجه گرفت که عدد رینولدز در این ناحیه تأثیر چندانی بر گردابه‌های تشکیل شده ندارد. این کاهش سرعت در اثر چرخش سیلندرها بر روی میزان انتقال حرارت تأثیر بسزایی ندارد چراکه میزان این کاهش سرعت قابل‌توجه نمی‌باشد. شکل ۸ کانتور توزیع دمای بی‌بعد در جریان آشفته در داخل کانال را نشان می‌دهد. از آنجایی‌که افزایش سرعت جریان خود باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شده، چرخش سیلندرها در جهت جریان در جریان آشفته الگوی جریان متفاوت با جریان آرام است که منجر به تغییر دمای بی‌بعد می‌گردد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از کانتور دما، ایجاد موانع بیضوی در مسیر جریان باعث اغتشاش جریان و افزایش نرخ انتقال حرارت شده است.

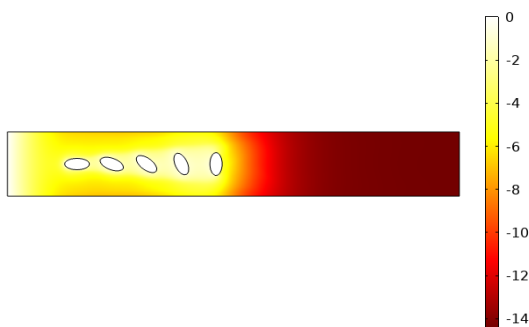
Re(1)=5000 Time=1 s Surface: (1)



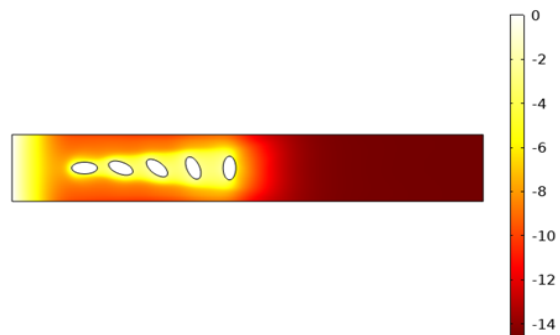
Re(1)=5000 Time=0.5 s Surface: (1)



Re(1)=5000 Time=0.9 s Surface: (1)



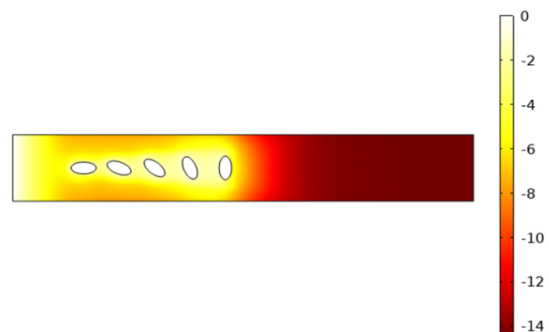
Re(1)=5000 Time=0.6 s Surface: (1)



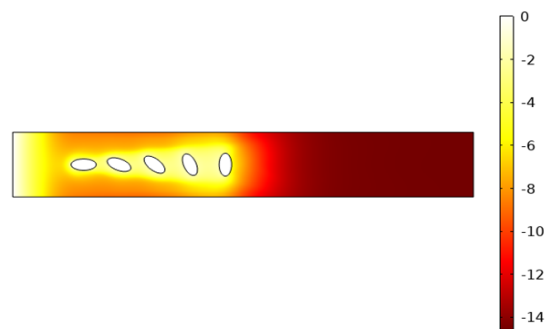
شکل ۸. کانتور توزیع دمای بی بعد با تغییرات زمان بی بعد در عدد رینولدز

۵۰۰۰.

Re(1)=5000 Time=0.8 s Surface: (1)

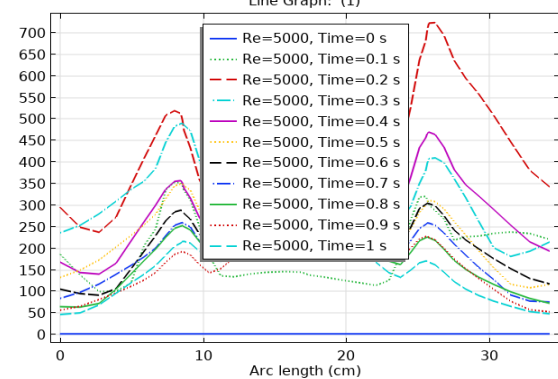
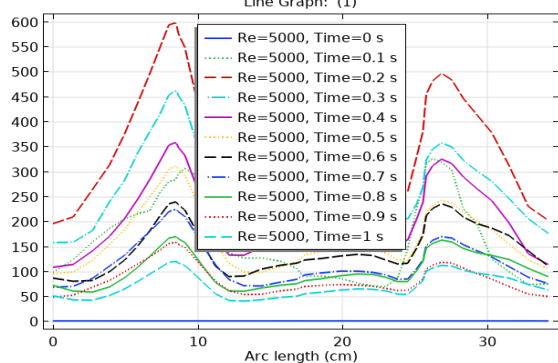
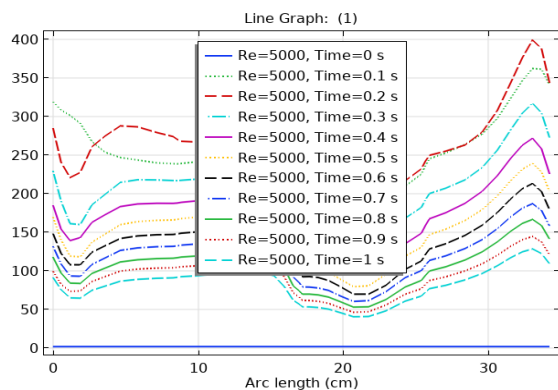
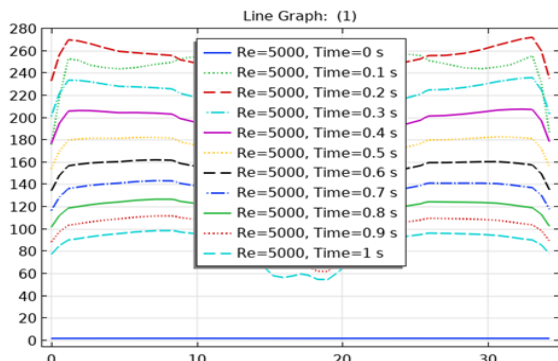


Re(1)=5000 Time=0.7 s Surface: (1)



همچنین، مشاهده می‌گردد که برخلاف جریان آرام در جریان آشفته تأثیر گردابه‌ها بر تغییرات دمای پائین دست کمتر مشهود است که می‌توان آن را به اثر نوسانات ایجادشده توسط توربولانس بر اختلاط جریان توجیه نمود. شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت محلی بر روی هر یک از سیلندرها ۱ تا ۵ را در برابر زمان و در عدد رینولدز ۵۰۰۰ نشان می‌دهد. در جریان مغشوش، تغییرات عدد ناسلت محلی بسیار دینامیک و وابسته به موقعیت مکانی سیلندرها می‌باشد. در سیلندر شماره ۱، توزیع عدد ناسلت به‌طور کلی متقارن است، اما با پیشرفت جریان و رسیدن به سیلندره‌های بعدی، توزیع عدد ناسلت به دلیل چرخش سیلندرها و تغییرات ناشی از جدایش جریان، نامتقارن می‌شود. این نامتقارنی به دلیل تفاوت در جدایش و انتقال حرارت در دو سمت سیلندرها است که به‌وسیله تلاطم و گردابه‌های ایجادشده در جریان آشفته تشدید می‌شود.

به‌طور خاص، در سیلندر پنجم که در انتهای مسیر جریان قرار دارد، فاصله بین سیلندرها افزایش یافته و منجر به کاهش سرعت جریان می‌شود. این کاهش سرعت به کاهش نرخ انتقال حرارت منجر می‌شود که در نمودار عدد ناسلت محلی به‌وضوح مشاهده می‌شود. اثر شکل



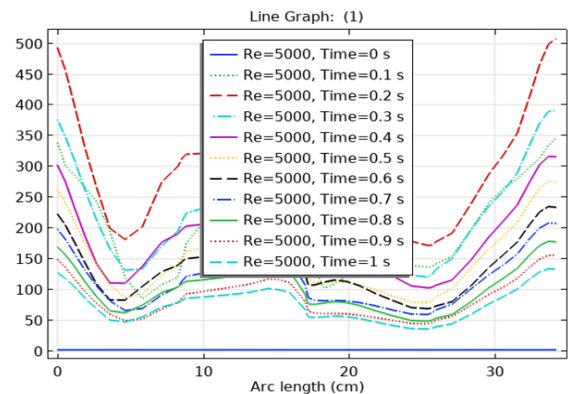
شکل ۹. کانتور عدد ناسلت محلی بر روی هر یک از سیلندرها ۱ تا ۵ در زمان‌های مختلف در عدد رینولدز ۵۰۰۰.

در جریان آرام، دامنه نوسانات عدد ناسلت بیشتر بوده و مقدار عددی آن در حدود یک مرتبه بزرگی کوچک‌تر است. این پدیده نشان‌دهنده

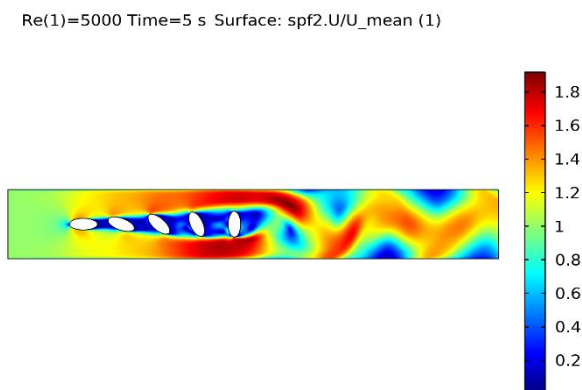
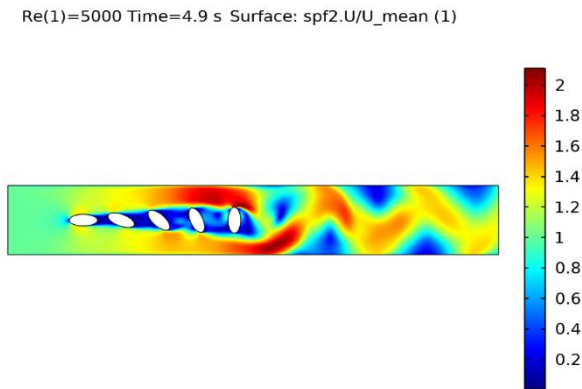
هندسی بیضوی سیلندرها بر روی عدد ناسلت محلی نیز قابل توجه است؛ زیرا بیضوی بودن سیلندرها منجر به تشکیل گردابه‌های بزرگ‌تر و افزایش تلاطم در جریان می‌شود که این خود موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد؛ بنابراین، انتخاب شکل هندسی و ضریب منظر مناسب برای سیلندرها می‌تواند بهینه‌سازی انتقال حرارت را در کانال‌های افقی به همراه داشته باشد.

شکل ۱۰ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر روی هر یک از سیلندرها با توجه به تغییرات زمان بی‌بعد از $t=0$ تا $t=1$ را نشان می‌دهد. تغییرات عدد ناسلت محلی به صورت خطی بوده و در زمان بی‌بعد ۰.۲ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این الگو نشان‌دهنده آن است که در ابتدا، نرخ انتقال حرارت به سرعت افزایش می‌یابد و سپس به مرور زمان کاهش پیدا می‌کند. این رفتار به دلیل تلاطم و اختلاط بیشتر جریان در حوالی سیلندرها در مراحل اولیه جریان مغشوش است که موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. در جریان مغشوش داخل کانال، سیلندر پنجم دارای بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط است، درحالی‌که کمترین مقدار آن مربوط به سیلندر شماره ۱ است. این تفاوت در توزیع عدد ناسلت می‌تواند به دلیل اثرات چرخش سیلندرها و افزایش فاصله بین آن‌ها باشد که موجب کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش نرخ انتقال حرارت در سیلندرها می‌شود.

شکل هندسی بیضوی سیلندرها نیز تأثیر مستقیمی بر الگوی جریان و جدایش گردابه‌ها داشته که این خود باعث افزایش نرخ انتقال حرارت در سیلندرها می‌گردد. به‌عنوان مقایسه‌ای از جریان آرام و مغشوش در داخل کانال حول سیلندرها بیضوی، نتایج نشان می‌دهند که در جریان مغشوش کانتورهای دما یکنواخت‌تر هستند که این امر می‌تواند به دلیل اختلاط بهتر جریان و ارتعاشات عرضی جریان مغشوش باشد.



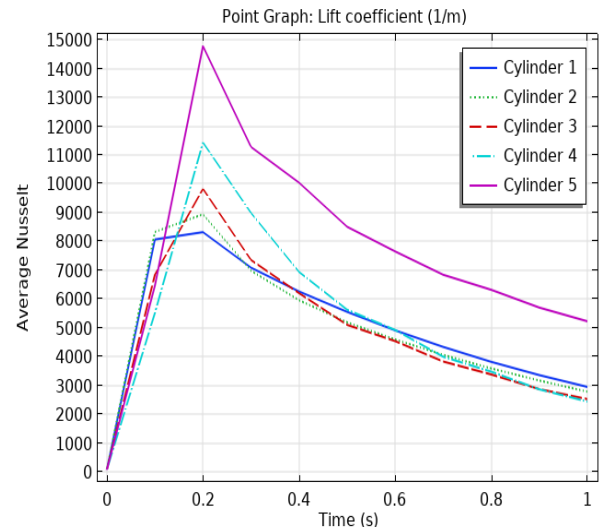
سرعت منجر به کوچک‌تر شدن گردابه‌ها و کاهش تلاطم می‌شود. در نتیجه، انتقال حرارت نیز به دلیل کاهش نرخ تبادل مومنتوم بین لایه‌های سیال کاهش می‌یابد. ضریب منظر ۰.۴۵، به‌عنوان یک پارامتر هندسی، بر الگوی جریان و تشکیل گردابه‌ها تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱۱. کانتور توزیع سرعت سیال در جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۴۵

شکل ۱۲ کانتور توزیع دما در جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۴۵ را نشان می‌دهد. در جریان مغشوش، به دلیل وجود ترم اغتشاش، نرخ انتقال حرارت بیشتر از حالت جریان آرام است؛ اما در مقایسه با نرخ انتقال حرارت در جریان مغشوش با ضریب منظر ۰.۵، توزیع دما کاهش یافته است چراکه جریان پشت سیلندرها تحت تأثیر کاهش ضریب منظر قرار گرفته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده گزارش شده است که تغییر ضریب منظر تأثیر زیادی بر شکل میدان جریان و حرارت داشته و آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. طبق کانتور زیر، توزیع دما در ضریب منظر ۰.۵ نسبت به ضریب منظر ۰.۴۵ در جریان مغشوش بیشتر و یکنواخت‌تر است، به‌طوری‌که توزیع دما در سرتاسر مسیر چیدمان سیلندر اتفاق افتاده است؛ اما حداکثر نرخ انتقال حرارت و توزیع دما در بین سیلندر چهارم و پنجم اتفاق افتاده

افزایش کارایی انتقال حرارت در جریان مغشوش نسبت به جریان آرام است که می‌توان آن را به تغییرات الگوی جریان و بهبود اختلاط حرارتی نسبت داد.



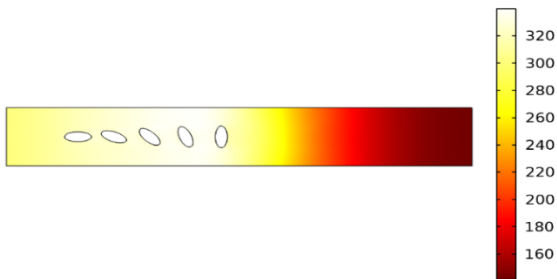
شکل ۱۰. تغییرات عدد ناسلت متوسط بر روی هر یک از سیلندرها ۱ تا ۵ در زمان‌های مختلف.

۶-۲- جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۴۵

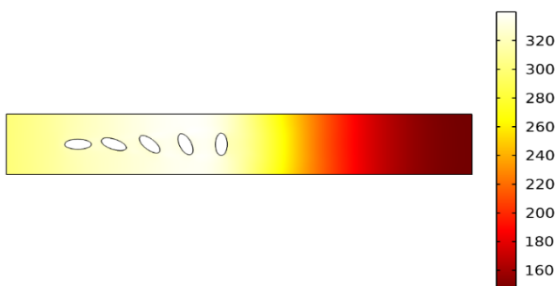
در این قسمت به دنبال بررسی اثر جریان مغشوش بر پارامترهای انتقال حرارت مانند توزیع دما، عدد ناسلت محلی و متوسط و همچنین توزیع سرعت سیال بر روی دسته سیلندرها بیضوی با ضریب منظر ۰.۴۵ هستیم. همان‌طور که در بالا اشاره شد، رینولدز جریان در این بررسی برابر با ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. هدف از این قسمت، بررسی اثر ضریب منظر در جریان مغشوش داخل کانال می‌باشد. لازم به ذکر است که افزایش عدد رینولدز و سرعت جریان مقداری از اثرات ضریب منظر را کاهش می‌دهد اما در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از جریان مغشوش با ضریب منظر ۰.۵، پارامترهای توزیع سرعت، توزیع دما، عدد ناسلت کاهش می‌یابد چراکه جریان در پشت این سیلندرها به دلیل چرخش سیلندرها، جریان پشت سیلندرها بعدی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

شکل ۱۱ کانتور توزیع سرعت سیال در جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۴۵ را نشان می‌دهد. در جریان مغشوش، افزایش سرعت منجر به جدایش جریان از روی دسته سیلندرها و تشکیل گردابه‌های بزرگ‌تر می‌شود. در این شرایط، گردابه‌ها و نواحی جدایش جریان به دلیل تلاطم بالا و تبادل مومنتوم، موجب افزایش انتقال حرارت می‌شوند. با چرخش سیلندرها در مسیر جریان و افزایش فاصله بین سیلندرها، سرعت سیال در این نواحی کاهش می‌یابد. این کاهش

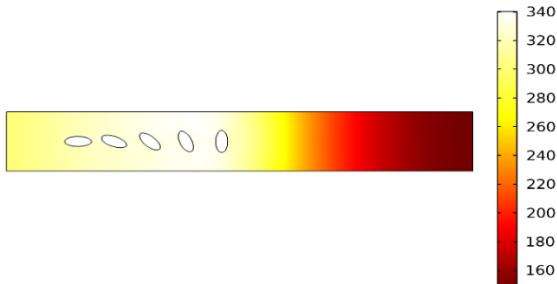
Re(1)=5000 Time=4.7 s Surface: Temperature (K)



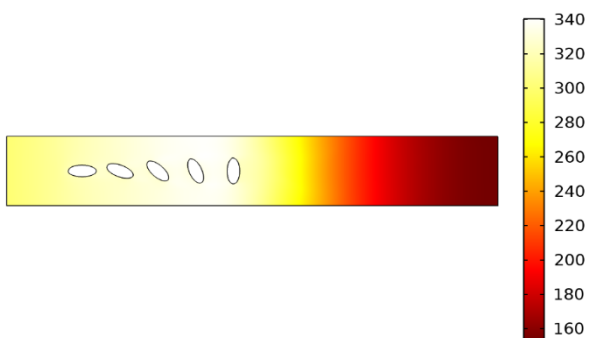
Re(1)=5000 Time=4.8 s Surface: Temperature (K)



Re(1)=5000 Time=4.9 s Surface: Temperature (K)



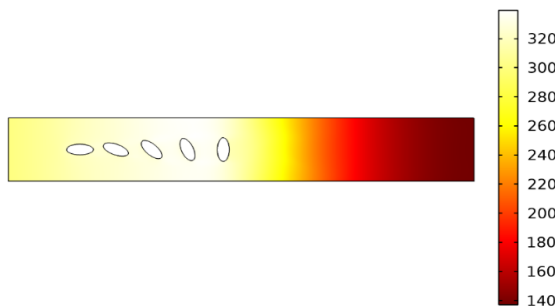
Re(1)=5000 Time=5 s Surface: Temperature (K)



است. نکته قابل تأمل این است که کاهش ضریب منظر معمولاً به معنای افزایش نسبت طول به عرض سیلندرها است که می‌تواند موجب تغییر در الگوی جریان و ابعاد گردابه‌های تشکیل شده شود. این تغییرات می‌توانند به‌طور مستقیم بر انتقال حرارت تأثیر گذاشته و بهینه‌سازی طراحی کانال‌های خنک‌کننده و سیستم‌های مبدل حرارتی را تسهیل کنند. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، تغییرات در ضریب منظر و چیدمان سیلندرها بر الگوی جریان و تلاطم تأثیر گذاشته و در نتیجه بر نرخ انتقال حرارت نیز مؤثر هستند.

در ارتباط با عدد ناسلت، لازم به ذکر است که کاهش ضریب منظر موجب کاهش عدد ناسلت می‌شود چراکه جریان پایین‌دست تحت تأثیر این چرخش سیلندرها قرار دارد. شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط در جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۴۵ را در گذر زمان نشان می‌دهد. این تغییرات نشان‌دهنده‌ی رفتار پیچیده و دینامیک حرارتی سیستم با توجه به تأثیر شکل هندسی سیلندرها بر جریان و انتقال حرارت است. در این حالت، بالاترین نرخ عدد ناسلت مربوط به سیلندر پنجم می‌باشد که در ابتدا به‌صورت آنی افزایش پیدا کرده و بعد شروع به کاهش می‌کند. در واقع، اثر شکل هندسی سیلندرها بر روی عدد ناسلت نشان می‌دهد که چیدمان و شکل سیلندرها می‌تواند به‌شدت بر میزان انتقال حرارت مؤثر باشد. شکل‌های هندسی مختلف می‌توانند الگوهای جریان متفاوتی ایجاد کنند که به‌تبع آن تلاطم و تشکیل گردابه‌های مختلفی به وجود می‌آید.

Re(1)=5000 Time=4.6 s Surface: Temperature (K)



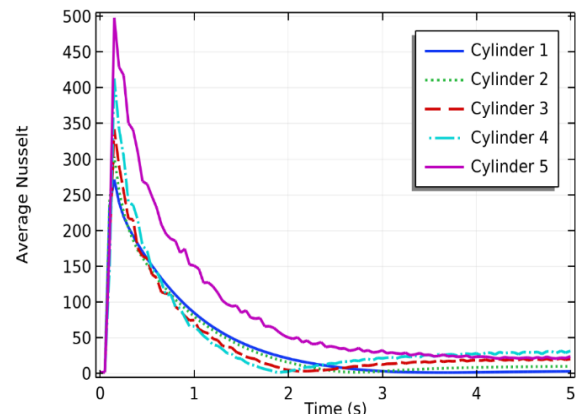
شکل ۱۲. کانتور توزیع دما سیال در جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۴۵

ارائه می‌کند. در این مقاله، جریان سیال در داخل یک کانال افقی به همراه سیلندره‌های بیضوی با ضریب منظر ۰.۴۵ و ۰.۵ در رژیم جریان مغشوش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، در بررسی جریان بر روی سیلندره‌های بیضوی با ضریب منظرهای مختلف، تأثیر پارامترهایی مانند میزان انتقال حرارت، عدد ناسلت، توزیع دما و توزیع سرعت مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل جریان سیال بر روی دسته سیلندرها از کوپل معادله حرارت و سیالات به روش اجزا محدود استفاده شده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که حضور سیلندرها با افزایش قابل توجهی در گردابه‌های زیر سیلندر پنجم و انتقال از الگوهای جریان متقارن به نامتقارن با افزایش عدد رینولدز به طور قابل توجهی دینامیک جریان را تغییر می‌دهد. علاوه بر این، آنالیزها نشان می‌دهد در حالی که جریان در اعداد رینولدز بالاتر به طور فزاینده‌ای آشفته می‌شود، تأثیر مکانیک چرخشی سیلندرها به مشخصات توزیع دما و سرعت متفاوت کمک می‌کند. طبق نتایج به دست آمده، در بررسی جریان حول سیلندره‌های بیضوی در کانال افقی، امکان رخداد نقطه ماکزیمم دمایی متفاوت بوده و دمای ماکزیمم حالت خواص ثابت که بین سیلندر سوم و چهارم رخ می‌دهد، از دمای ماکزیمم حالت خواص متغیر که در پشت سیلندر پنجم رخ می‌دهد، کمتر می‌باشد. همچنین، نتیجه شده است که سرعت سیال تأثیر بسیار زیادی بر میزان انتقال حرارت در مقایسه با تأثیر سطح تبادل حرارتی دارد. نتایج به دست آمده از بررسی ضریب منظر در جریان مغشوش حاکی از آن است که با کاهش ضریب منظر، میزان انتقال حرارت در کانال در جریان مغشوش کاهش می‌یابد. همچنین، نتیجه شده است که در جریان مغشوش، کانتورهای دما یکنواخت تر است که به علت اختلاط جریان و ارتعاشات عرضی جریان مغشوش می‌باشد.

۸- منابع

- [1] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis, Numerical and experimental study of characteristics of the wake produced behind an elliptic cylinder with trip wires. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2021. 45: p. 265-285.
- [2] Yadegari, M., A. Bak Khoshnevis, and M. Boloki, An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder. Iranian Journal of Science and Technology,

Point Graph: Lift coefficient (1/m)



شکل ۱۳. تغییرات عدد ناسلت متوسط برای جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۴۵

این پدیده‌ها مستقیماً بر نرخ انتقال حرارت از سیلندرها تأثیر می‌گذارند. به طور کلی، رفتار عدد ناسلت برای تمامی سیلندرها به یک شکل بوده و تمامی آن‌ها در ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس کاهش می‌یابند که دلیل این امر پدیده اختلاط جریان در حالت مغشوش می‌باشد که نرخ انتقال حرارت متوسط افزایش یافته و فرکانس نوسانات کاهش می‌یابد. همچنین، در مقایسه با ضریب منظر ۰.۵، عدد ناسلت متوسط جریان مغشوش کاهش پیدا کرده است که نشان از تأثیر ضریب منظر بر میزان انتقال حرارت دارد. ضریب منظر ۰.۴۵، به عنوان یک پارامتر هندسی، بر نحوه تشکیل و گسترش گردابه‌ها و همچنین الگوی جریان تأثیرگذار است.

با کاهش ضریب منظر، نسبت طول به عرض سیلندر افزایش یافته و این امر می‌تواند منجر به تغییر در الگوی جریان و بهبود انتقال حرارت شود. به همین دلیل، سیلندرها با ضریب منظر ۰.۴۵، با ایجاد تلاطم بیشتر و افزایش تبادل حرارتی، نرخ عدد ناسلت بالاتری را به نمایش می‌گذارند.

در مجموع، بررسی تغییرات عدد ناسلت متوسط در جریان مغشوش داخل کانال با ضریب منظر ۰.۴۵ نشان می‌دهد که هندسه سیلندرها نقش حیاتی در بهینه‌سازی انتقال حرارت دارد و تنظیم مناسب ضریب منظر می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد حرارتی سیستم‌های مهندسی فراهم آورد. در نتیجه انتظار می‌رود که با افزایش ضریب منظر عدد ناسلت متوسط افزایش یابد.

۷- نتیجه‌گیری

این مطالعه تجزیه و تحلیل جامعی از رفتار جریان آشفته در یک کانال حاوی سیلندره‌های بیضوی با ضریب منظر ۰.۵ و عدد رینولدز ۵۰۰۰

- [11] Nag, P., M.M. Molla, and M.A. Hossain. Non-Newtonian shear thinning effect on natural convection flow over an isothermal elliptical cylinder. in AIP Conference Proceedings. 2019. AIP Publishing LLC.
- [12] Seo, Y.M., M.Y. Ha, and Y.G. Park, A numerical study on the three-dimensional natural convection with a cylinder in a long rectangular enclosure. Part I: Size effect of a circular cylinder or an elliptical cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019. 134: p. 420-436.
- [13] Vijay, K., et al., Flow-induced transverse vibration of an elliptical cylinder with different aspect ratios. *Ocean Engineering*, 2020. 214: p. 107831.
- [14] Ong, M.C., et al., Numerical simulation of flow around a smooth circular cylinder at very high Reynolds numbers. *Marine Structures*, 2009. 22(2): p. 142-153.
- [15] Kravchenko, A.G. and P. Moin, Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re_D=3900$. *Physics of fluids*, 2000. 12(2): p. 403-417.
- [16] Park, N., et al., A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model with a global model coefficient. *Physics of Fluids*, 2006. 18(12): p. 125109.
- [17] Parnaudeau, P., et al., Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3900. *Physics of Fluids*, 2008. 20(8): p. 085101.
- [18] Rajani, B., A. Kandasamy, and S. Majumdar, On the reliability of eddy viscosity based turbulence models in predicting turbulent flow past a circular cylinder using URANS approach. 2012.
- [19] Aslan, E., et al., Numerical and experimental investigation of tube bundle heat exchanger arrangement effect on heat transfer performance in turbulent flows. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 2023. 43(2): p. 175-190.
- [20] Brodnianská, Z. and S. Kotšmíd, Heat transfer enhancement in the novel wavy shaped heat exchanger channel with cylindrical vortex generators. *Applied Thermal Engineering*, 2023. 220: p. 119720.
- Transactions of Mechanical Engineering, 2023. 47(1): p. 67-80.
- [3] Sadeghi, M., M. Yadegari, and A.B. Khoshnevis, Numerical investigation of the flow characteristics around two sequential cylinders with circular and square cross-sections. *Journal of Marine Science and Technology*, 2024: p. 1-18.
- [4] Puliyeri, V., S. Vengadesan, and K. Arul Prakash, Effect of cylinder arrangement on fluid flow and heat transfer characteristics past four elliptic cylinders. *Heat Transfer Engineering*, 2021. 42(21): p. 1789-1810.
- [5] Mansouri, Z., M. Yadegari, and A. Bak 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. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023. 45(9): p. 459.
- [6] Bak Khoshnevis, A., M. Boloki, and M. Yadegari, The investigation of the effect of the helical strakes' height on the cylindrical wake. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2020. 10(1): p. 223-236.
- [7] Juncu, G., Unsteady heat transfer from an elliptic cylinder. *International journal of heat and mass transfer*, 2008. 51(3-4): p. 920-928.
- [8] Paul, I., K. Arul Prakash, and S. Vengadesan, Numerical analysis of laminar fluid flow characteristics past an elliptic cylinder: A parametric study. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2014. 24(7): p. 1570-1594.
- [9] Li, Y., et al., Thermal fluid dynamics interaction between dual cylinders: Numerical analysis of groove effects and rotational speed. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2024. 109: p. 109525.
- [10] Ozalp, C., et al., An experimental investigation of the flow characteristics and heat transfer properties of a heated and an unheated vertically positioned circular cylinder at different Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023. 201: p. 123637.

- Characteristics of Fluid Flow and Forced Convection Heat Transfer: A Numerical Study. *Al-Iraqia Journal for Scientific Engineering Research*, 2024. 3(3): p. 135-147.
- [27] Goharkhah, M., Electrohydrodynamic (EHD) effects on condensation heat transfer of R-11 on circular and elliptical cylinders: An experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023. 185: p. 108100.
- [28] Deb, P., G. Biswas, and N. Mitra, Heat transfer and flow structure in laminar and turbulent flows in a rectangular channel with longitudinal vortices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995. 38(13): p. 2427-2444.
- [29] Naik, H. and S. Tiwari, Effect of aspect ratio and arrangement of surface-mounted circular cylinders on heat transfer characteristics. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2018. 25(-). (۵)
- [30] Mahmoodaboulhasan, A., Analysis of fluid flow and heat transfer on a bundle of pipes by finite element method., in PhD Thesis, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering., 2015, Islamic Azad University, Science and Research Unit [In Persian]
- [21] Konijeti, R., et al., CFD analysis of heat transfer by free convection over a vertical cylinder with circular fins of triangular cross-section. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 2024. 7(2): p. 741-753.
- [22] Ali, N., et al., Heat dissipation and fluid flow in micro-channel heat sink equipped with semi-elliptical pin-fin structures: A numerical study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024. 155: p. 107492.
- [23] Behara, S. and S. Mittal, Wake transition in flow past a circular cylinder. *Physics of Fluids*, 2010. 22(11): p. 114104.
- [24] Salimipour, E. and S. Yazdani, Study on the fluid flow and heat transfer characteristics of a horizontal elliptical cylinder under thermal buoyancy effect. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022. 192: p. 122948.
- [25] Teixeira, F., et al., Geometric Evaluation of Bluff Bodies Arrangement under Turbulent Flows with Mixed Convection Heat Transfer. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023. 32(2): p. 279-311.
- [26] Ali, S.A., Influence of Changing Location of the Equilateral Triangle Cylinder on



Analytical Evaluation of 2-stage Pusher Centrifuge Dynamic Performance

Mehdi Jafari Vardanjani*¹

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

Abstract

Mechanical filtration of solid and liquid phases with the help of centrifuge mechanism is a common operation in industries particularly for salt dehydration. The process is mainly based on the centrifuge action between particles and fluids. Currently most of the studies have been performed on single-stage centrifuges while there it is required to know and analyze the behavior of the multi-stage pusher centrifuges in order to optimize their efficiency. The structure and dynamic performance of the two-stage pusher centrifuge device has been analyzed in the current study in three phases: modal, particle behavior, and transient state dynamics analysis. The results of the modal analysis have demonstrated that the safety margin obtained in the context of the resonance occurrence for the internal basket set and subset due to linear and rotational inertial forces has been 40%. Based on the results of the transient dynamics analysis, the stability of the particle behavior has been about 5.5 s or 68% of the particle feeding time, the maximum displacement at the critical point of the inner basket subset has been 0.51 mm, and the critical stress value has been about 27 MPa; which has been acceptable in terms of mechanical strength of the assembly versus the stresses and strains caused by the operation of the device. Thus, it is recommended based on the results to maintain the maximum rotational motion (36.68 rad/s) and no significant change in the particle feeding rate compared to the specified value (0.56 kg/s).

Keywords

Pusher Centrifuge

Dynamic Analysis

Modal Analysis

Received: 10.06.2024

Revised: 12.01.2024

Accepted: 12.30.2024

*Corresponding Author

Mehdi Jafari Vardanjani

Email

M-jafari@nus.ac.ir

1- Introduction

Mechanical filtration of solid and liquid phases is a common operation in industries including chemical, pharmaceutical, wastewater treatment, and food industries (Ergun & Orning, 1949). In this regard, centrifuges are used for a wide range of applications, the most common of which is related to dewatering (Leung, 1998). Pusher centrifuge device is used for dewatering, drying and separating materials (fibers, crystals and powders) continuously. Input mixture enters the centrifuge through the feed pipe and is distributed uniformly inside the centrifuge basket when it goes to the distributor.

Currently different theoretical researches have been done on two-stage pusher centrifuges. The main reason for this issue is the complexity and variety of centrifuge separation processes. Mainly,

the inability to determine the dimensions, shape, and movements of particles accurately due to the irregular conditions created on them, makes complex mathematical problems. This issue leads to difficulties in conducting theoretical studies of this process. On the other hand, parameter optimization based solely on experimental tests is not very reliable and costly. Therefore, in order to determine the laws governing fluid flow in the centrifuge process, appropriate mathematical models can be developed (Wang, Brannock, Cox, & Leslie, 2010).

In the present study, the analysis of the structure and dynamic performance of the two-stage pusher centrifuge device has been demonstrated. In this regard, the simulation task has been considered for the subsets of the inner basket, the outer basket, and the feeding chamber in three phases: modal



analysis, particle behavior analysis, and transient state dynamics analysis. Finite element analysis results have been analyzed and compared with the experimental results.

2- Methods

2-1-Simulations

In order to perform modal analysis in the software, boundary conditions and connections were applied on the set and members according to Fig. 1. The material used for the members was stainless AISI 304.

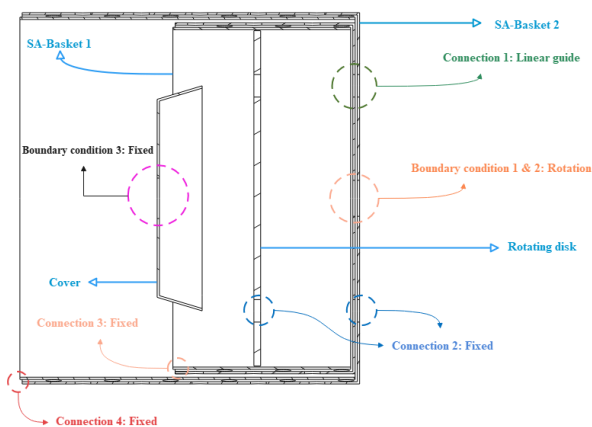


Fig. 1: Schematics of the model used for modal analysis; The cut view of the model along with the display of connections and boundary conditions (The wedge-wires are depicted in a simple form for simplicity of the display.)

In order to apply the dynamic stress distribution obtained from the particle behavior analysis section, time-stress distribution functions were defined in the form of tabular functions

3- Results and Discussion

The results obtained in this section include the relative displacements caused in the parts and the calculation of their natural frequency. In order to interpret the results of the modal analysis, the natural frequencies of the set and the subset of the inner basket have been compared with the normal working vibration frequency of the device. Then the resonance phenomenon for the critical mode has been investigated. The critical mode was assumed as the mode in which the maximum displacement has occurred. Also, a comparison has been made

between the natural frequency of the set and the subset of the internal basket.

According to the rotational speed of the device (36.65 rad/s), it can be concluded that the normal working vibration frequency of the device is 5.83 Hz. According to the results the natural frequencies of the modes are different from the normal working vibration frequency of the device. Thus, the probability of the resonance phenomenon is negligible for the set. The stress distribution and displacement results have been specifically discussed here. It should be noted that displacement in transient state dynamic analysis has been about the differential displacement, while kinematic displacement and motion analysis haven't been directly analyzed here.

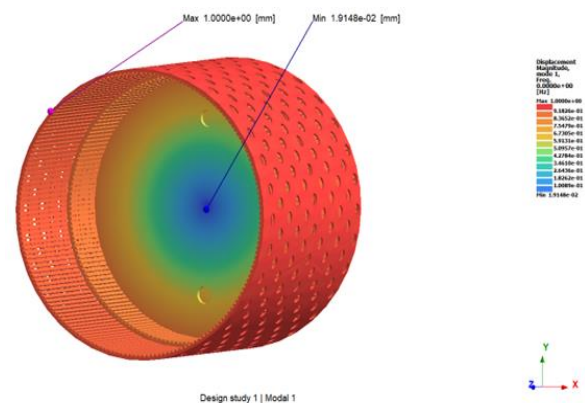


Fig. 2: The result obtained from the modal analysis performed on the assembly in mode 1 in the form of the color contour of the relative maximum displacement

4- Conclusions

In this study, the structure and dynamic performance of the two-stage pusher centrifuge were analyzed. In this regard, the simulation process was done in three phases: modal analysis, particle behavior analysis, and transient state dynamics analysis. Based on the results, the stability of the particle behavior was about 5.5 s or 68% of the particle feeding time, the maximum displacement at the critical point of the inner basket subset was 0.51 mm, and the critical stress on it was about 27 MPa; which means the acceptable mechanical strength of the assembly versus the stresses and strains caused by the operation of the device. What can be inferred

based on the results of the analysis was the recommendation to maintain the maximum rotational motion (36.68 rad/s) and no significant change in the particle feeding rate compared to the specified value (0.56 kg/s).

5- References

- [1] Ergun, S., & Orning, A. A. (1949). Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(6), 1179-1184. doi:10.1021/ie50474a011.
- [2] Leung, W. W. F. (1998). *Industrial Centrifugation Technology*: McGraw-Hill Education.
- [3] Wang, Y., Brannock, M., Cox, S., & Leslie, G. (2010). CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fibre membrane bioreactor using a porous media approach. *Journal of Membrane Science*, 363(1), 57-66. doi:https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.008.



بررسی و تحلیل عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دومرحله‌ای

مهدی جعفری وردنجانی^{*}

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

چکیده

کلمات کلیدی

سانتریفیوژ پوشر
تحلیل دینامیک
تحلیل مودال

جداسازی و فیلتراسیون مکانیکی فازهای جامد و مایع به کمک دستگاه سانتریفیوژ پوشر، عملیاتی متداول در صنایع مختلف به شمار می‌رود. آنچه در مطالعه حاضر مدنظر است، تحلیل ساختار و عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دومرحله‌ای است. در این راستا تحلیل این فرآیند در قالب سه فاز تحلیل مودال، تحلیل رفتار ذرات، و تحلیل دینامیک حالت گذرا انجام شده است. نتایج تحلیل مودال نشان داده است که حاشیه ایمنی به دست آمده در زمینه وقوع تشدید برای مجموعه و زیرمجموعه سبد داخلی ناشی از نیروهای اینرسی خطی و دورانی ۴۰٪ بوده است. همچنین بر اساس نتایج تحلیل دینامیک گذرا مدت زمان پایداری رفتار ذرات در حدود ۵.۵ s یا ۶۸٪ مدت زمان تغذیه ذرات، جابجایی حداکثر در نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی حداکثر ۱.۳ mm و تنش بحرانی وارد شده بر آن در حدود ۷۰ MPa است؛ که به معنای استحکام مکانیکی قابل قبول مجموعه در مقابل تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از عملکرد دستگاه است. آنچه با توجه به نتایج تحلیل انجام شده می‌توان استنباط نمود، توصیه بر حفظ حرکت دورانی حداکثر (۳۶.۶۸ rad/s) و عدم تغییر قابل توجه نرخ تغذیه ذرات نسبت به مقدار مشخص شده (۰.۵۶ kg/s) می‌باشد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

^{*} نویسنده مسئول

مهدی جعفری وردنجانی

ایمیل

m-jafari@nus.ac.ir

۱- مقدمه

حین تغذیه مواد، عملیات آب‌گیری و جداسازی و استحکام ایستا قرار دارد. بنابراین، عملکرد دستگاه به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نرخ تغذیه مواد و گردش آنها در طول چرخه کاری قرار می‌گیرد. این پارامترها بر استهلاک و آلودگی صوتی دستگاه نیز تأثیرگذار هستند. مجموعه این موارد ضرورت تحلیل ساختار و عملکرد دینامیکی دستگاه را اثبات می‌نماید.

سانتریفیوژهای کاسه‌ای و لوله‌ای جهت جداسازی یا طبقه‌بندی مؤثر جامدات ریز استفاده می‌شوند که این امر به دلیل شتاب گریز از مرکز بالای آنها می‌باشد [۳]. در طی فرآیند جداسازی گریز از مرکز، ته‌نشینی و ظهور رسوب‌ها رخ می‌دهد. رفتار رئولوژیکی این رسوب بر شکل آن تأثیرگذار است. با این حال شکل رسوب تأثیر قابل توجهی بر شرایط جریان داخل سانتریفیوژ دارد. این موضوع میزان کارایی و سرعت جداسازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴]. عملکرد سانتریفیوژها

جداسازی و فیلتراسیون مکانیکی فازهای جامد و مایع، عملیاتی متداول در صنایع به شمار می‌رود. این صنایع شامل صنایع شیمیایی، داروسازی، تصفیه فاضلاب، و صنایع غذایی می‌شود [۱]. در این راستا سانتریفیوژها برای طیف وسیعی از کاربردها استفاده می‌شود که رایج‌ترین کاربرد آنها مربوط به بحث آب‌گیری می‌شود [۲]. دستگاه سانتریفیوژ پوشر^۱ برای آب‌گیری، خشک کردن و جداسازی مداوم مواد (الیاف، کریستال‌ها و پودرها) استفاده می‌شود. مخلوط ورودی از طریق لوله تغذیه وارد سانتریفیوژ می‌شود و هنگامی که به سمت توزیع‌کننده می‌رود به‌طور یکنواخت در داخل سبد سانتریفیوژ توزیع می‌شود. سپس می‌توان فاز جامد تشکیل شده روی سبد را توسط جت‌های آب شست. در واقع فرآیند آب‌گیری توسط نیروی گریز از مرکز سانتریفیوژ انجام شده، تخلیه فاز جامد به‌صورت خشک انجام می‌شود. بنابراین، عملکرد دستگاه تحت تأثیر پارامترهایی شامل تعادل دورانی دستگاه

^۱ Pusher centrifuge



گرچه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه سانتریفیوژهای کاسه‌ای و لوله‌ای، و قوانین سیال حاکم بر آنها دیده می‌شود، لیکن به‌ندرت مبحث سانتریفیوژهای پوشر دومرحله‌ای و چندمرحله‌ای جداساز مورد تحلیل قرار گرفته است [۸]. سانتریفیوژهای دومرحله‌ای از جمله سانتریفیوژهای جداکننده‌ای هستند که تخلیه آنها به‌صورت مرحله‌ای انجام می‌شود که امکان انجام عملیات پیوسته را دارند. در این سانتریفیوژها تمام مراحل جداسازی، شستشو، خشک‌کردن، و تخلیه در سرعت نهایی دستگاه قابل انجام است. این سانتریفیوژها علاوه بر طراحی ساختار مناسب، قابلیت استخراج پیوسته مواد، مصرف پائین، ظرفیت بالا، و حفظ رطوبت در مقادیر پائین را دارند. بنابراین از این دستگاه در صنایع شیمیایی بسیاری جهت جداسازی مواد از فازهای ناهمگون و آب‌گیری مخلوط‌های حاوی کریستال یا جامدات فیبری استفاده می‌شود [۹].

در حال حاضر تحقیقات تئوری متفاوتی روی سانتریفیوژهای پوشر دومرحله‌ای در حال انجام است. البته، پیش‌بینی عملکرد و انجام محاسبات طراحی در این ماشین‌ها به آزمایش‌ها تجربی وابسته است. دلیل اصلی این موضوع پیچیدگی و گوناگونی فرآیندهای جداسازی سانتریفیوژ است. عمدتاً عدم توانایی در تعیین دقیق ابعاد، شکل، و حرکات ذرات به دلیل شرایط نامنظم ایجاد شده روی آنها، مسائل ریاضی پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند. این موضوع منجر به دشواری در انجام مطالعات تئوری این فرآیند می‌شود. از طرف دیگر بهینه‌سازی پارامترها صرفاً بر اساس آزمایش‌ها تجربی چندان قابل اعتماد نبوده، هزینه‌بر است. بنابراین جهت تعیین قوانین حاکم بر جریان سیال در فرآیند سانتریفیوژ، مدل‌های ریاضی مناسبی را می‌توان توسعه داد [۱۰].

برای شبیه‌سازی‌های عددی مکانی و زمانی، رویکردی بر اساس روش سریع اولبری فری [۱۱] جهت رسیدن به تعادلی بین دقت فیزیکی موردنیاز و زمان انجام محاسبات، ابداع شده است. در این روش فاز جامد (ذرات پودر نمک موردنظر) و فاز مایع به‌صورت یک‌فاز مخلوط تقریب زده می‌شوند. بنابراین جهت در نظر گرفتن تأثیر شرایط مختلف این سیال بر رفتار جریان مخلوط موردنظر، مقدار متوسط ویسکوزیته مکانی و زمانی سیال و اندازه سَط ذرات در نظر گرفته شده است. میدان سرعت $\vec{v}(\vec{x}, t)$ برای فاز مخلوط به‌وسیله حل معادلات ناویر-استوکس محاسبه شده است. \vec{x} موقعیت در فضا، و t زمان است. میدان سرعت ذرات $(v_p(\vec{x}, t))$ را می‌توان بر اساس میدان سرعت فاز مخلوط

در مطالعات ابتدایی بر اساس روش سیگما مورد ارزیابی قرار گرفته است [۵]. در این روش پیچیدگی شرایط آشفتگی جریان گذرا و رسوب‌های رشد‌کننده نادیده گرفته می‌شود. این امر باعث ایجاد اختلاف‌هایی بین نتایج ارزیابی عملکرد جداسازی در عمل و مباحث تئوری می‌شود [۳]. برخی مطالعات به‌طور کامل تحلیل شرایط جریان در سانتریفیوژها را بر اساس شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ انجام داده‌اند. در این راستا انواع مختلفی از رویکردها برای شبیه‌سازی جریان‌های چند فاز آشفته مشاهده شده‌اند. رویکردهای مورد استفاده در این زمینه شامل روش‌های استاندارد و توسعه یافته CFD توسط محققان می‌شود [۶]. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در زمینه مبحث جداسازی، این موضوع مشخص شده است که بررسی فرآیند جداسازی سانتریفیوژهای پیوسته و نیمه پیوسته، تا حدودی وابسته به شبیه‌سازی شرایط جریان می‌باشد. لازم به ذکر است که استفاده از مدل‌های ساده‌شده جهت بررسی جریان‌های مختلف ذرات و مایعات، به همراه بررسی آثار رسوب‌دهی نیز نتایج مطلوب و مناسبی را ارائه داده‌اند [۷]. از آنجائی که جریان‌های پیچیده چند فاز در سانتریفیوژها اتفاق می‌افتد، نحوه چیدمان قطعات دستگاه سانتریفیوژ، پارامترهای تنظیمی فرآیند، و ویژگی‌های مواد بر الگوی جریان تأثیر می‌گذارد. گرچه جهت طراحی یک سانتریفیوژ یا فرآیند جداسازی مکانیکی، نیاز به شناخت شرایط جریان می‌باشد، لیکن بررسی تجربی جریان درون سانتریفیوژها بسیار پیچیده است. از این رو CFD جایگزین مناسبی نسبت به آزمایش عملی می‌باشد. در این راستا بورگر و همکاران [۷] فرآیند ایجاد رسوب را به کمک یک رویکرد ساده در سانتریفیوژها بررسی کردند. در این تحلیل رفتار ته‌نشینی مواد تنها با تابع چگالی شار توصیف شده است. نتایج عددی مطابقت خوبی را با نتایج آزمایش‌ها تجربی یک فرآیند سانتریفیوژ نشان داده است.

رومانی و همکاران [۳] نیز فرآیند رسوب را در یک سانتریفیوژ کاسه‌ای با رویکرد اولبر-لاگرانژی^۲ بررسی کردند. جریان هر سه فاز موجود در سانتریفیوژها به‌صورت مکانی و زمانی به‌طور جداگانه حل شد که نیاز به صرف زمان طولانی جهت انجام محاسبات داشته است. بنابراین به‌ناچار مدت زمان کوتاهی جهت تحلیل این فرآیند در نظر گرفته شد. به‌طور کلی تمام روش‌های به‌کاررفته در مطالعات پیشین موجود در تحقیقات گذشته، مصالحه‌ای رابین دقت فیزیکی نتایج و زمان انجام محاسبات در نظر گرفته‌اند، که امری طبیعی به شمار می‌رود.

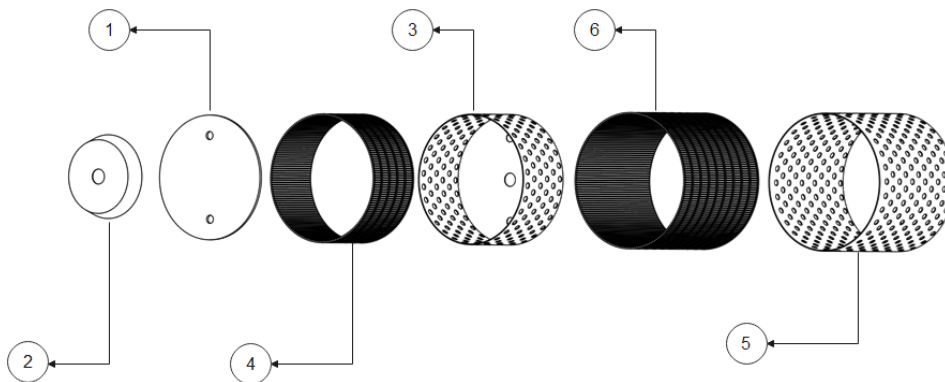
² Euler-Lagrange¹ Computational fluid dynamics (CFD)

آنچه در طرح حاضر مدنظر است، تحلیل ساختار و عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دومرحله‌ای است. در این راستا پس از مدل‌سازی انجام‌شده جهت ایجاد هندسه اعضای اصلی شامل زیرمجموعه‌های سبد داخلی، سبد خارجی، و محفظه تغذیه، مبحث شبیه‌سازی در سه فاز تحلیل مودال^۲، تحلیل رفتار ذرات، و تحلیل دینامیک حالت گذرا^۳ انجام‌شده است. دلیل جداسازی دو بخش تحلیل رفتار ذرات و رفتار دینامیک حالت گذرا، ملاحظات انجام‌شده در زمینه محاسبات المان محدود و دستیابی به دقت موردنیاز است. بخش‌هایی از نتایج تحلیل المان محدود با نتایج تجربی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است. جدول ۱ فهرست قطعات موجود در مدل ایجادشده شکل ۱ را نشان می‌دهد.

سرعت‌تنشینی فضایی $v(\vec{x}, t)$ و v_{Bulk} ارزیابی نمود. این کار باعث کاهش زمان حل نسبت به روش کلاسیک اویلری^۱ می‌شود. در همین راستا جهت لحاظ نمودن رفتارهای مختلف فاز مخلوط از یک ویسکوزیته موقت فضایی $(\eta_{MP}(\vec{x}, t))$ استفاده شده است:

$$\eta_{MP}(\vec{x}, t) = A \cdot \eta_{Susp}(\vec{x}, t) + B \cdot \eta_{Sed}(\vec{x}, t) \quad (1)$$

در رابطه فوق، $\eta_{MP}(\vec{x}, t)$ بر اساس ویسکوزیته مخلوط $(\eta_{Susp}(\vec{x}, t))$ و ویسکوزیته مجازی مواد‌تنشین $(\eta_{Sed}(\vec{x}, t))$ محاسبه شده است. A ضریب مخلوط و B ضریب فضایی‌تنشین است. مقدار A و B بسته به نوع فاز با توجه به شرط مخلوط بودن یا تنشین بودن فاز بین مقدار ۰ و ۱ تغییر می‌کنند [۱۲]. گرچه در این مطالعه از ضرایب جهت ساده‌سازی فرآیند تحلیل مخلوط و بررسی رفتار آن استفاده شده است، راه‌کار ارائه‌شده جهت پیشبرد اهداف تحلیل و شبیه‌سازی قابل تأمل و حتی کاربردی است.



شکل ۱: نمای انفجاری مدل ۳ بعدی ایجادشده جهت انجام تحلیل المان محدود

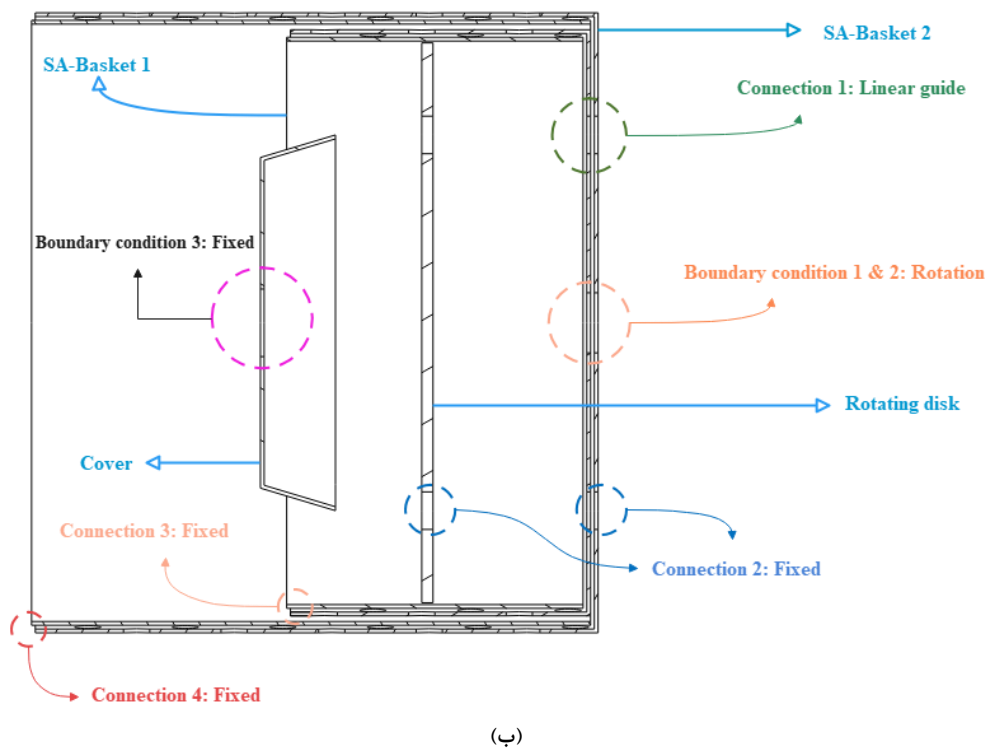
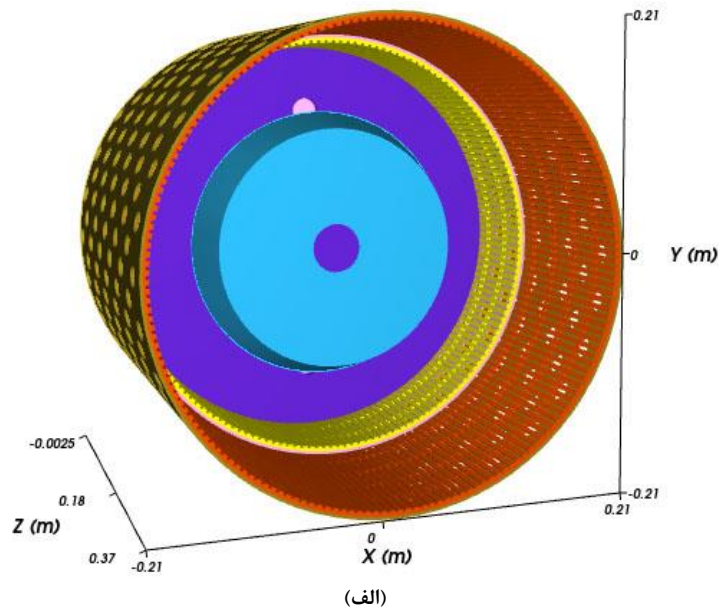
جدول ۱: فهرست قطعات مدل ۳ بعدی ایجادشده

مجموعه کامل			
شماره	قطعه	نوع	تعداد
-	زیرمجموعه سبد ۱	مونتاز	۱
-	زیرمجموعه سبد ۲	مونتاز	۱
۱	دیسک دوار	قطعه	۱
۲	پوسته	قطعه	۱
زیرمجموعه سبد ۱			
۳	سبد ۱	قطعه	۱
۴	شبکه سیمی ۱	قطعه	۱
زیرمجموعه سبد ۲			
۵	سبد ۲	قطعه	۱
۶	شبکه سیمی ۲	قطعه	۱

³ Transient dynamic analysis

¹ Eulerian method

² Modal analysis



شکل ۲: تصویر مدل به کاررفته جهت تحلیل مودال؛ (الف) مدل ۳ بعدی مجموعه واردشده؛ (ب) نمای برش خورده مدل به همراه نمایش اتصالات و شرایط مرزی (جهت سادگی در نمایش، شبکه‌های سیمی به صورت ساده نمایش داده شده‌اند).

۲- مواد و روش‌ها

روش مدل‌سازی سه بعدی و روند شبیه‌سازی انجام شده در اینجا توضیح داده شده است.

۲-۱- مدل ۳ بعدی

نمای انفجاری مجموعه موردنظر (شکل ۱) با طراحی زیرمجموعه سبد داخلی، زیرمجموعه سبد خارجی، دیسک دوار، و پوسته تغذیه طبق هندسه سانتریفیوژ پوشر مدل Ferrum-P-32 ایجاد شد.

۲-۲- شیب‌سازی

تحلیل دینامیک موردنظر در دو مقوله مجزای تحلیل مودال و تحلیل دینامیک گذرا عضو موردنظر انجام شده است.

۲-۱-۲- تحلیل مودال

مراحل کار جهت تعریف شرایط مرزی و اتصالات برای مجموعه کامل و اعضا به صورت زیر قابل تعریف است.

۲-۱-۱-۲- مجموعه کامل

شکل ۲-الف مدل به کاررفته را جهت انجام تحلیل مودال نمایش می‌دهد. جهت انجام تحلیل مودال در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، شرایط مرزی و اتصالات روی مجموعه و اعضاء طبق شکل ۲-ب اعمال شد. جنس به کار گرفته شده برای اعضا فولاد زنگ نزن با کد استاندارد AISI 304 در نظر گرفته شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۲ و خواص فیزیکی و مکانیکی مهم آن در جدول ۳ اشاره شده است.

جدول ۲: ترکیب شیمیایی فولاد AISI 304 به کاررفته در اجزاء [۱۳].

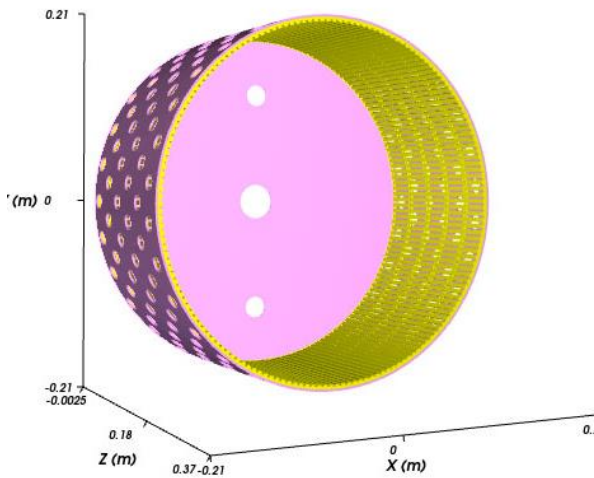
عناصر	مقدار (%)
C	0.08
Cr	18
Fe	65.8
Mn	0
Ni	8
P	0.045
S	0.03
Si	0

جدول ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی به کاررفته برای اجزاء مجموعه [۱۳]

پارامتر	مقدار
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	7960
مدول یانگ (MPa)	197
تنش تسلیم (MPa)	258
تنش کششی (MPa)	565
ضریب پواسون	0.27
سختی (HB)	175
استحکام خستگی (در 10^7 دور) (MPa)	241

۲-۱-۲-۲- زیرمجموعه سبد داخلی

تصویر مدل واردشده از زیرمجموعه سبد داخلی (شامل شبکه سیمی و سبد مشبک) در شکل ۳ مشاهده می‌شود. این زیرمجموعه به صورت جداگانه تحت تحلیل مودال قرار گرفته است.



شکل ۳: مدل زیرمجموعه سبد داخلی

۲-۲-۲- تحلیل رفتار دینامیک

در ابتدای امر روش‌های متفاوت موجود از جهت قابلیت انجام و دقت مورد ارزیابی قرار گرفتند تا گزینه مناسب انتخاب شود. از آنجائی که مواد ورودی و خروجی دستگاه به صورت مواد دانه‌ای مجزاً (پودر) می‌باشد، موارد زیر را می‌توان به عنوان رویکردهای مختلف جهت انجام چنین تحلیلی اشاره نمود:

- تحلیل به صورت دینامیک انعطاف‌پذیر^۱ به همراه تحلیل دینامیک سیالاتی^۲: این روش یکی از پیچیده‌ترین و زمان‌برترین رویکردهایی است که می‌توان جهت شبیه‌سازی چنین مسئله‌ای به آن پرداخت. گرچه از لحاظ فرضیات می‌توان گفت که چنین روشی به واقعیت نزدیک‌تر است، لیکن دینامیک انعطاف‌پذیر عضو موردنظر با توجه به هندسه نسبتاً پیچیده مشبک، و علاوه بر آن محاسبه هم‌زمان سیالاتی جهت بررسی رفتار پودر نمک، حل مسئله را تقریباً غیرممکن می‌سازد.
- تحلیل به صورت دینامیک انعطاف‌پذیر به صورت مجزاً نسبت به تحلیل دینامیک ذرات المان گسسته^۳: در این روش یک‌بار عمل شبیه‌سازی به صورت دینامیک اجسام صلب^۴ جهت بررسی رفتار دینامیکی ذرات انجام می‌شود. به این ترتیب میزان تماس، توزیع فشار، و تأثیر بار تصادفی ناشی از ذرات روی عضو موردنظر به دست می‌آید. بنابراین می‌توان رفتار بار نامتعادل دینامیک ناشی

³ Discrete element method (DEM)

⁴ Multi body dynamics (MBD)

¹ Multi flexible body dynamics (MFBD)

² Computational fluid dynamics (CFD)

- **تعریف حرکات**

حرکات دورانی و نوسان موردنیاز طبق مقادیر به‌دست‌آمده از عملکرد واقعی دستگاه، روی دیسک، زیرمجموعه سبد داخلی، و زیرمجموعه سبد خارجی اعمال شد. جدول ۵ مقادیر اعمال‌شده را نشان می‌دهد.

- **نرخ ته‌نشینی ذرات**

جهت لحاظ نمودن پدیده ته‌نشینی ذرات ناشی از نیروی گریز از مرکز در سیال جهت بررسی رفتار ذرات طی فرآیند شبیه‌سازی و تبدیل آنها به توده فیلتر شده (کیک) از نتایج آزمایش‌ها رینولد و سوکولوف^۱ [۶] استفاده شد. طبق نتایج این آزمایش‌ها، سرعت ته‌نشینی (u) را می‌توان در شعاع r یک ناحیه متلاطم برحسب m^3/s به‌صورت زیر نمایش داد:

$$u(r) = 1.75 \eta_1 \left[\frac{d\omega^2 r (\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} \right]^{0.5} \quad (2)$$

که در آن:

$$\eta_1 = (1 - x_s)^{5.5} \quad (3)$$

که در آن η_1 ضریب اصلاحی سرعت ته‌نشینی، x_s نسبت جامد (پودر) بر مخلوط، d قطر متوسط ذرات، ρ_l چگالی سیال، ρ_s چگالی جامد (پودر)، و ω سرعت زاویه‌ای سیال در شعاع r است. این سرعت (ω) را می‌توان به کمک رابطه زیر محاسبه نمود [۶]:

$$\omega(r) = \omega_0 \left[1 - \left(\beta \times \frac{Q}{\nu^{0.5} \cdot r_1} \right) \cdot \frac{\left(\frac{r_2}{r} \right)^2 - 1}{\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1} \right] \quad (4)$$

که در آن ω_0 سرعت زاویه‌ای سبد، r_1 شعاع سطح آزاد (سطحی از سیال که در داخل سبد در حال دوران است و با هوا در تماس است، و دیده می‌شود)، r_2 شعاع دیواره سبد (شبکه سیمی)، Q دبی ورودی مخلوط سیال و پودر، ν ویسکوزیته سینماتیک سیال، و $\beta = 2.6 \times 10^{-7} \frac{\sqrt{s}}{m}$ است. مقادیر در نظر گرفته‌شده برای رابطه (۲) تا (۴) در جدول ۶ اشاره شده‌است.

از ذرات را استخراج نمود و از آن جهت یافتن تابع اعمال بار این ذرات روی عضو موردنظر استفاده کرد. البته باید به این نکته توجه نمود که این تابع بارگذاری، وابسته به زمان و موقعیت محیطی در داخل عضو است. همچنین لازم به ذکر است که مدت زمان پایداری رفتار ذرات در تحلیل دینامیک ذرات المان گسسته به دست می‌آید. به‌عبارت‌دیگر از زمانی که عضو از حالت سکون شروع به حرکت می‌کند تا زمانی که به‌سرعت ثابت می‌رسد ملاک قطعی جهت ثبات رفتار این تابع نخواهد بود؛ بلکه باید مدت زمان ثبات رفتار بار را با توجه به تحلیل دینامیکی و نرخ خروج ذرات به دست آورد.

با توجه به رویکرد دوم می‌توان مراحل بحث تحلیل را به این صورت عنوان نمود:

- شبیه‌سازی المان گسسته ذرات
- استخراج تابع بارگذاری (توزیع تنش)
- تحلیل دینامیک حالت گذرا
- استخراج خروجی‌های مکانیکی شامل توزیع تنش و کرنش روی عضو موردنظر

۲-۲-۱- شبیه‌سازی المان گسسته ذرات

جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیک پودر و ذرات تغذیه شونده، از نرم‌افزار EDEM Rocky به‌صورت تحلیل المان گسسته ذرات استفاده شد. مراحل کار به‌طور اجمالی در زیر تشریح شده‌است.

- **مدل ۳ بعدی**

شکل ۲-الف مجموعه واردشده را جهت شبیه‌سازی رفتار ذرات در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

- **تغذیه‌کننده ذرات**

منفذ ورودی تغذیه‌کننده، با قطری برابر با قطر پوسته بخش تغذیه‌کننده در نزدیکی سوراخ مرکزی تعریف‌شده است (شکل ۲-الف). جدول ۴ مشخصات اعمال‌شده در نرم‌افزار را برای ورودی تغذیه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که غلظت ذرات در سیال آب ۱۸٪ و زمان تغذیه از ابتدای شبیه‌سازی تا زمان ۸ s در نظر گرفته شده‌است.

¹ Reynold and Sokolov

جدول ۴: مشخصات ذرات تغذیه‌کننده در داخل محفظه در داخل نرم‌افزار

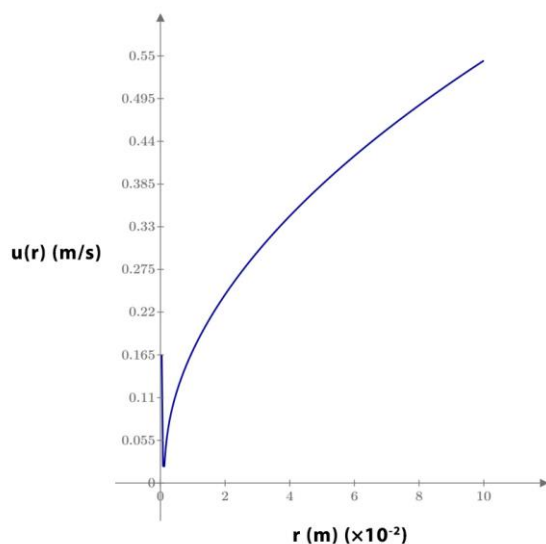
پارامتر	جرم ذره (kg)	حجم ذره (m ³)	چگالی ذره (kg/m ³)	دبی ورودی ذرات (جرمی) (kg/s)	دبی ورودی ذرات (حجمی) (m ³ /s)
مقدار	424 × 10 ⁻⁶	1.96 × 10 ⁻⁷	2163	0.56	2.6 × 10 ⁻⁴

جدول ۵: مقادیر پارامترهای سینماتیک اعمال شده در داخل نرم‌افزار روی اجزا

عضو	سرعت دورانی (rad/s)	فرکانس نوسان (Hz)	دامنه حرکت (m)
دیسک دوآر	36.65	.	.
پوسته بخش تغذیه	.	.	.
زیرمجموعه سبد داخلی	36.65	0.5	0.025
زیرمجموعه سبد خارجی	36.65	.	.

جدول ۶: مقادیر در نظر گرفته شده برای رابطه (۲) تا (۴) جهت محاسبه نرخ ته‌نشینی ذرات

پارامتر	d (m)	ρ _s (kg/m ³)	ρ _l (kg/m ³)	x _s	ω ₀ (rad/s)	r ₁ (m)	r ₂ (m)	v (m ² /s)	Q (m ³ /s)
مقدار	0.0072	2163	1000	0.2	36.65	0.18	0.1925	10 ⁻⁶	0.002513



شکل ۴: نرخ ته‌نشینی ذرات (u(r)) در داخل محیط سبد داخلی (شبهه سیمی) نسبت به شعاع (r)

شکل ۴ نرخ ته‌نشینی ذرات (u(r)) در داخل محیط سبد داخلی (شبهه سیمی) نسبت به شعاع (r) نشان می‌دهد. همچنین با توجه به رابطه (۲)، تغییرات سرعت برای شعاع سطح آزاد (r₁) و حداکثر (r₂) به صورت $u(r_1) = 0.73 \frac{m}{s}$ و $u(r_2) = 0.755 \frac{m}{s}$ به دست می‌آید که نشان‌دهنده تغییرات اندک این پارامتر در راستای شعاع است. بنابراین تغییرات به دست آمده و نرخ ته‌نشینی ذرات تأثیر اندکی روی تغییرات بار و عدم تعادل رفتار آن طی فرآیند دارد و قابل چشم‌پوشی است. این موضوع در مطالعات اخیر نیز قابل مشاهده است [۱۴، ۱۵].

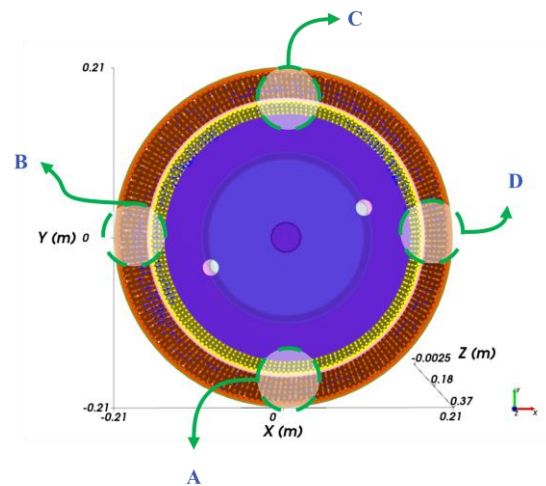
• استخراج تابع بارگذاری (توزیع تنش)

گرچه نقاط تماس طی فرآیند شبیه‌سازی متغیر است، لیکن انتخاب نقاط حساس جهت بررسی تماس ایجاد شده و استخراج توزیع تنش متغیر مناسب در مراحل بعدی شبیه‌سازی اهمیت دارد. جهت استخراج بارگذاری زمانی متغیر از نقاط موجود در این محدوده استفاده شده است. بنابراین استخراج مقادیر توزیع تنش به کمک تعریف محدوده بازرسی ۶^۱ وجهی در نقاط A تا D، به صورت محیطی و طولی در نرم‌افزار تحلیل رفتار ذرات با استخراج نمودارهای میانگین تنش-زمان انجام شد (شکل ۵).

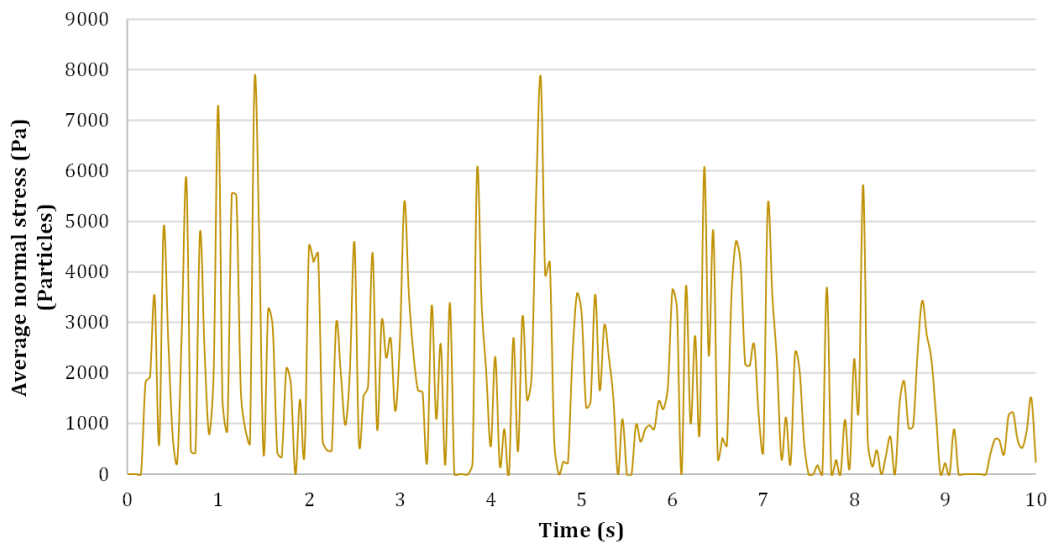
¹ Inspector cells (cubes)

لازم به ذکر است که انتخاب این نقاط با توجه به هندسه دوار و حرکت دورانی مکانیزم انتخاب شده است. می‌توان گفت که نقاط A و C در دو انتهای متقابل از جهت اعمال فشار وزن ذرات قرار گرفته‌اند. به این معنا که هر دونقطه از جهت نیروی گریز از مرکز، تحت تنش قرار می‌گیرند، درحالی‌که نقطه A علاوه بر این نیرو، متحمل نیروی وزن نیز خواهد بود. همچنین نقاط B و D در منتهی‌الیه شرایط مرزی افقی قرار دارند که بنابراین یکی از نقاط حدی در این تحلیل محسوب می‌شود.

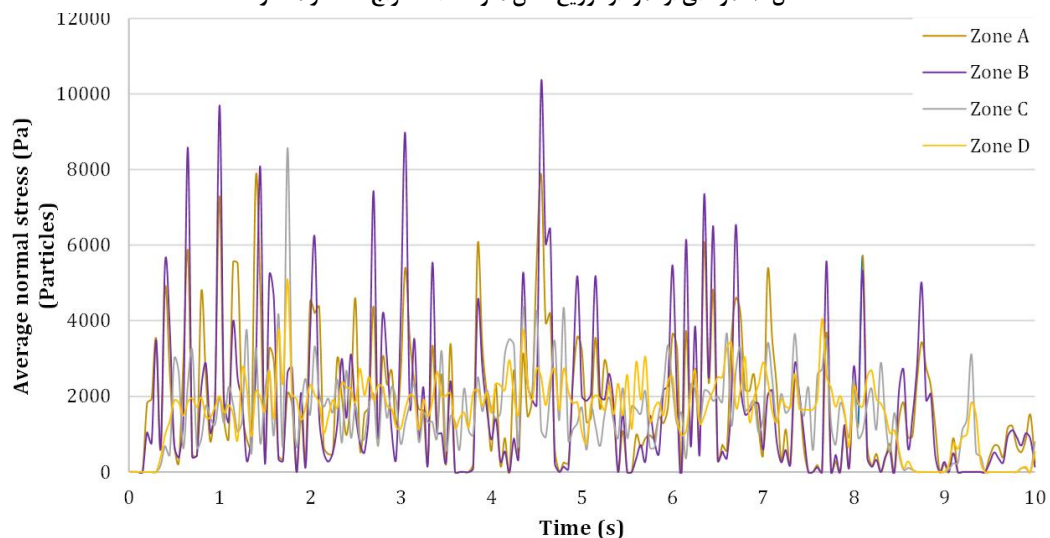
شکل ۶ نمودار تغییرات تنش قائم اعمال شده بر ناحیه A را به‌عنوان نمونه نمایش می‌دهد. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد، تغییرات مقدار بار در محدوده مشخصی (بین ۰ تا ۵۰۰۰ Pa) تکرار شده است.



شکل ۵: نقاط بازرسی تعریف شده در نرم‌افزار جهت استخراج نمودار توزیع تنش متوسط برحسب زمان (جهت سادگی در نمایش، پوسته بخش تغذیه مخفی شده است).



شکل ۶: نمونه‌ای از نمودار توزیع تنش متوسط استخراج شده در محدوده A



شکل ۷: تغییرات تنش اعمال شده روی نواحی A تا D در داخل زیرمجموعه سبد داخلی

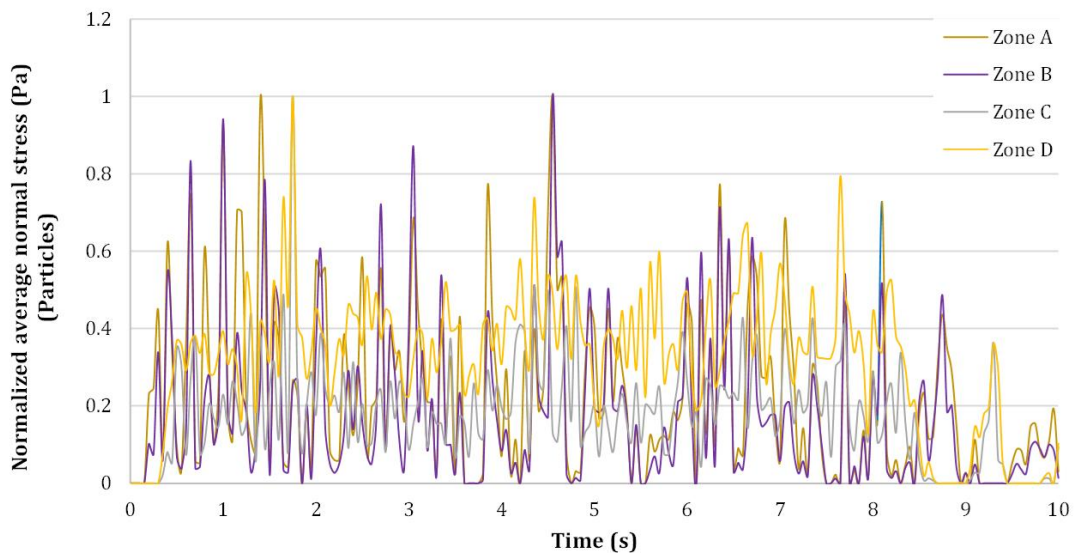
ابتدا مقادیر توزیع تنش هر ۴ ناحیه طبق شکل ۷ در طول مدت انجام شبیه‌سازی استخراج شد.

• محاسبه مقادیر نرمالیزه تغییرات بار

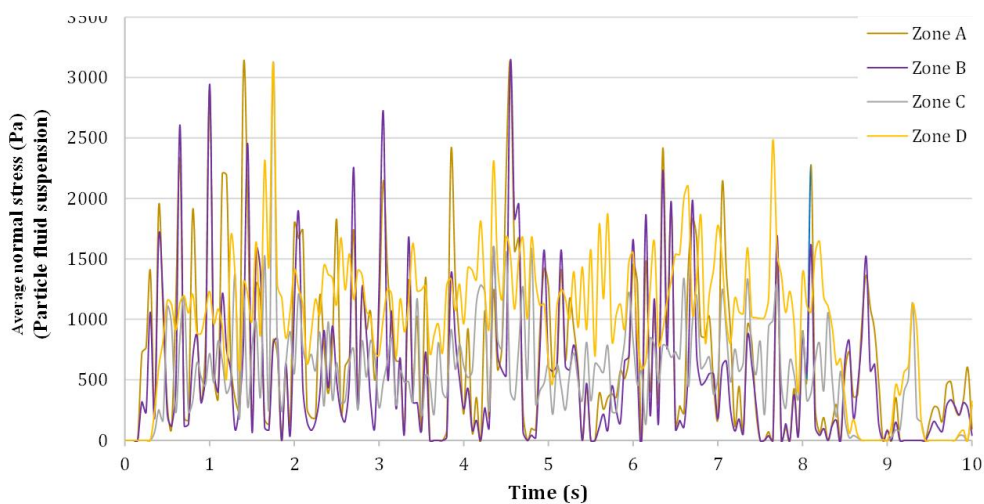
در این مرحله تابع نرمالیزه میانگین تغییرات بار در بازه بین ۰ تا ۱، با در نظر گرفتن مقادیر بیشینه و کمینه (۰) در بازه تغییرات موردنظر طبق شکل ۸ به دست آمد.

مقادیر به دست آمده از نواحی A تا D به صورت جدول تنش-زمان استخراج شده است و جهت تحلیل دینامیک حالت گذرا، به صورت غیرمستقیم به عنوان ضریب تابع تنش وابسته به زمان در سطح داخلی سبد داخلی اعمال شده است. جهت انجام این کار مراحل زیر طی شد.

• استخراج مقادیر توزیع تنش هر ناحیه



شکل ۸: مقادیر نرمالیزه میانگین تغییرات تنش اعمال شده روی نواحی A تا D در داخل زیرمجموعه سبد داخلی

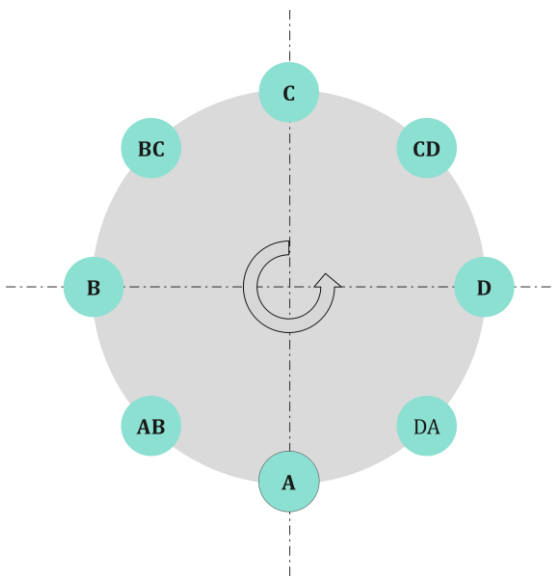


شکل ۹: مقدار تنش بر حسب زمان ناشی از مخلوط سیال و ذرات جهت اعمال در داخل زیرمجموعه سبد داخلی جهت تحلیل رفتار دینامیک در حالت گذرا

جدول ۷: مقادیر در نظر گرفته شده برای رابطه (۵) جهت محاسبه تنش (فشار) ناشی از مخلوط

پارامتر	$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	$\omega \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$	$R \text{ (m)}$	$r_1 \text{ (m)}$
مقدار	1000	36.65	0.1925	0.18

مقادیر لحاظ نمود. جهت دستیابی به این هدف، مقدار نرمالیزه توزیع بار هر ناحیه در نمودار شکل ۹ ضرب شده است و حاصل ضرب آن به عنوان تابع زمانی مورد نیاز جهت اعمال در تحلیل دینامیک حالت گذرا در نظر گرفته شده است. همچنین جهت افزایش دقت تحلیل در مرحله تحلیل دینامیک گذرا، نواحی مابین ناحیه‌های ۴ گانه، در نظر گرفته شده است و مقادیر آنها با انجام میان‌یابی محاسبه شده است. شکل ۱۰ چیدمان نهایی نواحی A تا D و نواحی میان‌یابی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: تصویر شماتیک چیدمان نواحی A تا D و نواحی میان‌یابی شده (AB تا DA)

• محاسبه تابع بارگذاری مخلوط

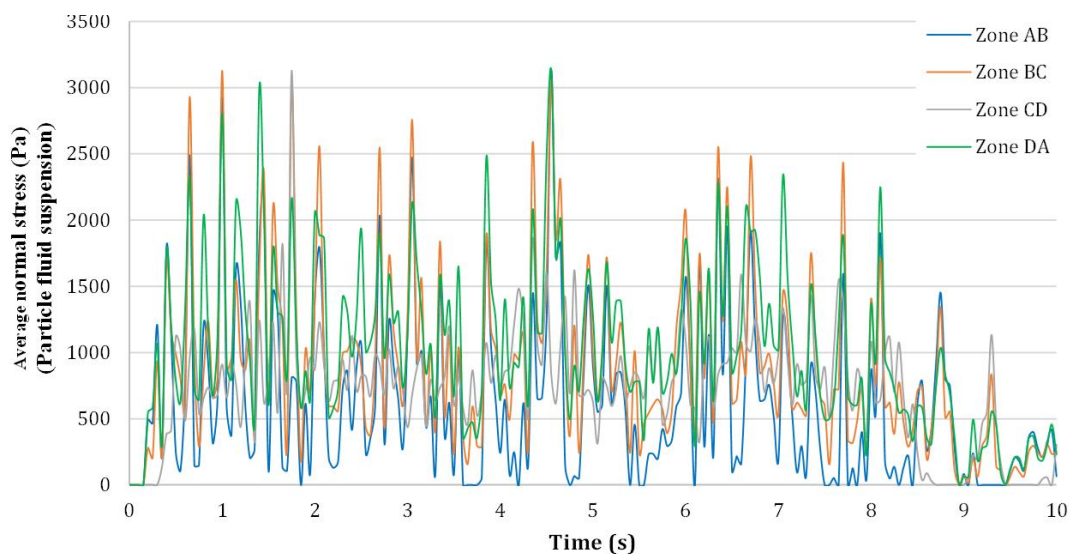
از آنجائی که ذرات پودر به صورت مخلوط با سیال در داخل مجموعه تغذیه می‌شوند، توزیع فشار نهایی ترکیبی از فشار ایجاد شده ناشی از سیال و ذرات خواهد بود. به این دلیل توزیع تنش نهایی به صورت حاصل ضرب مقادیر نرمالیزه تنش ناشی از ذرات در فشار هیدرولیک سانتریفیوژ در نظر گرفته شده است. فشار هیدرولیک ایجاد شده ناشی از سیال، روی دیواره سبد را می‌توان از طریق رابطه زیر محاسبه نمود [۱۶]:

$$p_c = \rho \omega^2 \int_{r_1}^R r dr = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (R^2 - r_1^2) \quad (5)$$

که در آن p_c فشار هیدرولیک سانتریفیوژ، ρ چگالی سیال، ω سرعت دورانی سبد، r شعاع، R شعاع سبد، و r_1 شعاع سطح آزاد سیال است. منظور از سطح آزاد، سطحی از مخلوط سیال و ذرات است که با هوا تماس دارد. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای فوق در جدول ۷ اشاره شده است.

بنابراین توزیع تنش (فشار) ناشی از مخلوط سیال و ذرات، جهت اعمال در بخش تحلیل دینامیک گذرا به صورت شکل ۹ در نظر گرفته شده است.

از آنجائی که نمودار به دست آمده در شکل ۹، توزیع فشار را در هر زمان به طور یکنواخت در محیط داخلی فرض می‌کند، عدم تعادل در بارگذاری در موقعیت‌های زاویه مختلف لحاظ نمی‌شود. بنابراین نیاز است که به نوعی این عدم تعادل در بارگذاری نواحی مختلف در نظر گرفته شود. در واقع باید به نوعی میزان اختلاف بار بین نواحی را



شکل ۱۱: مقادیر محاسبه شده تنش مخلوط سیال و ذرات برای نواحی میان‌یابی شده AB تا DA

[۲۰-۱۷]. با توجه به مقادیر به دست آمده در این مطالعات، مقدار متوسط نیروی اندازه‌گیری شده در اثر تماس ذرات با سطوح داخلی سبد حدود ۹٪ متفاوت بوده است. همچنین تفاوت میانگین مقدار جابجایی نسبی به دست آمده در آزمون عملی نسبت به نتایج به دست آمده در اینجا حدود ۴٪ بود. دلایل این پراکندگی بین مقادیر تجربی و شبیه‌سازی را می‌توان به عواملی مانند ساده‌سازی مفروضات اعمال شده در هندسه، دقت اندازه‌گیری در دینامومترها و کرنش‌سنج‌ها و ساده‌سازی فرضیات در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی مرتبط دانست.

۳-۱- تحلیل مودال

خروجی‌های به دست آمده در این بخش شامل نمایش نسبت جابجایی‌های ایجاد شده در اعضاء و محاسبه فرکانس طبیعی آنها می‌باشد. در اینجا جهت تفسیر نتایج تحلیل مودال انجام شده ابتدا فرکانس‌های طبیعی مجموعه و زیرمجموعه سبد داخلی با فرکانس ارتعاش کاری معمول دستگاه مقایسه شده است. سپس پدیده تشدید برای مود بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از مود بحرانی مودی است که در آن بیشترین جابجایی رخ می‌دهد. همچنین مقایسه‌ای بین فرکانس طبیعی مجموعه و زیرمجموعه سبد داخلی انجام شده است.

شکل ۱۳ میزان جابجایی بیشینه را در مود اول تحلیل مودال انجام شده نشان می‌دهد. نتیجه به دست آمده برای تمام مودها به صورت اجمالی در شکل ۱۴ ارائه شده است. مقادیر فرکانس طبیعی برای شکل ۱۴ در جدول ۸ اشاره شده است.

لازم به ذکر است که با توجه به سرعت دورانی دستگاه طبق جدول ۵ (36.65 rad/s)، می‌توان به این نتیجه دست یافت که فرکانس ارتعاش معمول کاری دستگاه می‌تواند 5.83 Hz است. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۱۴ و جدول ۸ فرکانس‌های طبیعی مدها از فرکانس ارتعاش کاری معمول دستگاه متفاوت است. بنابراین احتمال بروز پدیده تشدید برای مجموعه قابل چشم‌پوشی است. آنچه در اینجا از اهمیت بالاتری برخوردار است، اختلاف نسبتاً کم مقدار فرکانس ارتعاشی دستگاه و فرکانس طبیعی در مود ارتعاشی دوم (شکل ۱۴-ب)) با مقدار 8.15 Hz طبق جدول ۸ است. گرچه تفاضل این دو مقدار احتمال بروز پدیده تشدید را به صورت قابل توجهی افزایش نمی‌دهد، لیکن توجه به آن حائز اهمیت است و باید در دستورالعمل استفاده از دستگاه مدنظر قرار گیرد.

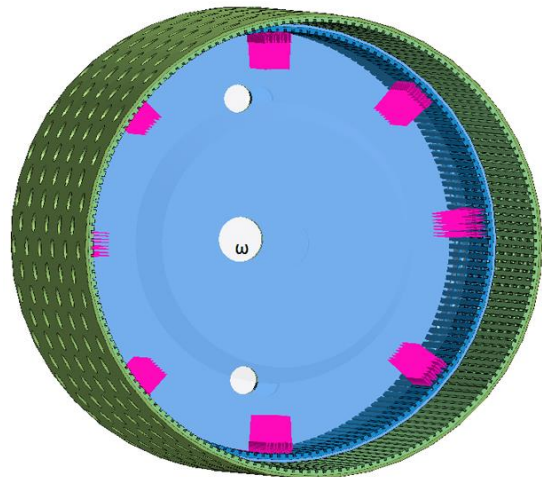
شکل ۱۱ نمودار مقادیر توزیع تنش نهایی محاسبه شده را برای نواحی میانبایی شده AB تا DA نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- تحلیل دینامیک حالت گذرا

مجموعه وارد شده در نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیک حالت گذار در شکل ۲-الف نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که شرایط مرزی و اتصالات مشابه آنچه در بخش تحلیل مودال مطرح شد (شکل ۲-ب) انجام شده است، لیکن پارامترهای سینماتیک و دینامیک طبق جدول ۵ تعریف شده است.

جهت اعمال توزیع تنش دینامیک استخراج شده از بخش تحلیل رفتار ذرات توابع توزیع تنش زمانی به صورت توابع جدولی، در نواحی A تا D تعریف شد. بارگذاری متغیر مذکور برای سایر نواحی AB تا DA به طریق مشابه تعریف شد.

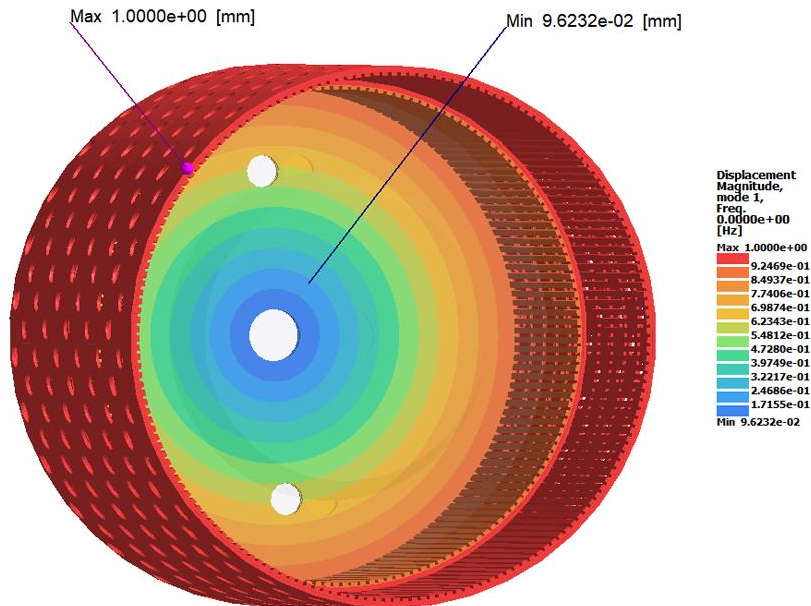
جهت تعریف دوران و اینرسی ناشی از آن روی مجموعه با سرعت زاویه‌ای مطلوب (جدول ۵)، سرعت زاویه‌ای برای کل مجموعه تعریف شد. همچنین جهت تعریف حرکت رفت و برگشتی زیرمجموعه سبد داخلی با فرکانس موردنظر (جدول ۵)، حرکت متناوب سینوسی روی زیرمجموعه سبد داخلی در نظر گرفته شد. شکل ۱۲ مجموعه آماده شده را به همراه بارگذاری‌ها و حرکات اعمال شده نمایش می‌دهد.



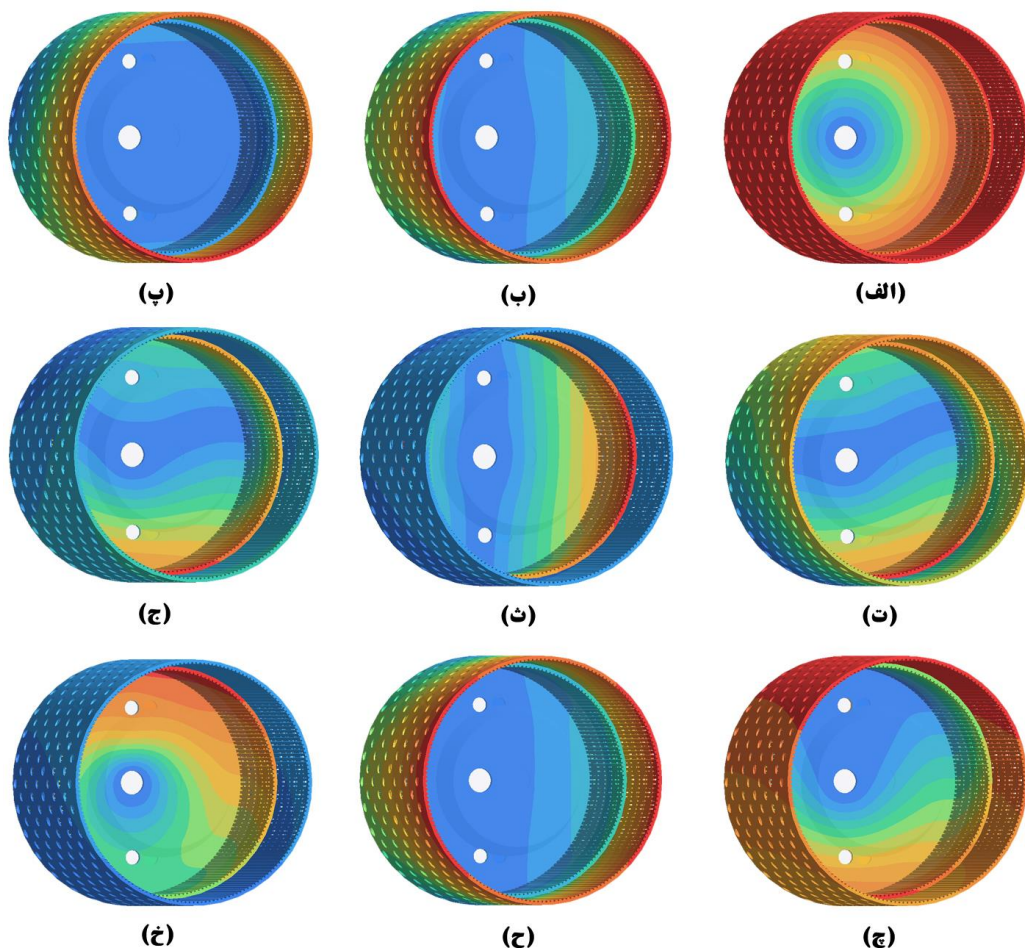
شکل ۱۲: مجموعه با تعریف بارگذاری موردنظر و حرکت متناوب زیرمجموعه داخلی (جهت نمایش وجوه داخلی، بخش تغذیه (دیسک دوآر و پوسته) مخفی سازی شده است).

۳- نتایج و بحث

نتایج تجربی در محدوده مقادیر نیرو و جابجایی نسبی بر اساس مطالعات قبلی انجام شده در این زمینه مورد اعتبارسنجی قرار گرفت



شکل ۱۳: نتیجه به دست آمده از تحلیل مودال انجام شده روی مجموعه در مود ۱ در قالب کانتور رنگی جابجایی بیشینه نسبی



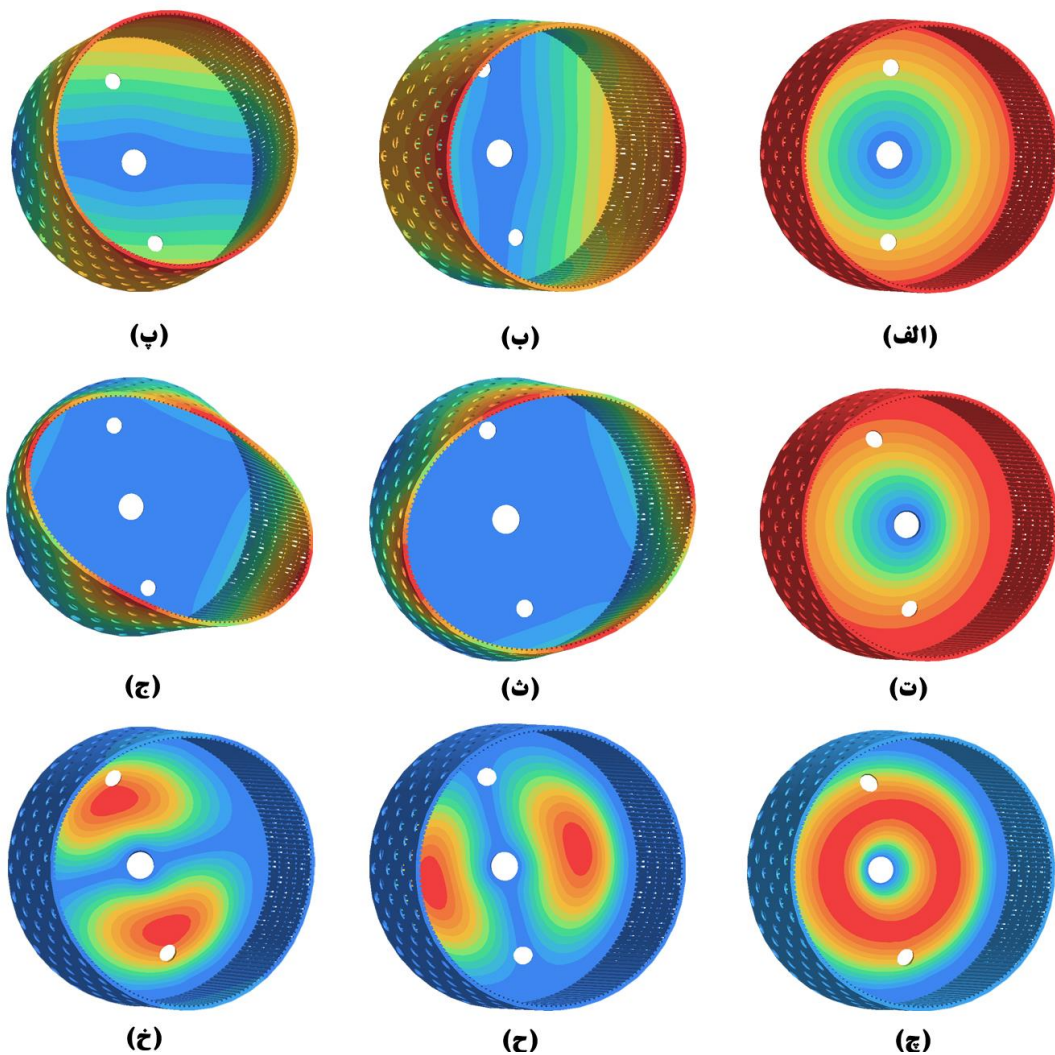
شکل ۱۴: نتایج تحلیل مودال انجام شده روی مجموعه در قالب کانتور رنگی جابجایی بیشینه نسبی: (الف) مود ۱؛ (ب) مود ۲؛ (پ) مود ۳؛ (ت) مود ۴؛ (ث)؛ مود ۵؛ (ج)؛ مود ۶؛ (د)؛ مود ۷؛ (ح)؛ مود ۸؛ (خ)؛ مود ۹؛ (طیف تغییرات حداقل (آبی) تا حداکثر (قرمز) برای تمام تصاویر یکسان است).

جدول ۸: مقادیر فرکانس طبیعی در مدهای ارتعاشی مورد بررسی مجموعه

مقدار فرکانس طبیعی (Hz)	شماره مد	مقدار فرکانس طبیعی (Hz)	شماره مد
23.49	۶	0.00	۱
27.76	۷	8.15	۲
29.61	۸	9.42	۳
42.11	۹	20.60	۴
		21.59	۵

مقدار بالایی برخوردار است که می‌تواند نمایانگر تشدید در این مود باشد. لیکن با مقایسه مقدار فرکانس طبیعی این مود و محدوده فرکانس معمول کاری دستگاه (۵.۸۳ Hz) مشخص می‌شود که احتمال بروز تشدید با توجه به محاسبات در این عضو ناچیز است.

در مورد فرکانس تشدید زیرمجموعه سبد داخلی موضوع کمی متفاوت به نظر می‌رسد. گرچه در اینجا نیز طبق شکل ۱۵-الف)، میزان جابجایی در مد اول نسبتاً بالا است، اما مود ۴ (شکل ۱۵-ت)) در مورد زیرمجموعه سبد داخلی دارای اهمیت است. همان‌طور که در این مود مشاهده می‌شود، جابجایی نسبی، نسبت به سایر مودها از



شکل ۱۵: نتایج تحلیل مودال انجام شده روی زیرمجموعه سبد داخلی در قالب کانتور رنگی جابجایی بیشینه نسبی؛ (الف) مود ۱؛ (ب) مود ۲؛ (پ) مود ۳؛ (ت) مود ۴؛ (ث) مود ۵؛ (ج) مود ۶؛ (چ) مود ۷؛ (ح) مود ۸؛ (خ) مود ۹؛ (طیف تغییرات حداقل (آبی) تا حداکثر (قرمز) برای تمام تصاویر یکسان است).

جدول ۹: فرکانس‌های طبیعی در مدهای ارتعاشی مورد بررسی زیرمجموعه سبد داخلی

شماره مد	مقدار فرکانس طبیعی (Hz)	شماره مد	مقدار فرکانس طبیعی (Hz)
۱	0.01	۶	178.35
۲	12.80	۷	394.29
۳	13.06	۸	425.07
۴	32.11	۹	433.89
۵	177.61		

۳-۲-۱- رفتار ذرات

نقاط پرتماس ایجاد شده در وسط زمان فرآیند شبیه‌سازی در شکل ۷ و شکل ۸ روی زیرمجموعه سبد داخلی مشاهده می‌شود. از آنجائی که مدت زمان تغذیه از ابتدای آغاز شبیه‌سازی تا زمان ۸ s در نظر گرفته شده است، طبق آنچه در نمودار شکل ۷ مشخص است، تنش‌های ایجاد شده پس از اتمام تغذیه روند کاهشی داشته است. علت این امر خروج تدریجی ذرات موجود در سبد داخلی بوده است که در هر بار رفت و برگشت بخشی از ذرات به زیرمجموعه سبد خارجی انتقال یافته‌اند. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، محدوده معمول مقادیر تنش‌ها بین ۰ تا ۴۰۰۰ Pa بوده است. با توجه مساحت بخش مورد نظر در نواحی A تا $D (0.004 \text{ m}^2)$ می‌توان نیروی متوسط اعمال شده روی این نواحی را بین ۰ تا ۱۶ N تخمین زد. دلیل تغییرات مشاهده شده در این نمودار تماس‌های پی‌درپی و تصادفی ذرات با ناحیه مورد نظر است که باعث ایجاد نوسانات در مقدار به‌دست آمده شده است. داده‌های به‌دست آمده از این بخش نشان می‌دهد که عضو مورد نظر از لحاظ مکانیکی استحکام لازم را در برابر تنش دینامیک ایجاد شده از ذرات را دارد.

۳-۲-۲- رفتار دینامیک حالت گذرا

شکل ۱۶ نتایج حاصل از تحلیل دینامیک حالت گذرا را برای مجموعه نشان می‌دهد. جهت سادگی در نمایش، پوسته بخش تغذیه مخفی شده است. طبق شکل ۱۶-الف) میزان جابجایی ایجاد شده در مجموع برای نقاط محیطی و انتهایی بیشتر است. در واقع با دورتر شدن از نقاط درگیری انتقال قدرت، میزان جابجایی بیشتر شده است که امری طبیعی است. البته مقدار جابجایی مشاهده شده قابل چشم‌پوشی است. لازم به ذکر است که در تحلیل انجام شده، میزان جابجایی به‌صورت لحظه‌ای محاسبه شده است. به‌بیان دیگر، میزان جابجایی در یک بازه زمانی کوچک و موقت در نظر گرفته شده است و سرعت و شتاب ایجاد شده در اینجا انجام بررسی نشده است. همان‌طور که در شکل

در مجموع باید بیان نمود که با مقایسه مقدار فرکانس کاری معمول دستگاه با تمام مقادیر فرکانس طبیعی مجموعه مورد نظر (جدول ۸) و زیرمجموعه سبد داخلی (جدول ۹) هیچ‌یک از مدهای محاسبه شده با فرکانس ارتعاش کاری دستگاه برابر نیست. گرچه طبق جدول ۸، مقدار فرکانس طبیعی به‌دست آمده برای مود ۲ مجموعه اختلاف کمتری نسبت به سایر مقادیر دارد، لیکن از آنجائی که این مقدار (۸.۱۵ Hz) از فرکانس ارتعاش کاری دستگاه (۵.۸۳ Hz) بیشتر است، رسیدن به این مقدار عملاً اتفاق نمی‌افتد. بنابراین می‌توان حاشیه ایمنی حاصل از این مقایسه را ۴۰٪ تخمین زد.

با مقایسه مستقیم مقادیر فرکانس طبیعی در جدول ۸ و جدول ۹ این نتیجه به دست می‌آید که کمترین مقدار تفاضل (۲.۵ Hz) برای مود ۸ مجموعه و مود ۴ زیرمجموعه سبد داخلی است. لیکن به دلیل تفاوت مودها و بنابراین مکانیزم ارتعاشی، این دو مود از لحاظ تشدید به‌طور مستقیم با یکدیگر قابل مقایسه نیستند و نمی‌توان نتیجه معناداری از این مقایسه دریافت نمود. لیکن آنچه از اهمیت بالاتری برخوردار است، تفاضل اندک (۳.۶۴ Hz) بین مقادیر فرکانس طبیعی مود ۳ برای مجموعه و زیرمجموعه مورد نظر است. نتیجه مشابهی را می‌توان برای مود ۲ مجموعه و زیرمجموعه مشاهده نمود. طبق شکل ۱۵-ب)، این مود ارتعاشی مربوط به جابجایی حول یک محور افقی در صفحه کف می‌شود. از آنجاکه چنین جابجایی و حرکتی را نمی‌توان به‌طور مستقیم با عملکرد طبیعی دستگاه به دست آورد، می‌توان به این نتیجه رسید که چنین ارتعاشی دور از انتظار است.

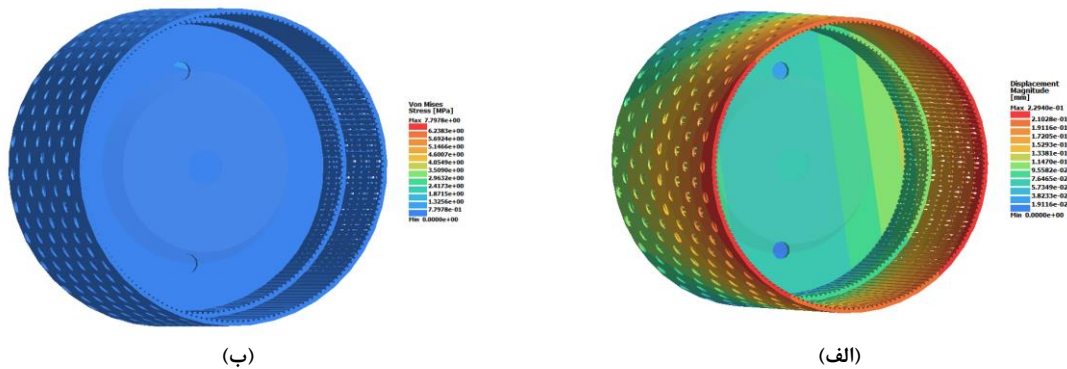
۳-۲-۳- رفتار دینامیک

در این بخش پارامترهای توزیع تنش و جابجایی ایجاد شده به‌طور خاص مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که منظور از جابجایی در تحلیل دینامیک حالت گذرا یا موقت، جابجایی لحظه‌ای یا دیفرانسیلی است و جابجایی سینماتیک و نمایش حرکت نیاز به تحلیل دیگری دارد که در اینجا به‌طور مستقیم مدنظر نمی‌باشد.

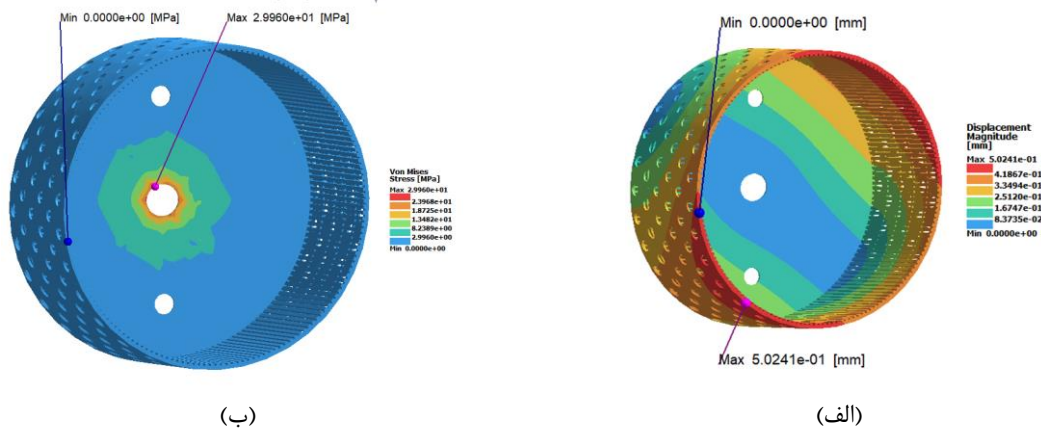
بحث توزیع تنش (شکل ۱۷-ب)) به صورت منظم‌تری مشاهده شده است. به این معنا که مقادیر تنش در اطراف سوراخ مرکزی حداکثر، و در نقاط محیطی کمترین مقدار را دارد. همچنین در صفحه کف سبد، مقادیر تنش در حلقه خارجی در حد اندکی بیش از حلقه داخلی است. در مورد توزیع تنش سوراخ‌های میله هادی تفاوت خاصی نسبت به حلقه داخلی مشاهده نشده است. بنابراین توزیع تنش ایجاد شده در صفحه کف سبد را می‌توان از لحاظ اهمیت به صورت شماتیک در شکل ۱۸ تقسیم‌بندی نمود.

۱۶- (ب) مشاهده می‌شود، مقدار توزیع تنش ایجاد شده در زیرمجموعه سبد خارجی قابل چشم‌پوشی است و آنچه باید تحت بررسی قرار گیرد زیرمجموعه سبد داخلی است.

شکل ۱۷ نتایج حاصل از تحلیل دینامیک حالت گذرا را برای زیرمجموعه سبد داخلی نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر توزیع جابجایی (شکل ۱۷-الف)) مشاهده می‌شود، طبیعتاً جابجایی بیشتر در نقاط محیطی و اطراف بیشتر از بخش‌های مرکزی و سوراخ است، البته مقدار آن ناچیز است و قابل چشم‌پوشی است. نکته دیگری که در این تصویر مشاهده می‌شود این است که توزیع جابجایی ایجاد شده در صفحه کف سبد به صورت لایه‌ای تغییرات داشته است. به بیان دیگر، این تغییرات به صورت شعاعی یا حلقه‌ای نبوده است. البته جهت دوران تعریف شده در عضو، در این موضوع بی‌تأثیر نیست. این قضیه برای



شکل ۱۶: جابجایی و تغییر شکل ایجاد شده (الف) به همراه توزیع تنش (ب) روی مجموعه در وضعیت بحرانی در قالب کانتور رنگی طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حال گذرا



شکل ۱۷: جابجایی ایجاد شده (الف) به همراه توزیع تنش (ب) و تغییر شکل بزرگ‌نمایی روی زیرمجموعه سبد داخلی در وضعیت بحرانی در قالب کانتور رنگی طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حال گذرا

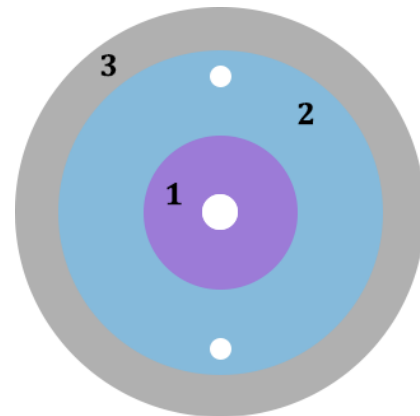
مقدار تنش معادل وون میسر زیر 50 MPa بوده است. گرچه این مقدار از لحاظ مکانیکی و جنس به کاررفته در اعضا قابل توجه نیست، لیکن جهت بررسی رفتار دینامیک مفید است.

در مجموع باید گفت که نتایج تحلیل دینامیک حالت گذرا نشان داده است که جابجایی حداکثر در نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی حداکثر 1.3 mm و تنش بحرانی وارد شده بر آن در حدود 70 MPa است. در نتیجه استحکام مکانیکی مجموعه در مقابل تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از عملکرد دستگاه قابل قبول است.

شکل ۲۰ تغییرات مقدار تنش طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حالت گذرا برای نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی

طبق آنچه در روابط (۲) تا (۵) گفته شد، محاسبه نرخ ته‌نشینی برای تخمین سرعت دورانی نقاط مختلف در راستای شعاع، و فشار هیدرولیک ایجاد شده ناشی از سیال، روی دیواره سبد به صورت تئوری لحاظ شده است. طبق آنچه در ابتدای بخش نتایج نیز ذکر شد، اعتبارسنجی نتایج تحلیل با توجه به نتایج آزمایش‌ها تجربی صورت گرفته در مطالعات قبلی [۲۰-۱۷] انجام شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۱۰ قابل مشاهده است.

جهت اندازه‌گیری میزان جابجایی و تنش اعمال شده ناشی از گردش ذرات، از کرنش‌سنج‌های نصب شده روی سبد خارجی استفاده شده است. میزان جابجایی حداکثر به دست آمده به طور مستقیم متوسط این کرنش‌سنج‌ها 1.21 mm ، و تنش حداکثر معادل آن 74 MPa محاسبه شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده در مطالعات تجربی قبلی [۲۱-۱۸]، نتایج نشان می‌دهد که نوسانات ایجاد شده در نمودارهای جابجایی و تنش اعمال شده روی بدنه دوار دستگاه، سبد خارجی تا زمان 5.9 s به مقادیر پایین‌تر از 15% مقدار متوسط رسیده است. به این ترتیب پایداری رفتار ذرات در این زمان در نظر گرفته شده است

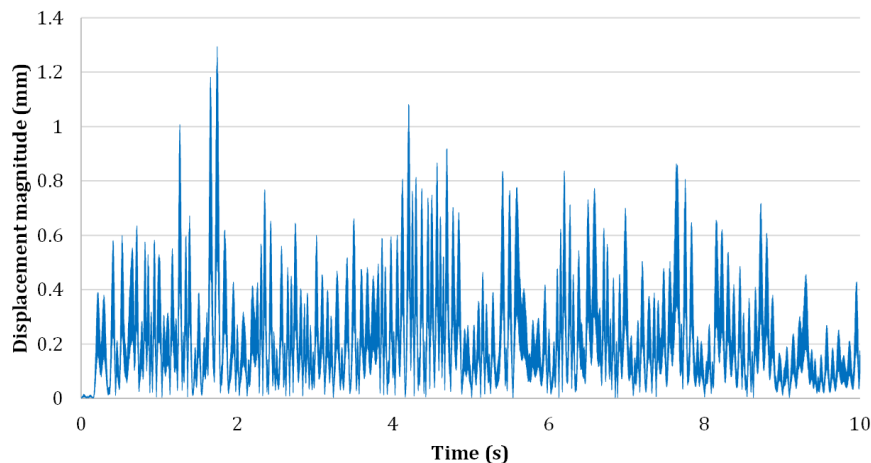


شکل ۱۸: پهنه‌بندی صفحه کف سبد از جهت اهمیت توزیع تنش

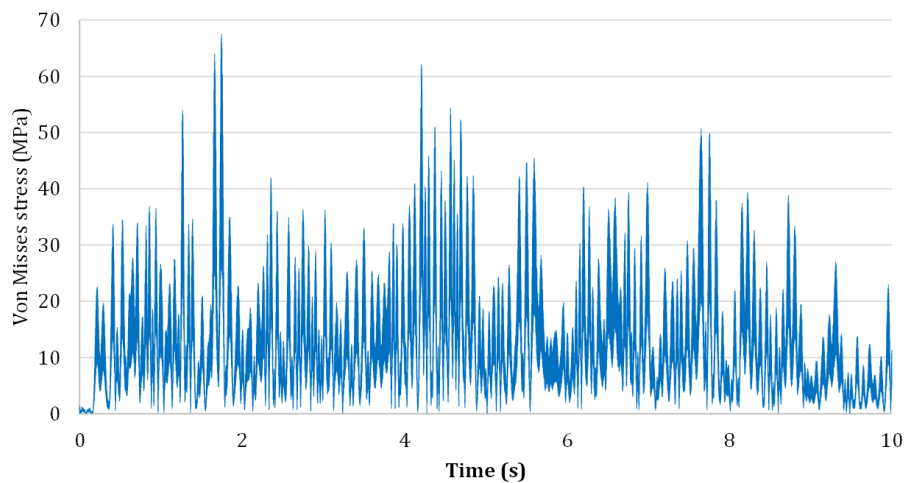
شکل ۱۹ جابجایی ایجاد شده در یکی از نقاط محیطی را با بیشترین میزان جابجایی در وضعیت بحرانی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، تغییرات در بازه کوچکی رخ داده است و نوسانات زیاد آن مربوط به مقادیر کوچک آن می‌شود. نکته دیگری که در این نمودار قابل برداشت است، روند کاهشی مقادیر بیشینه آن است که به معنای پایدار شدن رفتار دینامیک آن پس از گذشت مدت زمان مشخص است. همان‌طور که نمودار شکل ۱۹ نشان می‌دهد، تغییرات قابل توجه قله‌ها پس از مدت زمان 5 s نسبتاً کاهش یافته است و می‌توان گفت که پایداری رفتار از این زمان به بعد مشاهده می‌شود. البته باید توجه داشت که کاهش مشاهده شده از در بازه زمانی 9 s تا پایان به دلیل قطع تغذیه ذرات در زمان 8 s بوده است و نمی‌توان آن را مستقیماً با تغییرات رفتار دینامیک و پایداری مرتبط دانست. همین قضیه به صورت دیگری در شکل ۲۰ در مورد تغییرات مقدار تنش برای نقطه بحرانی شکل ۱۷-ب) مشاهده می‌شود. بازم در این نمودار روند تغییرات به گونه‌ای است که پایداری نسبی پس از 8 s مشاهده می‌شود. بنابراین مدت زمان پایداری رفتار ذرات حدوداً 5.5 یا 6.8% مدت زمان تغذیه ذرات است. لازم به ذکر است که طبق شکل ۲۰ حداکثر

جدول ۱۰: مقایسه نتایج تحلیل نرم‌افزاری و تجربی جهت اعتبارسنجی پارامترهای خروجی

زمان پایداری [s]	جابجایی حداکثر نقطه بحرانی سبد داخلی [mm]	تنش بحرانی [MPa]	
5.5	1.3	70	تحلیل نرم‌افزاری
5.9	1.21	74	مطالعه تجربی
7.27	6.92	5.71	درصد اختلاف



شکل ۱۹: تغییرات مقدار جابجایی طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حالت گذرا برای نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی



شکل ۲۰: تغییرات مقدار تنش طی فرآیند شبیه‌سازی رفتار دینامیک حالت گذرا برای نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ساختار و عملکرد دینامیک دستگاه سانتریفیوژ پوشر دومرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا مبحث شبیه‌سازی در سه فاز تحلیل مودال، تحلیل رفتار ذرات، و تحلیل دینامیک حالت گذرا انجام شده است. نتایج تحلیل مودال نشان داد که حاشیه ایمنی به دست آمده در زمینه بروز پدیده تشدید با توجه به فرکانس ارتعاش کاری معمول دستگاه و فرکانس طبیعی مجموعه و زیرمجموعه سبد داخلی به واسطه تغییر در روند نیروهای اینرسی خطی و دورانی ایجاد شده ۴۰٪ می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج تحلیل دینامیک گذرا مدت زمان پایداری رفتار ذرات در حدود ۵.۵ s یا ۶۸٪ مدت زمان تغذیه ذرات، جابجایی حداکثر در نقطه بحرانی زیرمجموعه سبد داخلی حداکثر ۱.۳ mm، و تنش بحرانی وارد شده بر آن در حدود ۷۰ MPa است؛ که به معنای استحکام مکانیکی قابل قبول مجموعه در مقابل

تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از عملکرد دستگاه است. آنچه با توجه به نتایج تحلیل انجام شده می‌توان استنباط نمود، توصیه بر حفظ حرکت دورانی حداکثر (۳۶.۶۸ rad/s) و عدم تغییر قابل توجه نرخ تغذیه ذرات نسبت به مقدار مشخص شده (۰.۵۶ kg/s) می‌باشد. موارد زیر نیز با توجه به نتایج تحقیق انجام شده استنباط می‌شود:

- با توجه به تحلیل مودال انجام شده، سرعت دورانی فعلی دستگاه، منجر به ارتعاشات مخرب یا تشدید نخواهد شد.
- با توجه به تحلیل مودال انجام شده، فرکانس طبیعی مجموعه مورد نظر و سبد داخلی در موده‌های مختلف مشکل ارتعاشی ایجاد نمی‌کند.
- طبق تحلیل رفتار دینامیک حالت گذرای انجام شده روی زیرمجموعه سبد داخلی، اهمیت توزیع تنش در صفحه کف در

- Microbiological Technology and Engineering, 1959. 1(2): p. 185-205.
- [6] Pang, C., et al., Simulating multiphase flow in a two-stage pusher centrifuge using computational fluid dynamics. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2012. 6(3): p. 329-338.
- [7] Bürger, R. and F. Concha, Settling velocities of particulate systems: 12. *International Journal of Mineral Processing - INT J MINER PROCESS*, 2001. 63: p. 115-145.
- [8] Yan, F. and B. Farouk, Numerical Simulations of Flows Inside a Partially Filled Centrifuge. *Journal of Fluids Engineering*, 2003. 125: p. 1033.
- [9] Anlauf, H., Recent developments in centrifuge technology. *Separation and Purification Technology*, 2007. 58(2): p. 242-246.
- [10] Wang, Y., et al., CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fibre membrane bioreactor using a porous media approach. *Journal of Membrane Science*, 2010. 363(1): p. 57-66.
- [11] Ferry, J. and S. Balachandar, A fast Eulerian method for disperse two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001. 27: p. 1199-1226.
- [12] Wakeman, R.J., Modelling slurry dewatering and cake growth in filtering centrifuges. *Filtration & Separation*, 1994. 31(1): p. 75-81.
- [13] Kutz, M., *Handbook of Materials Selection*. 2002: Wiley.
- [14] Chapter 11 - Centrifugal Separations, in *Coulson and Richardson's Chemical Engineering (Sixth Edition)*, R. Chhabra and M.G. Basavaraj, Editors. 2019, Butterworth-Heinemann. p. 627-656.
- [15] Pusher centrifuge technology evolves. *Filtration + Separation*, 2021. 58(2): p. 18-20.
- [16] Brouwers, J.J.H., Innovative Methods of Centrifugal Separation. *Separations*, 2023. 10(3): p. 181.
- [17] Anlauf, H. and J.A. Sorrentino, The Influence of Particle Collective Characteristics on Cake Filtration Results. *Chemical Engineering & Technology*, 2004. 27(10): p. 1080-1084.
- مرکز مهم‌ترین و در حلقه میانی کم‌اهمیت‌ترین شناسایی شده است.
- بازه جابجایی‌های مشاهده‌شده در تحلیل دینامیک حالت گذرا نشان می‌دهد که جابجایی‌های اطراف مجموعه در بازه مقادیر کوچکی قرار می‌گیرد و مشکل‌ساز نخواهد بود.
 - گرچه محدوده مقادیر تنشی و جابجایی حاصل در حدی نیست که از لحاظ مکانیکی مشکل خاصی برای اعضا ایجاد شود، لیکن افزایش نرخ تغذیه جهت افزایش بازده دستگاه، با توجه به نیروهای اینرسی خطی و دورانی ایجاد شده، می‌تواند منجر به تغییر فرکانس ارتعاش کاری دستگاه گردد. بنابراین احتمال بروز تشدید با توجه به تفاضل‌های به‌دست‌آمده با مجموعه و زیرمجموعه بالا می‌رود. لذا پیشنهاد می‌شود که مقدار نرخ تغذیه ذرات با احتیاط و حتی‌الامکان پس از آزمون تجربی افزایش یابد.
 - با توجه به بازه استحکام مکانیکی موردنیاز به‌دست‌آمده، به‌کارگیری جنس‌های سبک‌تر و حتی کم‌استحکام‌تر از جنس فعلی می‌تواند انتخاب مناسبی جهت بهینه‌سازی طراحی و عملکرد دستگاه باشد؛ به‌این‌ترتیب نه‌تنها فرآیند ساخت و مونتاژ دستگاه تسهیل خواهد شد، بلکه نیروهای اینرسی ناشی از جرم اعضا و تمایل به گریز از مرکز و وارد آمدن صدمه به یاتاقان‌ها در آن کاهش خواهد یافت.
- ۵- منابع**
- [1] Ergun, S. and A.A. Orning, Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1949. 41(6): p. 1179-1184.
- [2] Leung, W.W.F., *Industrial Centrifugation Technology*. 1998: McGraw-Hill Education.
- [3] Romani Fernández, X. and H. Nirschl, Multiphase CFD Simulation of a Solid Bowl Centrifuge. *Chemical Engineering & Technology*, 2009. 32: p. 719-725.
- [4] Stahl, S., L.-E. Spelter, and H. Nirschl, Investigations on the Separation Efficiency of Tubular Bowl Centrifuges. *Chemical Engineering & Technology*, 2008. 31(11): p. 1577-1583.
- [5] Ambler, C.M., The theory of scaling up laboratory data for the sedimentation type centrifuge. *Journal of Biochemical and*

-
- Extractor. Industrial & Engineering Chemistry Research - IND ENG CHEM RES, 2007. 47.
- [20] Leung, W.W.F. and A.H. Shapiro, Improved design of conical accelerators for decanter and pusher centrifuges. Filtration & Separation, 1996. 33(8): p. 735-738.
- [21] Records, A. and K. Sutherland, Decanter Centrifuge Handbook. 2001: Elsevier Science.
- [18] Bentz, M., O. Hartmetz, and W. Stahl, Particle Destruction Effects in Pusher Centrifuges during Solids-Liquid Separation. Chemical Engineering & Technology, 2004. 27(10): p. 1075-1080.
- [19] Deshmukh, S. and J. Joshi, Flow Visualization and Three-Dimensional CFD Simulation of the Annular Region of an Annular Centrifugal



Fabrication and Investigation of Mechanical Properties of Copper Alloy Matrix Composite Reinforced with Micron Diamond Particles

Ali Alizadeh^{*1}, Mohsen Heydari Beni², Ramin Soltani Bidar³, Jafar Eskandari Jam⁴

1. Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
2. Ph.D. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
3. M.Sc. Graduate, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
4. Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

The aim of this research is to produce a copper alloy matrix composite reinforced with micron diamond particles and to investigate the mechanical properties of this composite. One of the most important issues in the manufacture of this type of composite is to optimize the strength of diamond particles in the metal matrix and the intended wear properties of this type of composite. The composite powders were produced using high-energy (abrasive) milling and hot-press sintering. In order to investigate the flexural strength, hardness and wear properties, samples were manufactured by adding different metals to the matrix, different milling conditions and different hot-pressing parameters. The aim of this research is to produce a copper alloy matrix composite reinforced with micron diamond particles and to investigate the mechanical properties of this composite. One of the most important issues in the manufacture of this type of composite is to optimize the strength of diamond particles in the metal matrix and the intended wear properties of this type of composite. The composite powders were produced using high-energy (abrasive) milling and hot-press sintering. In order to investigate the flexural strength, hardness, and wear properties, samples were fabricated by adding different metals to the matrix, using different milling conditions, and using different hot pressing parameters.

Keywords

Hierarchical Thin-Walled Structures
ABS Polymer
3D Printer
Lateral Impact
Energy Absorption

Received: 08.04.2024

Revised: 10.08.2024

Accepted: 10.20.2024

*Corresponding Author

Ali Alizadeh

Email

a_alizadeh@mut.ac.ir

1- Introduction

Thin wall structures are one of the most efficient energy absorbing systems in various industries, such as automotive, railway and military, due to their lightness, suitable energy absorption capacity and high energy absorption to weight ratio, in order to protect the lives of passengers as well as pedestrians. Pedestrians are considered during accidents or protection of equipment and devices.

Zhang et al. [1] worked on the amount of energy absorption in linear and tubular structures under axial destruction. In this research, which deals with the simulation and experimental testing of parts with a special geometry, circular aluminum tubes are arranged next to each other in different states

and are subjected to quasi-static load. In addition, the weight of all samples is considered the same for a better comparison.

Li et al. [2] worked on the energy absorption characteristics of series structures under axial and diagonal loads. In this research, the samples were made by aluminum round tubes. By using these pipes, the cross section of the structures has become triangular, square and hexagonal. Also, by using more pipes, the mentioned structures have been optimized.

Ngoc et al. [3] have worked on the energy absorption characteristics of square series structures under axial load. The design of these structures was



inspired by the internal structure of bone and bamboo. In this research, first the samples were simulated by Abaqus software and then they were verified by theoretical method.

According to the conducted studies, in most of them, especially in thin-walled structures, the tests performed were quasi-static, and the response of energy absorbers to impact has been investigated less. Also, in the articles that have investigated the impact test, they have focused more on the axial impact mode. Also, the material of the examined samples was mainly made of metal, which cannot be used in all conditions due to the high weight and special physical conditions of metals. However, the case that is noteworthy in the above studies is the lack of examination of multicellular thin-walled structures with mesh and different geometries and made of polymer under lateral impact load. Therefore, in this study, this issue has been investigated.

2- Modeling and formulation

In this study, a total of eight thin-walled structures made of ABS and subjected to lateral impact have been investigated. ABS polymer has been used to make samples by 3D printer. Also, these parts were printed by Novin Negar Additive Manufacturing Company and by Kitek M1 machine. These samples were drawn under the ASTM D638 standard in SolidWorks software and then printed. The simulations of this project have been carried out by Abaqus software. After the end of the simulation, by doing independence from the mesh, the mesh with dimensions of 0.8 mm and type S4R was selected for different samples and the comparison of the results of the samples with each other has been discussed in terms of energy absorption characteristics. For the experimental test process, a weight drop test machine was used. In order to perform experimental tests, at first, the set of weights is set in such a way that their total weight is equal to 6.615 kg. Also, the striking surface is considered to be flat so that the force enters the upper surface of the parts in a wide and equal manner. Two samples were made from each of the samples and a total of 8 tests were performed. By this device, the command to drop the weight is sent

and the weight collides with the samples. As a result, the amount of shrinkage due to plastic deformation and the performance of the samples against impact can be investigated. During the descent of the weight, the data of the acceleration of the weight was entered into the computer by the sensor and the acceleration-time graph of the weight was extracted.

3- Results

1HR16 sample has the highest amount of energy absorption in the equilibrium distance (at $x=3.15$ mm in numerical mode and at $x=2.88$ mm in experimental mode). Also, sample 1HQ6 has the lowest amount of absorbed energy in the equilibrium distance in numerical mode and sample 1HR12 has the lowest value in experimental mode. Considering that samples 1HQ6 and 1HQ8 have square houses and samples 1HR12 and 1HR16 also have rectangular houses, the amount of energy absorption in the equilibrium distance in the experimental state for sample 1HQ8 is 5% more than the sample is 1HQ6 and the sample 1HR16 absorbs 33% more energy than the sample 1HR12. In numerical mode, samples 1HQ8 and 1HR16 have more energy absorption.

In order to make a better comparison between these 8 samples, it should be noted that the amount of length change in the amount of absorbed energy is an effective factor, so this parameter should be compared in equilibrium conditions for all 8 existing samples. In order to do this, considering the minimum amount of length change that belongs to the 1HR16 sample, the amount of length change in which the absorbed energy is measured is considered equal to 3.15 mm.

In these simulations, an impact with an energy of 25 joules has been applied and the amount of total absorbed energy in all structures is more than 95% of the applied energy. Also, according to the values of absorption energy at a distance of $x=3.15$ mm, which is in equilibrium conditions for all 8 samples, it can be seen that sample 1HR16 is the best sample in terms of energy absorption. Sample 1HR16 has the highest value and sample 2H2Q8 has the lowest average crushing force. The amount of crushing efficiency for an ideal energy absorber is 1 (100%), but achieving this number is very difficult. As a

result, according to the results, sample 1HR16 has the best efficiency of crushing force among all samples. According to the numerical and experimental results and their interpretation, it is clear that the sample 1HR16 is the best sample to be used as an energy absorber. It was also observed that with the increase in the number of houses in each row, the energy absorption properties and parameters improve, and in general, the rectangular house samples are better energy absorbers than the similar square house samples.

4- conclusion

The purpose of this study was to investigate numerically and experimentally the destruction of thin-walled multi-cell quadrangular structures made by 3D printers due to lateral impact. Below is a summary of the results of numerical simulations and experimental tests.

- In general, and according to the results of simulations and experimental tests, by increasing the number of houses in each sample and reducing the wall thickness of the samples in order to keep the weight, the amount of energy absorption, the average crushing force and the efficiency of crushing force increases. Also, the amount of change in length and shrinkage of each sample decreases with the increase in the number of houses.
- Considering that the rectangular house samples were created by adding a horizontal reinforcement to the square house samples, it can be seen that the amount of energy absorption in the equilibrium distance, the average crushing force and the energy efficiency The flattening of rectangular samples, like any square sample, has increased.
- By increasing the number of square houses from 6 to 8, the amount of energy absorption has increased by 5%, the average crushing force has increased by 15%, and the crushing force efficiency has increased by 30%.

- By increasing the number of rectangular houses from 12 to 16, the amount of energy absorption has increased by 16%, the average crushing force has increased by 35%, and the crushing force efficiency has increased by 47%.
- By converting a sample of 6 square houses to a sample of 12 rectangular houses, the average crushing force increases by about 7% and the efficiency of crushing force increases by 20%.
- By converting a sample of 8 square houses to a sample of 16 rectangular houses, the average crushing force increases by 30% and the crushing force efficiency increases by 37%.
- By adding inner layers to the samples, the values of energy absorption parameters decrease.
- The smaller the amount of shrinkage (change in length) of the sample under impact, the greater the maximum shrinkage force and resistance of the sample to impact. According to these points and results, it is obvious that sample 1HR16 is the best energy absorber among these samples.

5- References

- [1] L. Zhou, J. Liu, R. Ding, J. Cao, K. Zhan, B. Zhao, "A review of diamond interfacial modification and its effect on the properties of diamond/Cu matrix composites" *Surfaces and Interfaces*, Vol. 40, doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103143, 2023.
- [2] J. Sun, J. Zang, H. Li, X. Feng, Y. Shen, "Influence of diamond content and milling duration on microstructure and thermal conductivity of Ti-coated diamond/copper composite coating on copper substrate" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 259, doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124017, 2021.

-
- [3] Z. Xie, H. Guo, W. Xiao, X. Zhang, S. Huang, M. Sun, H. Xie, "Interfacial structures and their effect on thermal conductivity and mechanical properties of diamond/Cu-B composites" Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol.34(1), Issue 1, doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66395-2, 2024.
- [4] C. Wei, X. Wang, J. Wen, Q. Wang, Z. Donga, "Interface improvement of diamond/copper composites through a low-temperature high-efficiency coating method" Thin Solid Films, Vol.804, doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140486, 2024.
- [5] K. Lu, C. Wang, H. He, X. Fan, F. Chen, F. Qi, C. Wang, "Numerical simulation and experimental investigation on heat transfer and hydraulic characteristics of rectangular microchannel heat sinks using high thermal conductivity diamond/copper composites, Diamond and Related Materials, Vol.147, doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111371, 2024.
- [6] H. Okamoto, M. E. Schlesinger and E. M. Mueller, eds 2016 ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams (Materials Park, Ohio: ASM International).
- [7] P. Vityaz, C. Ковалева, V. Zhornik, T. Grigoreva, N. Lyakhov, "Mechanical Alloying of Copper- or Iron-Based Metallic Binders for Diamond Tools" Powders journal, Vol.2, pp.403-420, 2023.



ساخت و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلیاژهای مس تقویت‌شده با ذرات الماس میکرونی

علی علیزاده^{۱*}، محسن حیدری بنی^۲، رامین سلطانی بیدار^۳، جعفر اسکندری جم^۴

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

۲- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

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

کلمات کلیدی

کامپوزیت
تقویت‌کننده الماس
آلیاژ مس
ریزساختار
استحکام خمشی
سختی سنجی

چکیده

کامپوزیت‌های زمینه آلیاژهای مس تقویت‌شده با ذرات الماس میکرونی یک نوع از مواد کامپوزیتی هستند که از آلیاژهای مس به‌عنوان فاز زمینه و ذرات الماس میکرونی به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌کنند. اندازه ذرات الماس معمولاً در محدوده میکرومتر است که باعث می‌شود تأثیر قابل توجهی بر روی خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی کامپوزیت بگذارند. در پژوهش حاضر نمونه‌های کامپوزیتی با آلیاژهای مختلف مس و تقویت‌کننده‌ی الماس با پوشش تیتانیوم ساخته شد. هدف از پژوهش حاضر، تولید کامپوزیت زمینه آلیاژهای مس تقویت‌شده با ذرات الماس میکرونی و بررسی خواص مکانیکی این کامپوزیت است؛ بنابراین ریزساختار، استحکام خمشی و خواص سایشی آن‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که حضور عنصر کبالت در بین عناصر مس و قلع باعث افزایش دمای ذوب ترکیب و تغییرات فازی و ساختاری نمونه‌ها شده و همین موضوع باعث به وجود آمدن ساختار متناسب برای انتخاب زمینه کامپوزیت شده است. اتصال الماس در زمینه مس-قلع-کبالت اتصال بهتری نسبت به الماس در زمینه مس-قلع دارد. همچنین با اضافه کردن الماس به ساختار کامپوزیت، استحکام خمشی نمونه ۴۹/۶٪ کاهش یافت. در حالی که با افزودن الماس با پوشش تیتانیوم استحکام خمشی ۱۸٪/۲ نسبت به نمونه دارای الماس بدون پوشش افزایش پیدا کرده است. با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به نمونه‌هایی که کبالت در ساختار زمینه‌ی آن‌ها وجود دارد میزان ضریب اصطکاک کاهش یافت. همچنین نمونه دارای الماس نسبت به نمونه‌های فاقد الماس مقاومت سایشی خوبی داشته و ذرات الماس در زمینه کامپوزیت باقی ماندند.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

*نویسنده مسئول

علی علیزاده

ایمیل

a_alizadeh@mut.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش می‌دهند. همچنین دارای هدایت حرارتی بسیار بالایی هستند، بنابراین ترکیب آن‌ها با مس می‌تواند منجر به تولید موادی با هدایت حرارتی عالی شود که در صنایع الکترونیک و انتقال حرارت بسیار مفید است. مس به‌خودی‌خود دارای هدایت الکتریکی بالاست و افزودن ذرات الماس می‌تواند باعث بهبود برخی ویژگی‌های الکتریکی دیگر شود. افزودن ذرات الماس به آلیاژ مس، مقاومت به سایش کامپوزیت را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد. ترکیب مس با الماس باعث می‌شود که این کامپوزیت‌ها در عین داشتن استحکام بالا، سبک باقی بمانند. ذرات الماس می‌توانند مقاومت به خوردگی را نیز افزایش دهند که به

کامپوزیت‌های زمینه آلیاژهای مس تقویت‌شده با ذرات الماس میکرونی یک نوع از مواد کامپوزیتی هستند که از آلیاژهای مس به‌عنوان فاز زمینه و ذرات الماس میکرونی به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌کنند. این کامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد ذرات الماس و خاصیت‌های عالی مس، در کاربردهای مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اندازه ذرات الماس معمولاً در محدوده میکرومتر است که باعث می‌شود تأثیر قابل توجهی بر روی خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی کامپوزیت بگذارند. ذرات الماس به دلیل سختی بالای خود، مقاومت به سایش و سختی کلی کامپوزیت را



بررسی تأثیر محتوای الماس و مدت آسیاب کردن بر ریزساختار و هدایت حرارتی پوشش کامپوزیت الماس/مس پوشش داده شده با Ti روی زیر لایه مس [۱۶]، بررسی ساختارهای بین سطحی و تأثیر آن‌ها بر هدایت حرارتی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الماس/مس - بور [۱۷]، بهبود رابط‌های بین سطحی کامپوزیت‌های الماس/مس از طریق روش پوشش دهی با دمای پایین و کارایی بالا [۱۸]، شبیه‌سازی عددی و بررسی تجربی انتقال حرارت و ویژگی‌های هیدرولیکی سینک‌های حرارتی میکروکانال مستطیلی با استفاده از کامپوزیت‌های مس/الماس با هدایت حرارتی بالا [۱۹].

هدف از این تحقیق، تولید کامپوزیت زمینه آلیاژهای مس تقویت‌شده با ذرات الماس میکرونی و بررسی خواص مکانیکی این کامپوزیت است. از مهم‌ترین مسائل ساخت این نوع کامپوزیت، بهینه‌سازی استحکام ذرات الماس در زمینه فلزی و خواص سایشی مدنظر این نوع کامپوزیت است. پودرهای کامپوزیتی با استفاده از آسیاب کاری پلانترژی (سایشی) و به روش سینتر پرس داغ تولید شدند. به‌منظور بررسی استحکام خمشی، سختی و خواص سایشی، نمونه‌ها با اضافه کردن فلزات مختلف به زمینه، شرایط مختلف آسیاب کاری و پارامترهای مختلف فشار داغ، ساخته شدند.

۲- بیان مسئله پژوهش

به‌منظور انجام پژوهش ابتدا خواص مواد و تجهیزات موردنیاز جهت انجام آزمون تجربی موردبررسی قرار گرفت و سپس آزمون‌های انجام‌شده و نحوه ساخت نمونه‌ها به تفصیل شرح داده شد.

۲-۱- خواص مواد

در این پژوهش از پودر مس خالص با درصد خلوص ۹۹/۹۹ درصد اتمیزه شده به‌وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۳۰ میکرون استفاده شد. ذرات پودر مس مورداستفاده کاملاً به‌صورت کروی شکل بوده و توزیع نسبتاً یکسانی از اندازه ذرات دارد. پودر قلع خالص با درصد خلوص ۹۹/۹۹٪ اتمیزه شده به‌وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۲۰ میکرون در نظر گرفته شد. ذرات پودر قلع مورداستفاده به‌صورت کروی و بیضوی شکل بود. پودر برنز با ترکیب Cu-20wt.%Sn با درصد خلوص ۹۸٪ اتمیزه شده به‌وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۴۵ میکرون بود. ذرات پودر برنز مورداستفاده به‌صورت بیضوی شکل است. پودر کبالت با درصد خلوص ۹۹ درصد و متوسط اندازه ذره ۱۰ میکرون و پودر الماس با درصد خلوص ۹۹٪ با متوسط اندازه ذره ۱۰۰ میکرون استفاده شد. ذرات پودر الماس

طول عمر بیشتر مواد در شرایط سخت کمک می‌کند. این ویژگی‌ها به دلیل کاربرد در صنایع هوافضا و قطعات الکترونیکی از نوآوری این‌گونه کامپوزیت‌ها است.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) تقویت‌شده با ذرات، یکی از جدیدترین مواد مهندسی بوده و توسعه سریع آن در سال‌های اخیر را می‌توان به دلیل خواص بسیار عالی و کاربردهای گسترده آن دانست. برای ساخت کامپوزیت‌ها، مواد مختلف با یکدیگر مخلوط شده و خواص مورد نظر را ارائه می‌دهند. خواص آن‌ها متفاوت از خواص زمینه‌ی خود است؛ اما نه زمینه و نه تقویت‌کننده به‌تنهایی نمی‌توانند خواص مورد نظر را ارائه دهد، درصورتی‌که MMCها تنهایی قادر به فراهم کردن خصوصیات موردنیاز می‌باشند [۱-۳]. پرس گرم (HP)، پرس گرم ایزواستاتیک (HIP) و لحیم‌کاری فرآیندهای مرسوم هستند که برای تهیه ابزارهای الماس بسیار نازک استفاده می‌شوند. با این حال، معایبی برای این روش‌ها، از جمله ضخامت زیاد، درجه آلیاژی پایین و دقت محدود برش به دلیل نسبت ابعاد بزرگ وجود دارد [۴ و ۵]. ابزارهای تولیدشده به روش پرس گرم، دارای الماس‌هایی هستند که معمولاً با سینتر در قالب‌های گرافیتی در یک پودر فلز قرار داده می‌شوند. کامپوزیت الماس/زمینه تولیدشده به این روش، با استفاده از لحیم‌کاری یا جوش لیزری به هسته فولادی متصل می‌شود [۶]. در ابزارهای لحیم‌کاری شده، الماس‌ها با استفاده از یک‌فاز پرکننده که عموماً از آلیاژ مس، نیکل یا نقره تشکیل شده است، یک‌لایه منفرد را تشکیل می‌دهند که به هسته فولادی لحیم می‌شود [۷ و ۸]. از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مقایسه ویژگی‌های دو ابزار الماس از دو روش سینتر پرس داغ و لحیم‌کاری از جنبه‌های پیوند زمینه فلزی به الماس، ارزیابی حفظ الماس و فرآیند سایش ابزار [۹]. بررسی اثر دمای پرس داغ بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Cu-25% Sn [۱۰]، بررسی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های لایه‌ای زمینه مس و الماس پوشش داده شده با مس [۱۱]، آبکاری کامپوزیت نانو الماس/مس جهت بهبود چسبندگی بین سطحی بین الماس و مس از طریق تشکیل کاربرد سیلیکون روی سطح الماس [۱۲]، تهیه کامپوزیت‌های الماس/مس اصلاح‌شده با Ti_3C_2Tx به‌عنوان لایه میانی با هدایت حرارتی بهبودیافته [۱۳]، بررسی ریزساختار و هدایت حرارتی پوشش‌های Cu- $Cu_2AlNiZnAg$ الماس روی زیر لایه مس خالص به روش آلیاژسازی مکانیکی بانرژی بالا [۱۴]، مروری بر اصلاح بین سطحی الماس و تأثیر آن بر خواص کامپوزیت‌های الماس/زمینه مس [۱۵]،

شد. نمونه‌های خمش با مقطع مستطیل دارای طول ۳۰ میلی‌متر، ضخامت ۳ میلی‌متر و عرض ۵ میلی‌متر هستند. سرعت حرکت فک 0.6 mm/min طول تکیه‌گاه ۲۳ میلی‌متر بود. آزمون خمش، با دستگاه Santam STM 150، صورت پذیرفت. استحکام خمشی توسط فرمول (۱) [۲۰] محاسبه شد؛ که σ استحکام خمشی، F نیروی وارد شده بر قطعه، L طول تکیه‌گاه، b عرض و d ضخامت نمونه خمش است.

$$\sigma = 3FL/2bd^2 \quad (1)$$

چگالی نمونه‌ها، به روش غوطه‌وری یا ارشمیدس طبق استاندارد ASTM B962 اندازه‌گیری شد. چگالی تئوری توسط قانون مخلوط‌ها [۲۰] رابطه (۲) محاسبه شد.

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

۲-۴- ساخت نمونه‌ها

مراحل ساخت نمونه‌ها در این پژوهش شامل فراوری پودر کامپوزیتی، سینتر پودرها به روش پرس داغ است. برای تعیین درصد‌های عناصر فلزی مختلف و نوع تقویت‌کننده‌ی الماس با توجه به بررسی مقالات، در کامپوزیت‌های حاوی الماس ۹ درصد وزنی است. به همین منظور در تمام نمونه‌های کامپوزیتی به مقدار ۹ درصد وزنی الماس استفاده شد. ابتدا پودرهای فلزی مس و قلع با نسبت ترکیب Cu-15Sn۸۵ و سپس در نمونه‌های بعدی با اضافه کردن ۹ درصد وزنی کبالت به ترکیب، تهیه شدند. لازم به ذکر است پودرهای مس و قلع در نمونه‌های مجزا از قبل به صورت پودر از پیش آماده‌شده برنز استفاده شدند. ابتدا پودرهای زمینه فلزی به مقدار ۳۳ گرم وزن شده و سپس به مقدار ۹ درصد وزنی (۳ گرم) به ترکیب فلزی اضافه‌شده و به مقدار ۲ درصد وزنی اسید استئاریک به منظور جلوگیری از چسبیدن پودر به گلوله‌های آسیاب اضافه شدند. نسبت وزن گلوله به پودر در این آسیاب ۱:۳۰ انتخاب شد که به مقدار ۹۰۰ گرم گلوله فلزی از جنس استیل ۳۰۴ به قطر 5mm استفاده شد. فرایند آسیاب با سرعت 430rpm و با سه مدت‌زمان ۴ و ۱ و نیم ساعت در یک محفظه‌ی آبگرد برای نمونه‌های مربوطه انجام شد. پودرهای تولیدشده به روش آسیاب پراثری با وزن ۳۰ گرم به درون قالب ریخته شده و سپس با فشار 200MPa پرس سرد شدند. پس از پرس سرد قالب به درون محفظه‌ی پرس داغ منتقل شد. به منظور اطمینان از خنثی بودن اتمسفر محفظه، گاز آرگون در طول فرایند به داخل محفظه پرس داغ تزریق شد. پس از افزایش دما تا 600°C، به منظور هم‌دما شدن قالب و پودرها، پس از

مورد استفاده به صورت گوشه‌دار بود. پودر الماس با پوشش تیتانیوم ساخت کشور چین با درصد خلوص ۹۹٪ با متوسط اندازه ذره ۱۰۰ میکرون تهیه شد. ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت گوشه‌دار است. پودر الماس با اندازه ۱۵ میکرون با درصد خلوص ۹۹٪ در نظر گرفته شد و ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت گوشه‌دار بود.

۲-۲- تجهیزات

برای انجام فرایند آلیاژسازی مکانیکی Cu-Sn-Co-Diamond از یک آسیاب گلوله‌ای از نوع سایشی مجهز به سیستم خنک‌کننده آبگرد و اتمسفر کنترل‌شده، استفاده گردید. برای توزین پودرهای اولیه به منظور آسیاب کردن و همچنین توزین پودرهای آسیاب شده به اندازه قرص‌های یک و سه سانتی برای پرس کردن درون قالب، از ترازو کیا الکترونیک مدل BL2 با دقت یک‌صدم اعشار استفاده شد. جهت جلوگیری از اکسیداسیون پودرهای آسیاب شده در حین تخلیه محفظه آسیاب، کلیه مراحل باز کردن درب محفظه آسیاب و تخلیه آن، در گلاوباکس و تحت اتمسفر گاز خنثی آرگون انجام گرفت. به منظور متراکم سازی نمونه‌ها برای آزمون احتراق و آزمون‌های مکانیکی از دستگاه پرس هیدرولیکی مستقر در دانشگاه صنعتی مالک اشتر با ظرفیت ۱۰۰ تن مجهز به سنسور تنظیم و نگهداری فشار استفاده شد. برای پرس سرد و پرس گرم و سینتر نمونه‌ها از قالب گرم کار با قطر 4cm و ارتفاع 10cm از جنس فولاد گرم کار H13 استفاده شد. به منظور سینتر پرس داغ نمونه‌های Cu-Sn-Co-Diamond از محفظه تحت اتمسفر با دمای کاری 1000°C استفاده گردید.

۲-۳- آزمون‌ها

تغییر ریزساختار نمونه‌های زینتر شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به طیف‌سنج EDS مورد بررسی قرار گرفت. شرایط تست EDS این‌گونه بود که ولتاژ شتاب‌دهنده در محدوده ۱۵ تا ۲۰ کیلوولت قرار داشت، زاویه برخورد پرتو الکترونی با سطح نمونه در حدود ۳۰ درجه نسبت به محور عمودی سطح نمونه تنظیم شد، فاصله کارکرد بهینه بین نمونه و دکتور ۱۰ میلی‌متر و عمق تحلیل ۱ میکرومتر بود. برای مطالعه ریزساختار نمونه‌های زینتر شده، سطح قطعات با سمباده‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ سمباده زنی و پولیش شدند. به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های زینتر شده از آزمون‌های خمش سه‌نقطه‌ای و سختی سنجی راکول B استفاده شد. آزمون خمش سه‌نقطه‌ای تحت استاندارد ASTM D790 [20] انجام

یک ساعت فشار 200MPa اعمال شد. پس از یک ساعت فشار حذف و کوره خاموش شد. پس از سرد شدن کوره، قطعه کامپوزیتی از قالب خارج شد. در جدول ۱ مشخصات کامل نمونه‌های تولیدشده و موردبررسی آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌های تولیدشده

شماره نمونه	ترکیب (درصد وزنی)						
	Cu	Sn	Co	Bronze (85-15)	الماس D100	الماس D100 با پوشش تیتانیوم	الماس D15
۱	۸۵	۱۵	-	-	-	-	۴ ساعت
۲	-	-	-	۱۰۰	-	-	۴ ساعت
۳	۷۵	۱۵	۱۰	-	-	-	۴ ساعت
۴	۶۸	۱۴	۹	-	۹	-	۴ ساعت
۵	۶۸	۱۴	۹	-	۹	-	۴ ساعت
۶	۷۸	۱۳	-	-	۹	-	۴ ساعت
۷	-	-	-	۹۱	۹	-	۴ ساعت
۸	۶۸	۱۴	۹	-	۹	-	۱ ساعت
۹	۶۸	۱۴	۹	-	۹	-	۳۰ دقیقه
۱۰	۶۸	۱۳	-	-	-	۹	۴ ساعت

۳- نتایج

الماس در این دو نمونه به صورت یکنواختی توزیع شده و به دلیل مورفولوژی الماس استفاده شده، الماس با اندازه‌های مختلفی در ترکیب مشاهده شد و همان‌طور که در شکل ۱ و ۲ مشاهده شد اندازه متوسط الماس‌ها از بازه‌ای بین ۹۰ تا ۱۲۰ میکرومتر هستند.

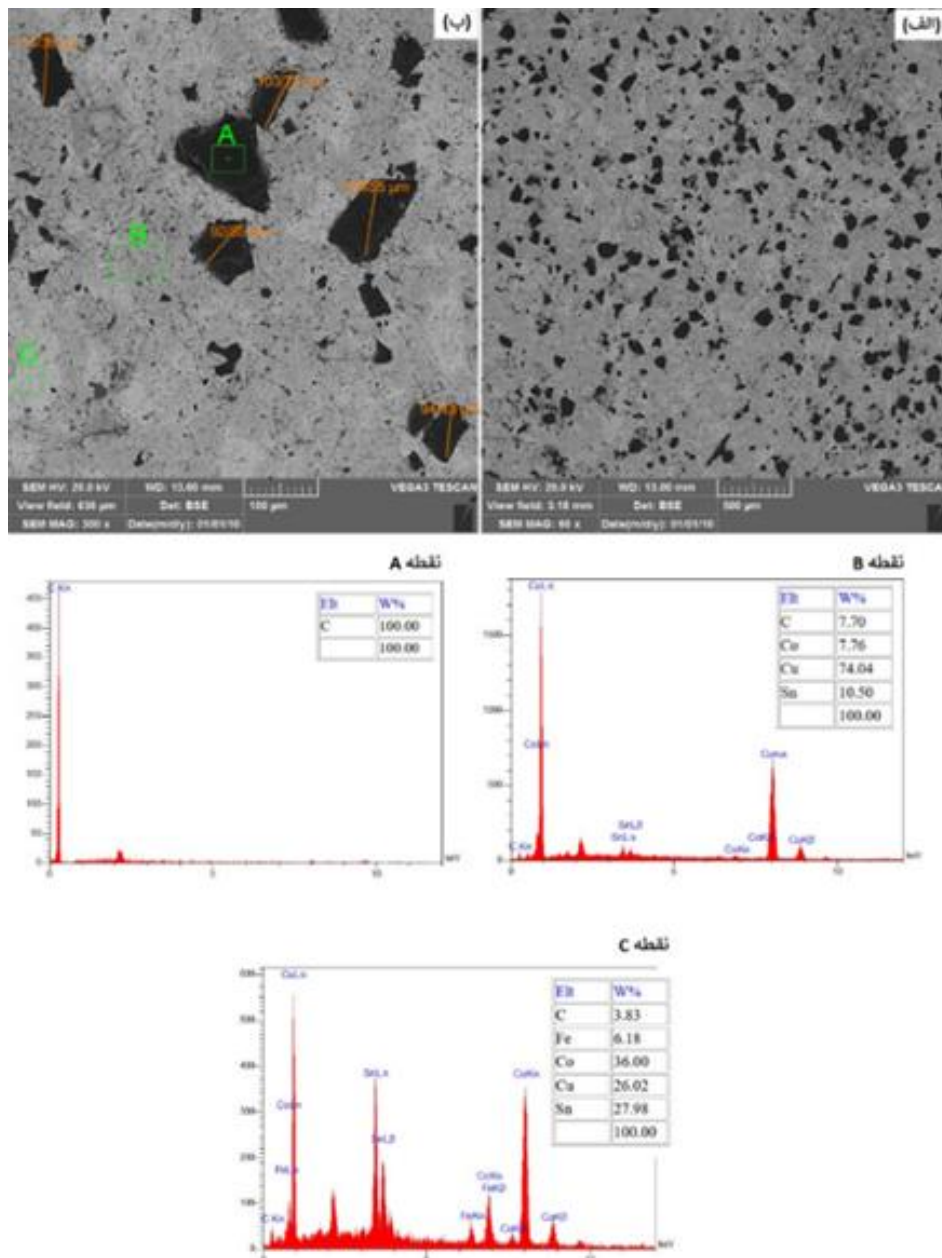
اهمیت بررسی این دو نمونه در نحوه اتصال الماس در زمینه کامپوزیت است که از شکل ۳ می‌توان گفت که فصل مشترک الماس - زمینه مناسب است. با مقایسه مورفولوژی الماس و شکل ۳ می‌توان گفت که سطح الماس در نمونه ۴ فرایند آسیاب دچار تخریب سطحی شده است. از طرفی با توجه به اینکه الماس در دماهای زیر 700°C گرافیته نمی‌شود [۲۲] از لحاظ ساختاری الماس به گرافیت تبدیل نشده است. در شکل ۴ هم این شرایط برای الماس تکرار شد و الماس به صورت طبیعی این ظاهر را داشته و گرافیته نشده است. اتصال الماس در زمینه مس-قلع-کبالت به نظر اتصال بهتری نسبت به الماس در زمینه مس-قلع دارد زیرا کبالت با کربن محلول‌های جامد و مایع تشکیل می‌دهد و سطح الماس را مرطوب می‌کند [۲۳].

نتایج مربوط به ۱۰ نمونه ساخته شده در قالب بررسی اثر حضور کبالت بر ریزساختار و فصل مشترک الماس زمینه مس-قلع، تأثیر آلیاژی بودن برنز بر ریزساختار و فصل مشترک زمینه مس-قلع و الماس، مقایسه ریزساختار و فصل مشترک در زمینه مس-قلع با الماس با اندازه ۱۰۰ و ۱۵ میکرون، استحکام خمشی، بررسی سطوح شکست، بررسی رفتار سایشی، بررسی سطوح سایش ارائه و به تفصیل شرح داده شده است.

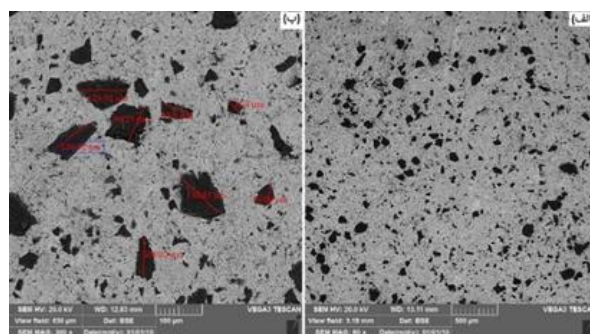
۳-۱- اثر حضور کبالت بر ریزساختار و فصل مشترک الماس

زمینه مس-قلع

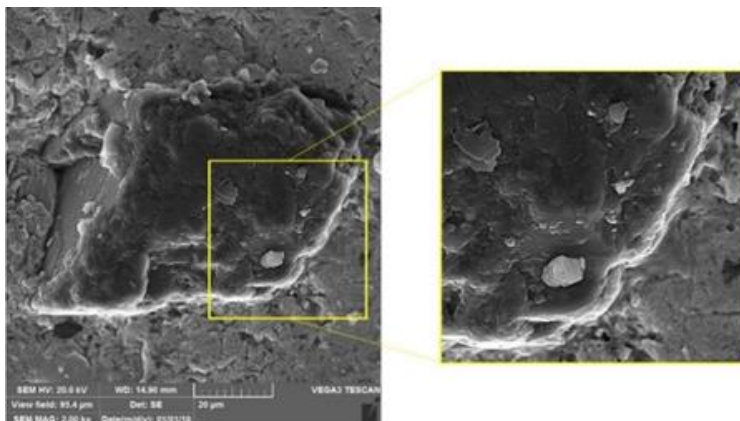
در شکل ۱ ریزساختار نمونه ۴ (مس-قلع-کبالت-الماس) و شکل ۲ ریزساختار نمونه ۶ (مس-قلع-الماس) را نشان داده شده است. با اضافه کردن ۱۰ درصد وزنی الماس بدون پوشش ساخته شدند. با مقایسه ریزساختار این دو نمونه نشان داد که حضور کبالت در ترکیب باعث ایجاد مناطق دوفازی در ریزساختار ترکیب شد.



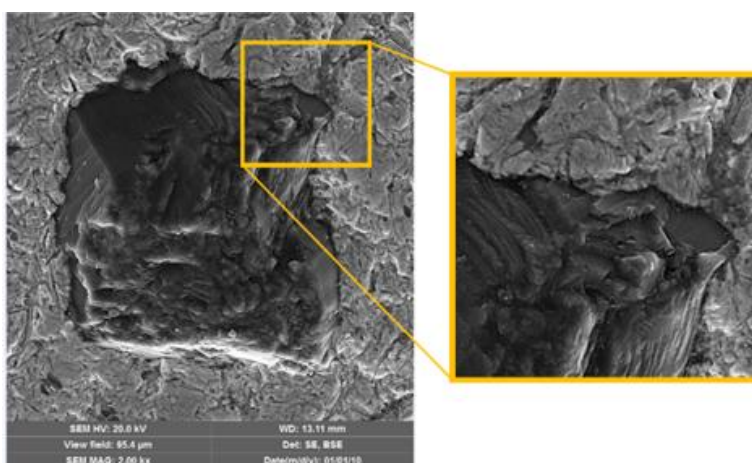
شکل ۱: تصاویر SEM و آنالیز EDS ریزساختار نمونه ۴ الف) نمای دور- ب) نمای نزدیک



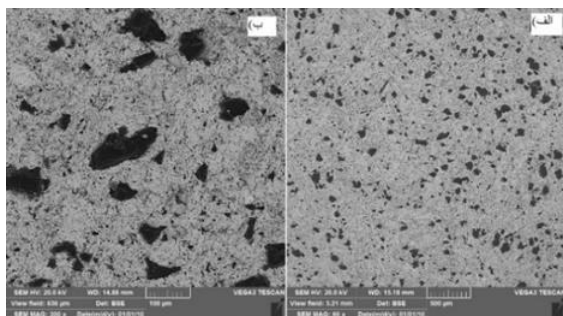
شکل ۲: تصاویر SEM ریزساختار نمونه ۶ الف) نمای دور- ب) نمای نزدیک



شکل ۳: تصویر SEM الماس در نمونه ۴ (مس-قلع-کبالت-الماس)

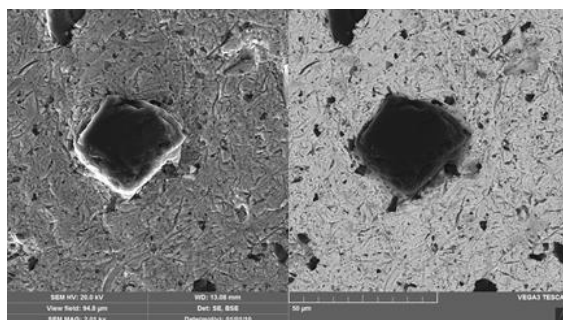


شکل ۴: تصویر SEM الماس در نمونه ۶ (مس-قلع-الماس)



شکل ۵: تصاویر SEM ریزساختار نمونه ۷ (برنز-الماس) الف) نمای دور-

ب) نمای نزدیک



شکل ۶: تصویر SEM الماس در نمونه ۷ (برنز-الماس)

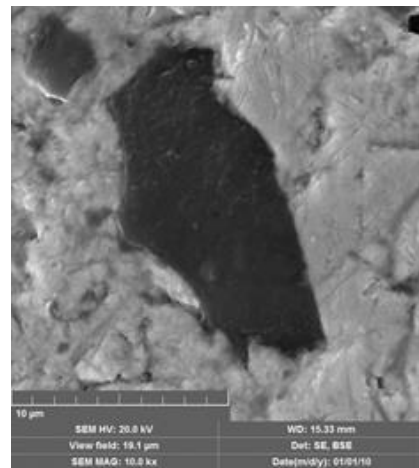
۳-۲- تأثیر آلیاژی بودن برنز بر ریزساختار و فصل مشترک زمینه مس-قلع و الماس

در شکل ۵ ریزساختار کامپوزیتی نمونه ۷ را نشان داده شد. در این نمونه نیز همانند نمونه‌های قبل توزیع الماس مناسب بوده و الماس‌ها در حین آسیاب در ترکیب پخش شده و مورفولوژی مناسبی دارند. ریزساختار این نمونه در مقایسه با نمونه ۶ تفاوت چندانی ندارند و در ریزساختار این دو نمونه مناطق دوفازی دیده نشد. این نشان داد که برنز، قلع و کبالت موجب دوفازی شدن نمونه نشده‌اند و عامل اصلی در دوفازی شدن نمونه به نوع توزیع الماس بستگی دارد.

در شکل ۶ تصویر الماس و فصل مشترک آن با زمینه در نمونه ۷ آورده شده است که در مقایسه با فصل مشترک الماس در زمینه مس-قلع، چسبندگی و فصل مشترک بهتری مشاهده شد [۲۴].

۳-۳- مقایسه ریزساختار و فصل مشترک درزمینه مس-قلع با الماس با اندازه ۱۰۰ و ۱۵ میکرون

تصاویر ریزساختار نمونه ۱۰ که با زمینه مس-قلع و الماس با اندازه ۱۵ میکرون است نشان داد همانند نمونه‌های قبلی الماس به‌طور یکنواخت در ترکیب فلزی زمینه توزیع شده است. ذرات ریزتر به دلیل فضای بیشتری برای توزیع یکنواخت درزمینه فلزی، به‌خوبی پراکنده شدند که این اتصالات عالی به دلیل سازگاری بهتر بین ذرات ریز الماس و زمینه فلزی است. در شکل ۷ تصویر SEM الماس در ساختار زمینه‌ی مس-قلع آورده شده است و همان‌طور که مشاهده شد، اتصال الماس به زمینه بسیار عالی بوده و اثری از شکستگی و تخریب هم در سطح الماس مشاهده نشد و این ویژگی‌ها می‌تواند به علت ریزتر بودن اندازه الماس‌ها نسبت به نمونه‌های ۴ تا ۹ باشد [۲۵].



شکل ۷: تصویر SEM الماس در نمونه ۱۰ (مس-قلع-الماس با اندازه ۱۵ میکرون)

۱۸/۲ درصد نسبت به نمونه ۴ افزایش پیدا کرده است که از این افزایش می‌توان برداشت کرد که با حضور ذرات الماس با پوشش تیتانیوم در ساختار کامپوزیت و اتصال قوی بین ذرات الماس با پوشش و زمینه، استحکام خمشی نمونه افزایش یافته است. با مقایسه مقادیر استحکام نمونه‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که استفاده از ترکیب پودرهای مس و قلع، ۱۶ درصد استحکام خمشی بیشتری نسبت به ترکیب برنزی است. این بیانگر این است که ترکیب الماس در کنار مس و قلع اتصال بهتری نسبت به ترکیب برنز و الماس برقرار کرده است. مقادیر استحکام خمشی نمونه ۴ و ۸ و ۹ نشان داد که مدت‌زمان آسیاب تأثیر چشمگیری بر روی استحکام نمونه نداشته و استحکام این نمونه‌ها تفاوت چندانی ندارند اما تفاوت اصلی این سه نمونه در کرنش آن‌هاست به‌طوری‌که کرنش نمونه ۸ نسبت به نمونه ۴، ۴۰٪ افزایش یافته و نمونه ۹ نیز ۳۵٪ افزایش کرنش داشته‌اند و می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش مدت‌زمان آسیاب کرنش کامپوزیت افزایش پیدا کرده است. با مقایسه مقادیر استحکام نمونه ۶ و ۱۰ مشاهده شد که استفاده از الماس با اندازه کوچک‌تر باعث کاهش استحکام خمشی نمونه شده است. در جدول ۳ مقادیر کرنش خمشی نمونه‌ها ارائه شده است که با مقایسه مقادیر این نمودار مشاهده می‌شود که نمونه ۲ به علت آسیاب نشدن و آلیاژی بودن پودر مورد استفاده دارای بالاترین میزان کرنش در مقایسه با سایر نمونه‌ها و نمونه ۱ است. مابقی نمونه‌ها رفتار کرنشی یکسانی نشان داده و در یک محدوده قرار گرفته‌اند [۲۶].

جدول ۲: نتایج استحکام خمشی سه‌نقطه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی

شماره نمونه	استحکام خمشی (Mpa)
۱	۶۴۳/۴
۲	۷۱۵/۵
۳	۶۵۸
۴	۴۰۹/۵
۵	۴۴۱/۱
۶	۵۰۶/۲
۷	۴۲۵/۶
۸	۳۳۲/۶
۹	۳۰۹/۷
۱۰	۴۲۶/۴

۳-۴- نتایج استحکام خمشی

در جدول ۲ نتایج استحکام خمشی سه‌نقطه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی آورده شده است. با مقایسه مقادیر استحکام خمشی نمونه ۱ و ۲ می‌توان دریافت که نمونه برنزی به دلیل آلیاژی بودن پودرها و آسیاب نشدن پودرهای مورد استفاده استحکام خمشی بیشتری نسبت به نمونه مخلوطی مس و قلع را دارا است. در نمونه ۱ و ۳ با اضافه کردن کبالت به ترکیب استحکام خمشی ۲/۳ درصد افزایش پیدا کرد و این می‌تواند به دلیل دوفازی شدن ریزساختار باشد. با اضافه کردن الماس به ساختار کامپوزیت که وجه تفاوت نمونه‌های ۳ و ۴ است، استحکام خمشی نمونه ۴۹/۶ درصد کاهش یافت که این به دلیل حضور ذرات سرامیکی الماس در ساختار زمینه است که مسبب چنین کاهش استحکام نمونه است. در نمونه ۵ مشاهده شد که استحکام خمشی

جدول ۳: میزان کرنش‌های خمشی نمونه‌های کامپوزیتی

شماره نمونه	میزان کرنش خمشی
۱	۰/۰۱۰۶۴
۲	۰/۰۴۱۳۷
۳	۰/۰۰۶۷۶۶
۴	۰/۰۰۶۸۷۶
۵	۰/۰۰۶۲۲
۶	۰/۰۰۶۸۰۵
۷	۰/۰۰۵۵۳۲
۸	۰/۰۱۲۴۹۴
۹	۰/۰۱۱۳۴۷
۱۰	۰/۰۰۶۳۸۷

۳-۵- نتایج بررسی سطوح شکست

با توجه به صاف و ورقه‌ای بودن سطح شکست نمونه ۱ می‌توان گفت که شکست ترد اتفاق افتاده است. همچنین مشخص شد که رشد ترک از میان دانه‌ها عبور کرده و این رفتار عیناً در نمونه ۳ نیز اتفاق افتاده است. با مشاهده نمونه ۲ که حاوی پودر آلیاژی آسیاب نشده برنز است مشخص شد دیپمل‌ها و سطح برآمده آن، در این نمونه شکست نرم اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج سطح شکست کامپوزیت در حضور الماس مشخص شد، نمونه ۴ دارای ترک است و سطح آن شامل دیپمل‌های ناشی از کنده شدن الماس از زمینه است. این موضوع بیانگر این است که ترک از ذرات الماس عبور نکرده و رشد ترک در زمینه اشاعه پیدا کرده است. نمونه ۵ نیز دارای رفتار مشابه با نمونه ۴ است. نکته قابل توجه این است که پوشش‌های الماس نسبتاً روی الماس باقی‌مانده‌اند و این پوشش بارنگ روشن‌تری نمایان است که می‌توان نتیجه گرفت اتصال تیتانیوم به الماس قوی‌تر از اتصال تیتانیوم به زمینه مس-قلع-کبالت است. به همین ترتیب در مابقی نمونه‌ها رفتار شکست ترد مشاهده شد [۲۷].

۳-۶- بررسی رفتار سایشی

نمودارهای ضریب اصطکاک تحت نیروی ۲۰ نیوتون برحسب زمان نشان داد که نمونه ۱ ضریب اصطکاک تقریباً یکسانی را در طی فرایند سایش دارد و این نشان می‌دهد که در طول فرایند سایش، هم سطح دیسک و هم سطح نمونه دچار سایش یکسانی شده‌اند. نمونه ۲ نیز رفتار مشابهی با نمونه ۱ دارد اما نمونه ۳ ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه‌های قبلی دارد که این می‌تواند به علت حضور کبالت

در ساختار نمونه ۳ باشد. نمونه‌های ۱ تا ۳ ضریب اصطکاک یکسانی دارند و این می‌تواند به‌این‌علت باشد که به دلیل عدم حضور ذرات تقویت‌کننده، دیسک سایشگر توانایی بیشتری در نفوذ به سطح نمونه را دارد که می‌تواند منجر به درگیر شدن جوانب پین با سطح نمونه شود و در کل این قضیه می‌تواند باعث ایجاد ناهمواری بیشتر در سطح نمونه شود. با افزایش این ناهمواری‌ها در سطح نمونه، مقاومت سطح نمونه در برابر حرکت دیسک بیشتر می‌شود و در نتیجه ضریب اصطکاک بالا و ثابت می‌ماند؛ اما نمونه ۴ رفتار متفاوتی از ضریب اصطکاک نسبت به نمونه‌های قبلی را نشان داد. به این صورت که در ابتدا اصطکاک بین نمونه و دیسک بالا بوده و سپس طی سایش از این مقدار کاسته شده و به یک حالت ثابتی از سایش رسید به نحوی که ضریب اصطکاک در پایان فرایند سایش عدد یک را نشان داد. این رفتار بیانگر سایش خراشان در نمونه است به طوری که ذرات الماس سطح دیسک را ساییده است و به یک حالت پایدار از تماس سطحی رسیده است. نمونه‌های ۵ و ۸ و ۹ نیز رفتار مشابهی با نمونه ۴ دارد ولی با این تفاوت که ضریب اصطکاک در انتهای سایش در نمونه‌های ذکر شده اعداد مختلفی را نشان داده است. با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به نمونه‌هایی که کبالت در ساختار زمینه‌ی آن‌ها وجود دارد میزان ضریب اصطکاک کاهش یافته است. علت این قضیه را این‌گونه می‌توان شرح داد که با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده سختی نمونه و مقاومت سطح نمونه در برابر دیسک افزایش یافته است؛ بنابراین از افزایش میزان ناهمواری‌ها جلوگیری شده و سطح سایش یکنواخت‌تری ایجاد شده است که این قضیه می‌تواند باعث کاهش ضریب اصطکاک شود، همچنین در کامپوزیت‌ها علاوه بر دلایل بالا، استفاده از ذرات کبالت نیز باعث کمتر شدن ضریب اصطکاک این کامپوزیت شده است. HCP بودن ساختار کبالت سبب کاهش ضریب اصطکاک و در نهایت افزایش مقاومت در برابر سایش شد [۲۸]. کبالت در دماهایی که ساختار HCP دارد، به صورت یک روان‌کننده‌ی جامد عمل کرد [۲۹]. همچنین مشاهده شد نمونه‌هایی که کبالت در کنار الماس در ترکیب آن‌ها حضور دارد ضریب اصطکاک طی فرایند سایش کاهش یافته است. با بررسی نمونه‌های ۶ و ۷ مشاهده شد که ضرایب اصطکاک این دو نمونه با وجود اینکه دارای الماس هستند اما مقادیر بالای اصطکاک و روند ثابتی را از خود نشان دادند و این می‌تواند به علت بالا بودن استحکام و سختی این دو نمونه باشد که در مواجهه با سطح دیسک تغییر نکردند، اما برای مقایسه این دو نمونه می‌توان گفت نمونه ۷ که حاوی برنز بود رفتار اصطکاکی مناسب‌تری نسبت به نمونه ۶ از خود نشان

۳ سایش شدید چسبان نشان داده شد (شکل ۱۰). در این نمونه سطوح ورقه‌ای مختلفی از سطح کنده‌شده و سایش چسبان بوده و انرژی و سطح تماس دیسک با نمونه منجر کنده شدن حجمی مواد از نمونه شده است. شکل ۱۱ ذرات الماس به‌خوبی نقش خود را در نمونه ۴ نشان داده‌اند، این ذرات همان‌طور که در شکل مشخص شده در زمینه باقی‌مانده است [۲۸].

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، تولید کامپوزیت زمینه آلیاژهای مس تقویت‌شده با ذرات الماس میکرونی و بررسی خواص مکانیکی این کامپوزیت است. از مهم‌ترین مسائل ساخت این نوع کامپوزیت، بهینه‌سازی استحکام ذرات الماس در زمینه فلزی و خواص سایشی مدنظر این نوع کامپوزیت است. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

۱- حضور عنصر کبالت در بین عناصر مس و قلع باعث افزایش دمای ذوب ترکیب و تغییرات فازی و ساختاری در این نمونه شده است و همین موضوع باعث به وجود آمدن ساختار متناسب برای انتخاب زمینه کامپوزیت شد.

۲- اتصال الماس در زمینه مس-قلع-کبالت اتصال بهتری نسبت به الماس در زمینه مس-قلع دارد

۳- اتصال الماس در زمینه مس-قلع-کبالت به نظر اتصال بهتری نسبت به الماس در زمینه مس-قلع دارد که دلیل آن کاهش تخلخل در نمونه دارای کبالت است که این کاهش تخلخل به دلیل رطوبت ایجادشده در الماس و یکدست شدن آن است. همچنین الماس با پوشش تیتانیوم اتصال تقریباً بهتری نسبت به الماس بدون پوشش به زمینه داشته و همین امر منجر به افزایش عمر الماس در زمینه کامپوزیت گردید.

۴- با اضافه کردن الماس به ساختار کامپوزیت، استحکام خمشی نمونه ۴۹/۶٪ کاهش یافت که این به دلیل حضور ذرات سرامیکی الماس در ساختار زمینه است.

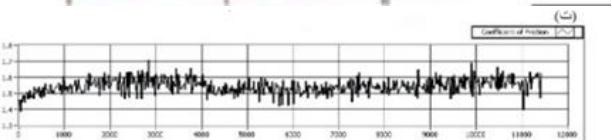
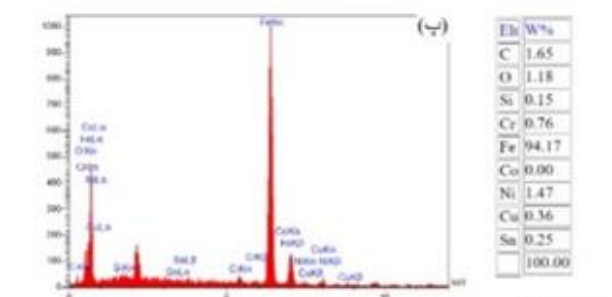
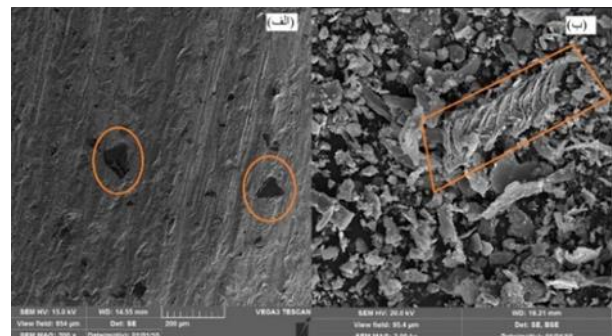
۵- در هر دو نمونه حاوی الماس با ذرات ۱۰۰ و ۱۵ میکرونی، ذرات به‌طور یکنواخت در ترکیب فلزی زمینه توزیع شده است. در نمونه با ذرات ۱۵ میکرونی الماس، اتصال الماس به زمینه بسیار عالی بوده و اثری از شکستگی و تخریب هم در سطح الماس مشاهده نشد و این ویژگی‌ها می‌تواند به علت ریزتر بودن اندازه الماس‌ها باشد.

۶- با افزودن الماس با پوشش تیتانیوم، استحکام خمشی ۱۸/۲٪ نسبت به نمونه دارای الماس بدون پوشش تیتانیوم افزایش پیدا کرده

داد و در طی فرایند سایش ضریب اصطکاک آن کاهش یافت. نمونه ۱۰ نیز به همین دلیل رفتار مناسب سایشی را از خود نشان نداد و در طی فرایند سایش ضریب اصطکاک آن افزایش پیدا کرد.

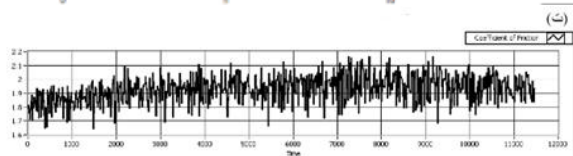
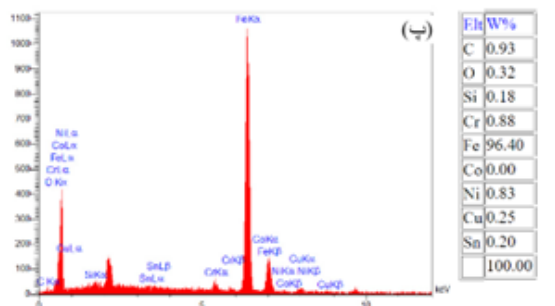
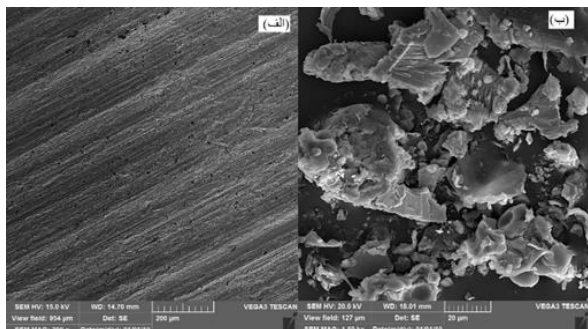
۳-۷- بررسی سطوح سایش

یکی از راهکارهای مؤثر جهت مطالعه رفتار سایشی مواد، بررسی سطوح سایش از نظر مورفولوژی و ترکیب شیمیایی سطح و لایه‌های شکل‌گرفته بر روی آن است. تصویر میکروسکوپی سطح سایش و ذرات ناشی از سایش نمونه‌های ۱ تا ۱۰ ارائه شده‌اند. شکل ۸ نمایانگر مورفولوژی سطح سایش نمونه ۱ است. ذرات ناخالصی در سطح ماده وجود دارد که ممکن است طی فرایند سایش از سطح دیسک کنده‌شده و به نمونه چسبیده باشد. در این نمونه خطوط سایش مشاهده شد اما این خطوط عمق بالایی نداشته و فاصله آن‌ها از یکدیگر زیاد است و دچار سایش چسبان شده است [۲۷].

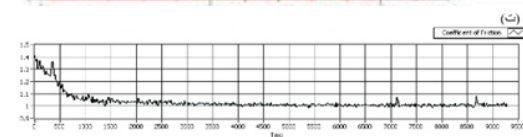
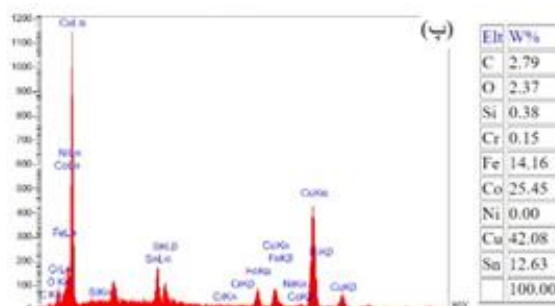
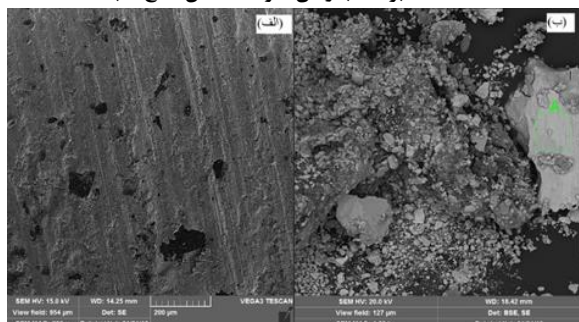


شکل ۸: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۱ (مس-قلع)

در شکل ۹ خطوط سایش در نمونه ۲ تراکم بیشتری دارند و از ظاهر این خطوط مشخص است که رفتار سایشی بهتری نسبت به نمونه ۱ داشته ولی بازهم در مناطقی در نمونه ۲ سطوح مختلفی از کامپوزیت کنده‌شده و رفتار سایش چسبان در این نمونه مشاهده شد. در نمونه



شکل ۱۰: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۳ (مس-قلع-کبالت)



شکل ۱۱: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۴ (مس-قلع-کبالت-الماس)

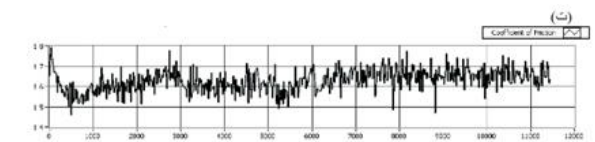
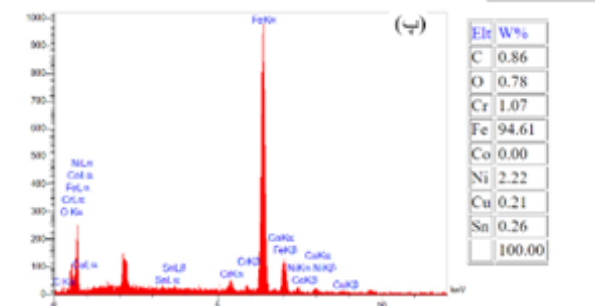
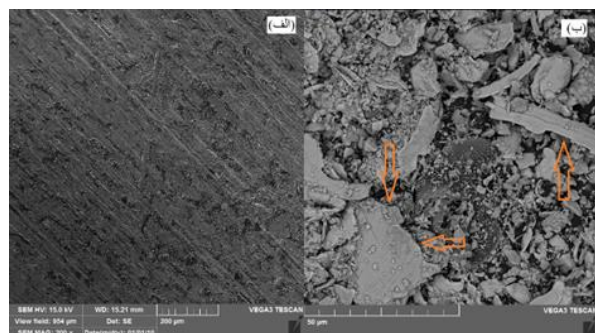
است و دلیل آن اتصال قوی بین ذرات الماس با پوشش تیتانیوم و زمینه است.

۷- با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به نمونه‌هایی که کبالت در ساختار زمینه‌ی آن‌ها وجود دارد میزان ضریب اصطکاک کاهش یافت.

۸- نمونه دارای الماس نسبت به نمونه‌های فاقد الماس مقاومت سایشی خوبی داشته و ذرات الماس در زمینه کامپوزیت باقی ماندند.

۹- با بررسی سطوح شکست مشخص شد که نمونه مس-قلع و نمونه برنز دارای شکست ترد بوده درحالی‌که نمونه حاوی مس-قلع-کبالت دارای شکست نرم است.

۱۰- با بررسی سطوح شکست مشاهده شد پوشش‌های الماس نسبتاً روی الماس باقی‌مانده‌اند و این پوشش بارنگ روشن‌تری نمایان است که می‌توان نتیجه گرفت، اتصال تیتانیوم به الماس قوی‌تر از اتصال تیتانیوم به زمینه مس-قلع-کبالت است.



شکل ۹: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۲ (برنز)

۹- منابع

- coated diamond reinforced Cu matrix bioinspired laminated composites" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 938, doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168584, 2023.
- [13] T. Hagio, J. Park, Y. Naruse, Y. Goto, Y. Kamimoto, R. Ichino, T. Bessho, "Electrodeposition of nano-diamond/copper composite platings: Improved interfacial adhesion between diamond and copper via formation of silicon carbide on diamond surface" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 403, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126322, 2020.
- [14] H. Cao, D. Xiong, "Preparation of diamond/copper composites modified by Ti3C2Tx as interlayer with enhanced thermal conductivity" *Diamond and Related Materials*, Vol. 118, doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108504, 2021.
- [15] J. Zang, H. Li, J. Sun, Y. Shen, N. Su, X. Feng, "Microstructure and thermal conductivity of Cu-Cu2AlNiZnAg/diamond coatings on pure copper substrate via high-energy mechanical alloying method" *Surfaces and Interfaces*, V. 21, doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100742, 2020.
- [16] L. Zhou, J. Liu, R. Ding, J. Cao, K. Zhan, B. Zhao, "A review of diamond interfacial modification and its effect on the properties of diamond/Cu matrix composites" *Surfaces and Interfaces*, Vol. 40, doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103143, 2023.
- [17] J. Sun, J. Zang, H. Li, X. Feng, Y. Shen, "Influence of diamond content and milling duration on microstructure and thermal conductivity of Ti-coated diamond/copper composite coating on copper substrate" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 259, doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124017, 2021.
- [18] Z. Xie, H. Guo, W. Xiao, X. Zhang, S. Huang, M. Sun, H. Xie, "Interfacial structures and their effect on thermal conductivity and mechanical properties of diamond/Cu-B composites" *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.34(1), Issue 1, doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66395-2, 2024.
- [19] C. Wei, X. Wang, J. Wen, Q. Wang, Z. Donga, "Interface improvement of diamond/copper composites through a low-temperature high-efficiency coating method" *Thin Solid Films*, Vol.804, doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140486, 2024.
- [20] K. Lu, C. Wang, H. He, X. Fan, F. Chen, F. Qi, C. Wang, "Numerical simulation and experimental
- [1] C. Artini, M. Muolo, and A. Passerone, "Diamond-metal interfaces in cutting tools: a review," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 7, pp. 3252-3264, doi.org/10.1007/s10853-011-6164-6, 2012.
- [2] L. De Oliveira, R. d. R. Paranhos, R. d. S. Guimarães, G. Bobrovitchii, and M. Filgueira, "Use of PM Fe-Cu-SiC composites as bonding matrix for diamond tools," *Powder metallurgy*, vol. 50, no. 2, pp. 148-152, doi.org/10.1179/174329007X161982, 2007.
- [3] Y.-Z. Hsieh and S.-T. Lin, "Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 72, no. 2, pp. 121-125, doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00419-9, 2001.
- [4] H. Dong, "A study of mechanical properties and microstructure of Cu-based matrixes for diamond ultrathin sawing," *Results in Physics*, vol. 12, pp. 748-753, doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.041, 2019.
- [5] R. German, *Sintering: from empirical observations to scientific principles*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [6] H. Tönshoff, H. Hillmann-Apmann, and J. Asche, "Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications," *Diamond and Related Materials*, vol. 11, no. 3-6, pp. 736-741, doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00561-1, 2002.
- [7] J. C. Sung and M. Sung, "The brazing of diamond," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 27, no. 2, pp. 382-393, doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.11.011, 2009.
- [8] J. Xu, A. H. Sheikh, and C. Xu, "Interfacial failure modelling of diamond bits made of particulate composites," *Composite structures*, vol. 155, pp. 145-159, doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.075, 2016.
- [9] Y. Yu, X. Tie, G. Zhang, G. Huang, H. Huang, and X. Xu, "Comparison of brazed and sintered diamond tools for grinding of stone," *Materials Research Innovations*, vol. 18, no. sup2, pp. S2-869-S2-873, doi.org/10.1179/1432891714Z.00000000052, 2014.
- [10] P. Han, F.-r. Xiao, W.-j. Zou, and B. Liao, "Influence of hot pressing temperature on the microstructure and mechanical properties of 75% Cu-25% Sn alloy," *Materials & Design*, vol. 53, pp. 38-42, doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.024, 2014.
- [12] F. Luo, X. Jiang, H. Sun, J. Shang, Y. Zhang, Rui Shu, "Mechanical and thermal properties of Cu-

- the thermal transport properties in electrodeposited copper-diamond composite materials” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.791, 2019.
- [27] A. Abyzov, F. Shakhov, A. Averkin, V.Nikolaev, “Mechanical properties of a diamond–copper composite with high thermal conductivity” *Materials & Design*, Vol. 87, pp. 527-539, 2015.
- [28] N. Poulouse, P. Selvakumar, J. T. Philip, “Experimental Investigation on Tribological Behaviour of Copper Diamond Composites” *International Journal of Vehicle Structures & Systems (IJVSS)*, Vol. 14, No. 6, p746, 2022.
- [29] J. D. Donaldson and D. Beyersmann, "Cobalt and cobalt compounds," *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, doi.org/10.1002/14356007.a07_281.pub2, 2000.
- [30] A.Handbook, "ASM Handbook Volume 18–Friction, Lubrication and Wear Technology," ed: ASM International, OH, 1992.
- investigation on heat transfer and hydraulic characteristics of rectangular microchannel heat sinks using high thermal conductivity diamond/copper composites, *Diamond and Related Materials*, Vol.147, doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111371, 2024.
- [21] <https://www.astm.org/d0790-17.html>.
- [22] <https://www.astm.org/b0962-17.html>.
- [23] M. Zeren and Ş. Karagöz, "Sintering of polycrystalline diamond cutting tools," *Materials & design*, vol. 28, no. 3, pp. 1055-1058, doi.org/10.1016/j.matdes.2005.09.018, 2007.
- [24] H. Okamoto, M. E. Schlesinger and E. M. Mueller, eds 2016 *ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams* (Materials Park, Ohio: ASM International).
- [25] P. Vityaz, C. Ковалева, V. Zhornik, T. Grigoreva, N. Lyakhov, “Mechanical Alloying of Copper- or Iron-Based Metallic Binders for Diamond Tools” *Powders journal*, Vol.2, pp.403-420, 2023.
- [26] H.Cho, D.Yan, J.Tam, U.Erb, “Effects of diamond particle size on the formation of copper matrix and



Experimental Investigation of the Effect of Fuel Injection Timing on the Combustion Regime of the Direct-Injection Internal Combustion Engine – Transition from Conventional Compression Ignition Combustion to Low Temperature Combustion

Morteza Fathi*¹

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

Abstract

The application of the low temperature combustion (LTC) technology improves the performance and emission characteristics of the engine. However, the most important challenges regarding the integration of this technology in mass-production engines are the limited operating range and uncontrollability. To get the utmost from LTC advantages it is possible to use the diesel combustion in load points undeliverable by LTC. Experimental study in this research on a diesel engine reveals that the change in fuel injection timing from 176 to 2 CAD, bTDC (crank angle degrees before top dead center) leads to the combustion regime change. Fuel injection near top dead center from 11 to 2 CAD, bTDC, resulting in the dependence of the injection and combustion processes, leads to the diesel combustion. In this region, the combustion sensitivity as a measure of fuel injection timing on combustion timing is between 1.2 to 1.3. Advancing the injection to early timings in the compression stroke from 86 to 176 CAD, bTDC and providing enough time for the complete mixing of the fuel and air, yields HCCI combustion having almost zero combustion sensitivity. The fuel injection timing between these ranges, resulting in a mixture which is neither fully homogeneous nor fully stratified, leads to the PPC. In this region, the combustion sensitivity is between 0.1 to 0.2.

Keywords

Internal Combustion Engine
Diesel Combustion
Low Temperature Combustion
Homogeneous Charge
Compression Ignition
Combustion
Partially Premixed Combustion
Fuel Injection

Received: 08.24.2024

Revised: 11.08.2024

Accepted: 12.02.2024

*Corresponding Author

Morteza Fathi

Email

m-fathi@nus.ac.ir;

morteza.fathi@yahoo.com

1- Introduction

Nowadays, due to the role of internal combustion engines in fossil fuel consumption and environmental pollution, the desire for this type of powertrain is being decreased. Especially in the automotive sector, vehicles that use internal combustion engines are being replaced by electric vehicles, including fully electric vehicles and hybrid vehicles. In order to maintain the presence of internal combustion engines, at least in hybrid vehicles, solutions must be found to overcome their challenges. Therefore, researchers in industry and academia must find solutions to overcome the challenges and disadvantages that accompany internal combustion engines. For this reason,

traditional internal combustion engines are being modified and new combustion technologies have emerged.

Low temperature combustion, is the spontaneous combustion of a homogeneous (fully premixed) or partially premixed fuel-air mixture without any external ignition initiation mechanism. It allows simultaneous reduction of fuel consumption and emissions. Moreover, it makes it possible to substitute the fossil fuel with alternative fuels. Therefore, applicable integration of this concept in the engine cycle can greatly reduce the risk of internal combustion engines being rejected in the future of prime movers. Although low temperature



combustion engines show significant advantages, they are accompanied with some disadvantages which makes them a risky solution for mass-production engines. Reactivity controlled compression ignition, partially premixed combustion and homogeneous charge compression ignition are three main types of low temperature combustion engines. In homogeneous charge compression ignition combustion engines, the homogeneous fuel-air mixture presents in the combustion chamber prior to the start of the combustion and the auto ignition of the charge due to the increase in pressure and temperature of the charge resulted from the piston movement governs the combustion process initiation. Therefore, there is no external control over the combustion process. This is the main challenge of the applicable utilization of the concept in engines.

Some researchers tried to modify the homogeneous charge compression ignition concept to overcome the problem of the uncontrollability. Therefore, partially premixed combustion and reactivity controlled compression ignition combustion strategies are proposed. The idea behind these alternative low temperature combustion concepts is that the main contributor to the problems with the homogeneous charge compression ignition combustion is resulted from the homogeneity of the charge. Hence, the combustion of a fully homogeneous charge should be avoided. Therefore, the proposed alternative concepts reduce the amount of the homogeneity level of the charge for the sake of finding some kind of control over the auto ignition and to yield milder combustion. The homogeneous charge preparation in the homogeneous charge compression ignition concept can be done in two ways. It is either by mixing the fuel and air before the entrainment into the combustion chamber or by the direct injection of the fuel early enough to make an in-cylinder homogeneous mixture due to the evaporation of the injected fuel and charge motion within the combustion chamber. In the partially premixed combustion, the fuel is directly injected into the cylinder but the injection timing is neither too early (as occurs in the direct injection homogeneous

charge compression ignition concept) to produce the desirable level of non-homogeneity nor too late (as occurs in the direct injection diesel combustion) to prevent highly stratified charge. This transient combustion concept makes it possible to have some kind of control over the combustion process although not a control knob as in the controlled combustion of the diesel concept. The reactivity controlled compression ignition combustion uses the difference in the reactivity of the entrained fuels as a strategy to control the combustion process. Although partially premixed combustion and reactivity controlled compression ignition improve the controllability of the combustion and yield milder combustion, they still cannot cover the whole load range of the operational engine. Therefore, another combustion strategy should be added for the ratings which cannot be obtained by the low temperature combustion. In order to use this configuration for mass-production engines, they should have similarities as much as possible. One possible range extension strategy is the combination of different combustion concepts having similarities in the fueling system. Therefore, diesel, partially premixed combustion and direct injection homogeneous charge compression ignition combustion strategies can be utilized to this end. They can deliver the whole required ratings by optimum performance and emission characteristics while using the same fuel injection system and the direct injection homogeneous charge compression ignition is the core combustion concept in this method.

2- The Problem Study

In this study, the effect of fuel injection timing on the combustion regime of internal combustion engines that utilize direct fuel injection into the combustion chamber is investigated. The two general combustion technologies that are studied included diesel combustion and low-temperature combustion. The distinction between these two types of combustion technologies is the level of time dependence of the fuel injection and combustion phenomena.

In diesel combustion, there is a high dependence between these phenomena; while in low-temperature combustion, these two phenomena are fully separated in terms of time window.

3- Results and Discussion

The two types of low-temperature combustion that are investigated in this study are partially premixed combustion and homogeneous charge compression ignition combustion. The difference between these two types of low-temperature combustion is the level of homogeneity of the fuel-air mixture before combustion begins. In partially premixed combustion, despite proper mixing of fuel and air before the start of combustion, there is some local stratifications in the combustion chamber, while in homogeneous charge compression ignition combustion, this factor can be ignored and the fuel and air mixture in the combustion chamber is considered completely homogeneous. In summary, the results of this study can be summarized as follows:

1. Fuel injection near top dead center and the time dependence of injection and combustion phenomena lead to diesel combustion. By advancing fuel injection to early timings in the compression stroke and allowing sufficient time for homogeneous mixing of fuel and air, compression ignition combustion of a homogeneous mixture is achieved. Fuel injection timing between these two ranges, where the mixture is neither completely homogeneous nor completely stratified, leads to nearly premixed combustion.
2. In diesel combustion, there is a close relationship between fuel injection and combustion. In this mode, the combustion of fuel-rich spots starts together with fuel injection. Therefore, the ignition delay is relatively low and the time of fuel injection does not have much effect on it. In low-temperature combustion, advancing fuel injection leads to increase in the ignition delay, increase in the available time for mixing fuel and air, and separation of injection and combustion phenomena.
3. In diesel combustion, the high value of the ignition sensitivity parameter indicates the high sensitivity of the combustion timing to the time of fuel injection. In homogeneous charge compression ignition, the value of this parameter is negligible and close to zero. In partially premixed combustion, the amount of this parameter is between these two limits and it is decreased by advancing injection timing. Here, ignition sensitivity is neither as high as diesel combustion, so that fuel injection can be used as the controller of combustion timing, nor as low as homogeneous charge compression ignition, with negligible effect on combustion. This reduction of ignition sensitivity to fuel injection timing leads to the uncontrollability challenge of low-temperature combustion engine. Therefore, the partially premixed combustion improves ignition controllability by increasing the stratification level of the homogeneous mixture.
4. In diesel combustion, the emission level of unburned hydrocarbons and carbon monoxide are negligible. Advancing fuel injection and in the range of low-temperature combustion, the amount of these emissions increase.
5. In diesel combustion, high levels of soot and nitrogen oxides are formed. However, in low-temperature combustion, the amount of these emissions is reduced simultaneously. In homogeneous charge compression ignition combustion, the emission of these pollutants is very small whereas in the intermediate partially premixed combustion which lies at the boundary between diesel combustion and homogeneous charge compression ignition, the level of soot and nitrogen oxides pollution is placed between the levels of two combustion regimes.

4- References

- [1] Fathi M, Jahanian O, Ganji DD, Wang S, Somers B. (2017). Stand-alone single- and multi-zone modeling of direct injection homogeneous charge compression ignition (DI-HCCI) combustion engines. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1181-90.
- [2] Gupta SK, Krishnasamy A. (2024). A relative comparison of HCCI, PCCI, and RCCI combustion strategies: an alternative fuels perspective. *International Journal of Engine Research*, 25(6), 1078-1092.
- [3] Fakhari AH, Gharehghani A, Salahi MM, Mahmoudzadeh Andwari A. (2024). RCCI combustion of ammonia in dual fuel engine with early injection of diesel fuel. *Fuel*, 365, 131182.
- [4] Krishnan MG, Rajkumar S, Devarajan Y, Rajiv A. (2024). A comprehensive review on advancement and challenges of renewable biofueled reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine. *Journal of the Energy Institute*, 113, 101540.
- [5] Selvaraj K. (2024). A comprehensive review: role of fuel injection methodologies on performance enhancement and mitigation of emissions in the diesel engine. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 36(2), 219-43.
- [6] Rajendran S, Dhairiyasamy R, Jaganathan S, Murugesan S, Muthusamy R, Periannan S, Muniyappan G, Jaganathan B, Srinivasan K, Elangandhi H, Annamalai E. (2023). Effect of injection timing on combustion, emission and performance characteristics of safflower methyl ester in CI engine. *Results in Engineering*, 20, 101599.



بررسی تجربی اثر زمان پاشش سوخت بر نوع احتراق در موتور درون سوز با پاشش مستقیم گذر از احتراق اشتعال تراکمی سنتی به احتراق کم‌دما

مرتضی فتحی^{*۱}

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

چکیده

استفاده از فناوری احتراق کم‌دما در موتور منجر به بهبود مشخصات عملکردی و آلاینده‌گی می‌شود. لیکن، مهم‌ترین موانع استفاده از این نوع احتراق در تولید انبوه موتورها عبارت‌اند از بازه کارکردی محدود و چالش کنترل ناپذیری احتراق. برای استفاده از مزایای این نوع احتراق، در آن نقاط کاری که احتراق کم‌دما قادر به ارایه آن نیست، می‌توان از احتراق دیزلی استفاده نمود. مطالعه تجربی در این پژوهش بر روی یک موتور دیزلی، آشکار می‌سازد که تغییر زمان شروع پاشش سوخت به درون محفظه احتراق موتور از ۱۷۶ تا ۲ درجه زاویه لنگ پیش از نقطه مرگ بالا، منجر به تغییر نوع احتراق می‌شود. تزریق سوخت در نزدیکی نقطه مرگ بالا از ۱۱ تا ۲ درجه زاویه لنگ پیش از نقطه مرگ بالا که نتیجه آن وابستگی زمانی پدیده‌های تزریق و احتراق است، منجر به احتراق دیزلی می‌گردد. در این ناحیه، مقدار حساسیت احتراق که شاخصی است از میزان اثرگذاری زمان‌بندی پاشش سوخت بر زمان‌بندی احتراق بین ۱/۲ تا ۱/۳ است. با پیش‌اندازی پاشش سوخت به زمان‌های زودتر در مرحله تراکم از ۸۶ تا ۱۷۶ درجه زاویه لنگ پیش از نقطه مرگ بالا و فراهم آوردن فرصت کافی برای اختلاط همگن سوخت و هوا، احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن که مقدار حساسیت احتراق در آن حدوداً صفر است، به دست می‌آید. تزریق سوخت در بین این دو محدوده که مخلوط نه کاملاً همگن و نه کاملاً لایه‌لایه است، منجر به احتراق تقریباً پیش آمیخته می‌شود. در این ناحیه، مقدار حساسیت احتراق بین ۰/۱ تا ۰/۲ است.

کلمات کلیدی

موتور درون سوز
احتراق دیزلی
احتراق کم‌دما
احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن
احتراق تقریباً پیش آمیخته
پاشش سوخت

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

*نویسنده مسئول

مرتضی فتحی

ایمیل

m-fathi@nus.ac.ir
morteza.fathi@yahoo.com

۱- مقدمه

امروزه، به دلیل نقش موتورهای درون‌سوز در مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیطی، تمایل به این نوع از نیروده‌ها کاهش یافته است. به‌ویژه در بخش خودرویی، خودروهایی که از موتورهای درون‌سوز استفاده می‌نمایند در حال جایگزینی با خودروهای برقی، شامل خودروهای کاملاً برقی و خودروهای دورگه هستند. به‌منظور حفظ حضور موتورهای درون‌سوز، دست‌پایین در خودروهای دورگه، باید راه‌حلهایی برای برون‌رفت از چالش‌های آنها یافت؛ بنابراین، پژوهشگران صنعت و دانشگاه باید برای غلبه بر چالش‌ها و معایبی که همراه با موتورهای درون‌سوز هستند چاره‌اندیشی نمایند. به‌این‌علت، موتورهای درون‌سوز سنتی در حال اصلاح هستند و فناوری‌های احتراقی جدید پدید آمده‌اند.

احتراق کم‌دما، یک احتراق خودبه‌خودی مخلوط همگن (کاملاً پیش آمیخته) یا تقریباً پیش آمیخته از هوا و سوخت بدون استفاده از منبع انرژی خارجی جهت اشتعال است [۱]. این فناوری، راه‌حلهایی را برای کاهش هم‌زمان مصرف سوخت و آلاینده‌گی ارائه می‌نماید [۱]. افزون بر آن، این فناوری امکان استفاده از سوخت‌های جایگزینی همچون بیودیزل [۲]، آمونیاک [۳]، سوخت‌های زیستی [۴] و متانول [۵] به‌جای سوخت‌های فسیلی را فراهم می‌آورد؛ بنابراین، به‌کارگیری صحیح این نوع احتراق در چرخه موتور می‌تواند خطر رویگردانی از موتورهای درون‌سوز در آینده نیروده‌ها را تا حد زیادی کاهش دهد. علیرغم اینکه موتورهای کم‌دما سوز مزایای قابل‌ملاحظه‌ای دارند، معایبی نیز همراه با این موتورها وجود دارد که آنها را به یک راه‌حل چالشی برای استفاده در مقیاس انبوه تبدیل می‌نماید. چالش‌های



کنترل بر فرآیند احتراق و همچنین احتراق آرام تر را ممکن سازند. در احتراق تقریباً پیش آمیخته، سوخت به صورت مستقیم به درون استوانه تزریق می‌شود. لیکن در این حالت، زمان پاشش نه مانند احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن خیلی زود است تا بتواند سطحی از ناهمگنی مطلوب ایجاد نماید و نه آن قدر مانند احتراق دیزلی دیر است تا بتواند از ایجاد مخلوط بسیار لایه‌لایه و جبهه شعله به صورت محلی غنی جلوگیری نماید. این نوع احتراق میانی نوعی از کنترل بر روی فرآیند احتراق را در اختیار قرار می‌دهد؛ هرچند نقش تزریق سوخت، مانند نقش آن در احتراق کنترل‌شده دیزلی، یک عملکرد کنترلی نخواهد بود.

موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن دارای مزایای آلاینده‌گی و بازدهی بهتری نسبت به موتورهای با احتراق تقریباً پیش آمیخته هستند [۱۶-۱۴]؛ لیکن احتراق تقریباً پیش آمیخته، کنترل‌پذیری احتراق را بهبود می‌بخشد، احتراق آرام‌تری را به دست می‌دهد و بازه کارکردی را گسترش می‌دهد. با این وجود، همچنان قادر به ارائه بازه کامل توانی لازم برای یک موتور کارکردی نیست؛ بنابراین، نوع دیگری از احتراق باید برای محدوده‌های توانی که توسط فناوری‌های احتراقی کم‌دما قابل‌دستیابی نیستند، بکار گرفته شود. برای اینکه از ترکیب انواع احتراقی بتوان در موتورهای تولید انبوه استفاده نمود، فناوری‌های احتراقی ترکیب‌شونده باید مشابهت‌های حداکثری باهم داشته باشند. یک روش ممکن برای دستیابی به راهبرد گسترش گستره توانی، ترکیب فناوری‌های احتراقی دارای سامانه سوخت‌رسانی مشابه است؛ بنابراین، برای دستیابی به این هدف می‌توان از ترکیب فناوری‌های دیزلی، احتراق تقریباً پیش آمیخته و احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن با تزریق مستقیم سوخت استفاده نمود. این ترکیب قادر خواهد بود که تمام بازه توانی موردنیاز موتور با مشخصات عملکردی و آلاینده‌گی بهینه را به دست دهد درحالی‌که از سامانه سوخت‌رسانی مشابهی بهره می‌گیرد.

مطالعات موجود در ادبیات فن در زمینه سامانه سوخت‌رسانی، بر روی بررسی تأثیرات مشخصات این سامانه بر عملکرد موتورها در حالت استفاده از صرفاً یکی از انواع احتراق یا در حالت استفاده ترکیبی از دو نوع احتراق، مشتمل بر احتراق اشتعال تراکمی سنتی و یکی از انواع احتراق کم‌دما متمرکز شده است.

در دسته نخست از این مطالعات، مواردی همچون تأثیر فشار [۱۷] و [۱۸]، نرخ و نوع [۱۹] و [۲۰] و زمان‌بندی [۱۸] و [۲۱] پاشش سوخت بر عملکرد موتورهای اشتعال تراکمی سنتی موردبررسی قرار گرفته

موتورهای کم‌دما سوز، شامل مواردی همچون فقدان یک روش کنترلی مستقیم، بازه عملکردی محدود و آلاینده‌های مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته بیشتر، به‌خوبی در ادبیات فن مطرح شده است [۸-۶]. سه نوع مهم از موتورهای کم‌دما سوز عبارت‌اند از «موتور اشتعال تراکمی کنترل شونده با قابلیت واکنشگری سوخت» [۹]، «موتور با احتراق تقریباً پیش آمیخته» [۱۰] و «موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن» [۱۱].

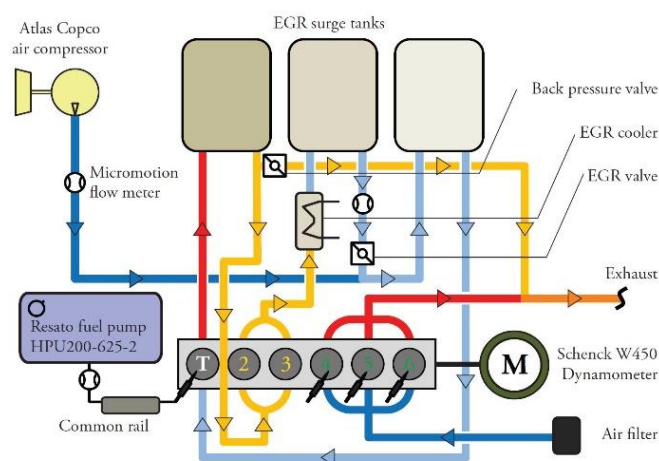
در موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن، مخلوطی همگن از سوخت و هوا پیش از شروع احتراق در محفظه احتراق موجود است. تهیه مخلوط همگن سوخت و هوا در فناوری اشتعال تراکمی مخلوط همگن به دو روش می‌تواند انجام شود. این مخلوط همگن، یا با اختلاط سوخت و هوا پیش از ورود به محفظه احتراق یا با پاشش مستقیم زود هنگام سوخت به درون استوانه قابل تهیه است. در حالت پاشش مستقیم، زمان پاشش باید به حد کافی زود باشد تا مخلوطی همگن از سوخت و هوا بتواند بواسطه تبخیر سوخت تزریقی و جریان محتویات داخل محفظه احتراق تهیه شود. خود اشتعالی مخلوط، با فشار و دمای افزایش‌یافته ناشی از تراکم، شروع فرآیند احتراق را کنترل می‌نماید؛ بنابراین، هیچ ابزار خارجی کنترلی برای فرآیند احتراق وجود ندارد. این موضوع، مهم‌ترین چالش به‌کارگیری عملی این فناوری در موتورها می‌باشد. افزون بر آن، این نوع احتراق به‌گونه‌ای نقض غرض نیز می‌باشد، زیرا احتراق مخلوطی که کاملاً همگن باشد نتیجه‌اش انفجار است؛ بنابراین محققان همواره در پی این هستند که با حفظ مزایایی که این موتورها دارند با برهم‌زنی همگنی کامل مخلوط، دستیابی عملی به احتراق کم‌دما را ممکن سازند [۱۲]. چالش مهم دیگر در خصوص موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن، بازه کارکردی محدود آنها است [۷].

برخی از پژوهشگران تلاش نمودند که فناوری احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن را تغییر دهند تا بر مشکل کنترل‌ناپذیری و بازه محدود کارکردی آن فائق آیند؛ بنابراین، فناوری‌های احتراقی تقریباً پیش آمیخته و اشتعال تراکمی کنترل شونده با قابلیت واکنشگری سوخت پیشنهاد شدند [۱۰ و ۱۳]. ایده مستتر در این پژوهش‌ها برای ارائه انواع جایگزین احتراق کم‌دما این است که مهم‌ترین عامل در بروز مشکلات موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن از همگنی مخلوط نشأت می‌گیرد؛ بنابراین، از احتراق یک مخلوط سوخت و هوای کاملاً همگن باید اجتناب شود. از این رو، فناوری‌های جایگزین پیشنهادی از میزان همگنی مخلوط می‌کاهند تا نوعی از

احتراق است. در موتور دیزلی، هم‌زمان با پاشش سوخت و تشکیل نواحی غنی از سوخت، احتراق آغاز می‌شود؛ لیکن در موتورهای با احتراق کم‌دما، فاصله معناداری بین پدیده‌های پاشش و احتراق وجود دارد. با تعجیل در پاشش سوخت، از زمان‌بندی مرسوم احتراق دیزلی سنتی، ابتدا محدوده احتراق تقریباً پیش‌آمیخته به دست خواهد آمد. در ادامه و با پیش‌اندازی بیشتر زمان پاشش سوخت، احتراق حاصل، احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن خواهد بود. در شرایط احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، لایه‌لایه شدن حاصل از زمان‌بندی پاشش مستقیم سوخت به درون محفظه احتراق، پارامتری با اثرگذاری چشمگیر نیست [۱۲].

۲- ماتریس آزمون

نتایج تجربی ارائه‌شده در این مطالعه، حاصل آزمون‌هایی است که بر روی موتور داف ایکس ای ۳۵۵ سی^۱ اجرا شده است [۱]. نمای کلی بستر آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. لگام ترمز جریان گردابی آب‌خنک شنک دبلو ۲۴۵۰ برای تنظیم سرعت دورانی موتور استفاده می‌شود. فشار هوای ورودی با استفاده از یک کمپرسور هوای اطلس کوپکو^۲ تا ۵ بار می‌تواند تقویت شود.



شکل ۱: بستر آزمون

تزریق مستقیم سوخت به درون سیلندر با استفاده از پمپی انجام می‌شود که قابلیت تحویل سوخت با فشار حداکثر ۴۲۰۰ بار را دارد. یک انباشتگر سوخت به حجم تقریبی ۰/۱۱۴ دسی مترمکعب در نزدیکی افشانه سوخت (به فاصله تقریبی ۰/۲ متر) قرار دارد تا بتواند

است. در دسته دوم از این مطالعات، تأثیر مشخصات سامانه سوخت‌رسانی بر عملکرد موتورهایی که از یکی از انواع احتراق کم‌دما بهره می‌گیرند، بررسی شده است. این مطالعات، شامل انواع احتراق کم‌دما همچون احتراق اشتعال تراکمی کنترل شونده با قابلیت واکنشگری سوخت [۲۵-۲۲]، احتراق تقریباً پیش‌آمیخته [۲۶] یا احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن [۲۷] می‌باشد. در نهایت، در دسته سوم، مطالعات به بررسی تأثیر مشخصات سامانه سوخت‌رسانی بر عملکرد موتورهایی که از احتراق اشتعال تراکمی سنتی و یکی از انواع احتراق کم‌دما بهره می‌گیرند، می‌پردازند [۳۱-۲۸].

با توجه به برتری‌های مشخصات آلاینده‌گی فناوری‌های احتراقی کم‌دما، استفاده از آنها در حالتی که در شرایط بهینه خود عمل نمایند بر فناوری دیزلی سنتی ترجیح داده می‌شود. با این وجود، در آن نقاط کاری که توسط راهبردهای احتراقی کم‌دما قابل‌ارایه بهینه نیستند، احتراق دیزلی سنتی به کار گرفته می‌شود.

بنابراین در مطالعه حاضر برای گام نهادن در مسیر ارایه این ترکیب از فناوری‌های احتراقی، به بررسی تجربی اثر زمان‌بندی پاشش سوخت بر تغییر رفتار احتراقی موتور پرداخته می‌شود. مبنای بررسی بر این اساس استوار است که وجه تمایز موتور دیزلی و موتور با احتراق کم‌دما پاشش مستقیم، در ارتباط بین پدیده‌های پاشش سوخت و

میزان فشار ورودی دلخواه از اتاق فرمان اعلام می‌شود و فشار با استفاده از یک کنترلر که سیگنال ورودی خود را از حسگر فشار نصب شده بر روی مسیر هوای ورودی دریافت می‌دارد، تنظیم می‌شود.

³ Atlas Copco

¹ DAF XE 355 C

² Schenck W450

شرایط کارکردی مشترک به همراه مشخصات موتور در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی و کارکردی موتور

۱۳۰	قطر استوانه [میلی‌متر]
۱۵۸	طول مسیر جابجایی پیستون [میلی‌متر]
به شکل M	شکل کاسه پیستون
سامانه چندراهه مشترک پاشش مستقیم	نوع پاشش سوخت
۶۰۰	فشار پاشش سوخت [بار]
۱۵/۷	نسبت تراکم
۱۲۰۰	سرعت دورانی موتور [دور در دقیقه]
۴۵	میزان بازخورانی دود [%]
۱/۴	فشار هوای ورودی [بار]
۳۶۳	دمای هوای ورودی [کلوین]
۳۵۵	دمای آب خنک کاری [کلوین]
۷۰	عدد اکتان سوخت

تغییرات زمان تزریق سوخت در این آزمون‌ها از نزدیک به نقطه مرگ بالا آغاز شد و تا نزدیک به ابتدای مسیر رو به بالای پیستون در مرحله تراکم، به عقب برده شد؛ بنابراین بازه تغییرات زمان شروع پاشش سوخت از ۲/۳ درجه زاویه لنگ پیش از نقطه مرگ بالا تا ۱۷۶ درجه زاویه لنگ پیش از نقطه مرگ بالا انتخاب شده است.

۳- نتایج و بحث

در احتراق دیزلی، ارتباط تنگاتنگی بین پدیده‌های پاشش سوخت و احتراق وجود دارد. احتراق، باگذشت زمان کوتاهی از شروع پاشش سوخت که دوره تأخیر در اشتعال نامیده می‌شود، آغاز می‌شود. این پدیده‌ها به دلیل ایجاد نواحی غنی از سوخت هم‌زمان با پاشش در محیطی با فشار و دمای زیاد، وابستگی زمانی به هم دارند. یکی از اصلی‌ترین مشخصه‌های موتورهای کم‌دماسوز با پاشش مستقیم سوخت به درون استوانه، جدایی یا عدم وابستگی پدیده‌های پاشش و احتراق است. این بدان معناست که باید فاصله زمانی قابل ملاحظه‌ای بین این دو پدیده در موتورهای کم‌دماسوز وجود داشته باشد. وجود این جدایی سبب می‌شود از احتراق بسته‌های مخلوط سوخت و هوایی که به صورت موضعی غنی هستند جلوگیری شود. به منظور بررسی تأثیر

شرایط حجمی یک سامانه ریل مشترک را شبیه‌سازی کند و نوسانات فشاری که از پمپ سوخت نشأت می‌گیرد را دفع کند.

برای پاشش سوخت به درون سیلندر از یک افشانه نمونه سامانه ریل مشترک که قابلیت پاشش سوخت تا فشار ۳۰۰۰ بار را دارا است استفاده می‌شود. نازل استفاده شده در آزمون‌ها یک نازل هشت سوراخ با قطر ۰/۱۵۱ میلی‌متر است که زاویه مخروطی آن ۱۵۳ درجه است و سوخت را به پیستون با کاسه M شکل می‌پاشد.

برای اندازه‌گیری آلاینده‌های گازی در دود خروجی از یک سامانه اندازه‌گیری هوربیا مگزا ۷۱۰۰ دی ای جی آر^۱ استفاده می‌شود. همچنین این سامانه می‌تواند نسبت هوا به سوخت را با استفاده از میزان اندازه‌گیری شده از ۵ گاز موجود در دود (مشمول بر مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، اکسیژن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای ازت) محاسبه نماید. سطح دوده خروجی، با استفاده از یک دوده سنج ای وی ال ۴۱۵^۲ اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری برای هر نقطه کاری سه بار تکرار می‌شود و میانگین این اندازه‌ها گزارش می‌شود. موتور به تمامی حسگرهای معمول برای آزمون‌ها همچون حسگرهای دما و فشار ورودی و دود و روغن و آب مجهز است. این داده‌های شبه تعادلی از موتور به همراه دبی‌های هوا و سوخت و سطح آلاینده‌ها با تواتر ۲۰ هرتز در یک بازه زمانی ۴۰ ثانیه‌ای با استفاده از یک سامانه داده‌برداری مستقل ثبت می‌گردند. میانگین این داده‌ها به‌عنوان مقدار هر پارامتر برای نقطه کاری موردبررسی استفاده می‌شود.

درنهایت، از یک سامانه داده‌برداری بر مبنای زاویه لنگ برای ثبت و پردازش فشار سیلندر (که با یک حسگر فشار ای وی ال جی یو ۲۱ سی^۳ اندازه‌گیری می‌شود)، فشار ورودی، دما و فشار سوخت و جریان افشانه استفاده می‌شود. تمام این کانال‌ها در هر ۰/۱ زاویه لنگ و برای ۵۰ چرخه متوالی ثبت می‌شوند.

در این پژوهش، برای بررسی تأثیر زمان پاشش سوخت بر نوع احتراق در موتور با پاشش مستقیم، تزریق سوخت برای تمام نقاط آزمون، در یک مرحله انجام می‌شود. سوخت مورد استفاده، مخلوط هپتان نرمال و ایزواکتان است. در این ترکیب، نسبت حجمی سوخت‌ها برابر با ۷۰ و ۳۰ درصد به ترتیب برای ایزواکتان و هپتان نرمال است. به‌منظور بررسی اثر زمان‌بندی تزریق سوخت، برای حذف اثر سایر پارامترها بر رفتار احتراق، همه آنها در آزمون‌های مختلف یکسان نگاه داشته شدند و تنها زمان پاشش سوخت در آزمون‌ها تغییر یافت. این

³ AVL GU21C

¹ Horiba Mexa 7100 DEGR

² AVL 415 smoke meter

معایب موتورهای کم‌دما سوز، عدم وجود ابزار خارجی برای کنترل زمان‌بندی احتراق است. به‌منظور بیان کمی توانایی زمان‌بندی پاشش سوخت در کنترل زمان‌بندی احتراق می‌توان پارامتری به نام «حساسیت احتراق» را تعریف نمود. این پارامتر که عبارت است از آهنگ تغییر زمان نیم احتراق (درجه زاویه لنگی که در آن نیمی از جرم سوخت می‌سوزد) نسبت به تغییرات زمان پاشش سوخت، با رابطه (۱) تعیین می‌شود و در شکل ۳ نشان داده شده است.

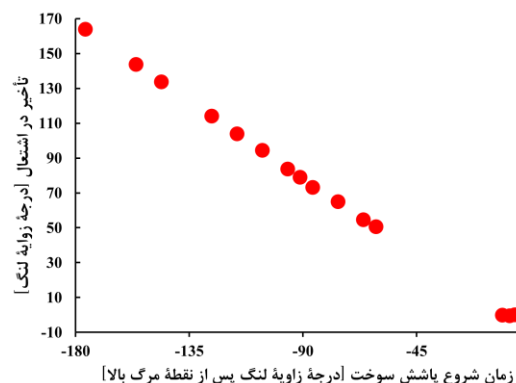
$$S = \left| \frac{\Delta CA50}{\Delta SOI} \right| \quad (1)$$

که در آن S حساسیت احتراق است و $CA50$ و SOI به ترتیب زمان نیم احتراق و زمان شروع پاشش سوخت برحسب درجه زاویه لنگ پس از نقطه مرگ بالا هستند.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در تزریق دیر هنگام سوخت و در حدود زمان‌بندی پاشش سوخت سنتی دیزلی، مقدار این پارامتر زیاد است. با تعجیل در تزریق سوخت و تغییر نوع احتراق به احتراق کم‌دما، مقدار حساسیت احتراق آفت می‌نماید. این آفت حساسیت احتراق به زمان‌بندی تزریق سوخت، منجر به چالش عدم کنترل‌پذیری موتور کم‌دما سوز می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با تعجیل بیشتر در زمان پاشش سوخت، مقدار حساسیت احتراق همچنان کاهش می‌یابد و در ناحیه مربوط به احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، مقدار این پارامتر نزدیک به صفر می‌شود. در این ناحیه، زمان‌بندی پاشش سوخت تأثیر چندانی بر لایه‌لایه شدن سوخت و در نتیجه همگنی مخلوط درون استوانه ندارد. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، یکی از مهم‌ترین دلایل توسعه فناوری احتراق تقریباً پیش آمیخته این است که با برهم‌زنی همگنی کامل مخلوط سوخت و هوا نسبت به احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، کنترل‌پذیری احتراق را بهبود بخشد. با توجه به شکل ۳، ملاحظه می‌شود که در ناحیه میانی نمودار که مربوط به احتراق تقریباً پیش آمیخته است، حساسیت احتراق نه به اندازه احتراق دیزلی زیاد است که بتوان از تزریق سوخت به‌عنوان عملگر کنترلی زمان‌بندی احتراق استفاده نمود و نه به اندازه احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن ناچیز است که تأثیر پدیده پاشش سوخت بر احتراق، قابل صرف‌نظر کردن باشد.

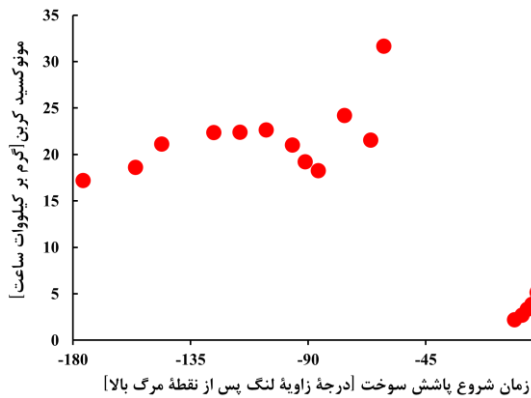
یکی از معایب موتورهای کم‌دما سوز، مقدار زیاد آلاینده‌های هیدروکربن‌های نسوخته و مونوکسید کربن منتشره از آنها است. آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته شامل ترکیبات آلی در حالت گازی می‌باشد؛ درحالی‌که هیدروکربن‌های جامد، بخشی از آلاینده ذرات ریز هستند؛ بنابراین، منشأ آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته می‌تواند

زمان پاشش سوخت بر سطح وابستگی پدیده‌های پاشش و احتراق، می‌توان از پارامتر تأخیر در اشتعال استفاده نمود. لیکن با توجه به اینکه تمرکز این پژوهش بر روی میزان جدایی این پدیده‌ها است، از تعریف دیگری برای این پارامتر استفاده می‌شود. تعریف مرسوم و سنتی پارامتر تأخیر در اشتعال، عبارت است از فاصله بین شروع پاشش و شروع احتراق که در پژوهش‌های مربوط به موتورهای دیزلی سنتی به کار می‌رود. در این مطالعه، «پارامتر تأخیر در اشتعال به‌صورت فاصله زمانی پایان پاشش سوخت و شروع احتراق تعریف می‌شود» تا مفهوم میزان ارتباط این پدیده‌ها بارزتر شود. مقدار این پارامتر در زمان‌های مختلف پاشش سوخت، در شکل ۲ ملاحظه می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با پیش‌انداختن زمان پاشش سوخت، ابتدا تأخیر در اشتعال تغییر چندانی نمی‌نماید. این بازه تقریباً بدون تغییر مربوط به احتراق سنتی دیزلی است که در آن ارتباط تنگاتنگی بین پدیده‌های پاشش و احتراق وجود دارد و هم‌زمان با پاشش، احتراق نواحی غنی از سوخت نیز در داخل استوانه پدیدار می‌شود. با تعجیل بیشتر در پاشش سوخت، تأخیر در اشتعال شروع به افزایش می‌نماید. بر خاستگی نمودار در این ناحیه و افزایش مقدار تأخیر در اشتعال، نشان‌دهنده جدا شدن پدیده‌های پاشش و احتراق است. جدایش این پدیده‌ها سبب می‌شود که سوخت تزریق‌شده به درون استوانه، پیش از شروع احتراق با هوا مخلوط شود و احتراق مخلوط سوخت و هوای پیش آمیخته رخ دهد؛ بنابراین، با پیش‌انداختن سوخت پاشی نسبت به زمان‌بندی احتراق دیزلی، احتراق کم‌دما حاصل می‌شود که دارای مزیت بهبود مشخصات آلایندگی نسبت به احتراق دیزلی است.



شکل ۲: تغییرات تأخیر در اشتعال بر اثر تغییر در زمان تزریق سوخت

در موتورهای دیزلی سنتی، به دلیل وابستگی زیاد زمان‌بندی احتراق و زمان‌بندی پاشش سوخت، برای کنترل زمان‌بندی احتراق از تنظیم زمان‌بندی تزریق سوخت استفاده می‌شود. یکی از چالش‌ترین

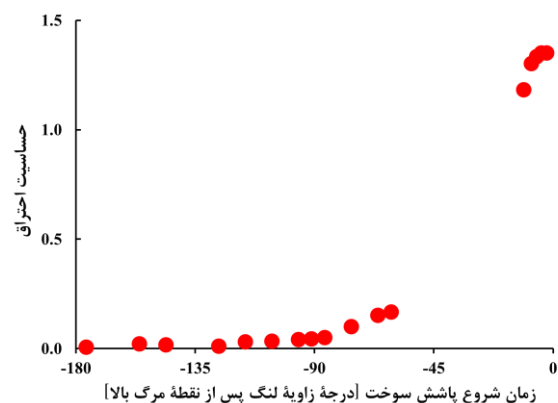


شکل ۵: تغییرات میزان انتشار مونوکسید کربن بر اثر تغییر در زمان تزریق سوخت

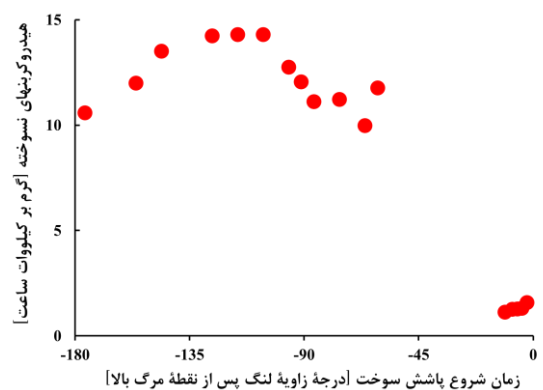
یکی از مهم‌ترین مزیت‌های فناوری احتراق کم‌دما نسبت به موتور دیزلی، قابلیت کاهش هم‌زمان آلاینده‌های اکسیدهای ازت و دوده است. تأثیر زمان‌بندی پاشش سوخت بر اکسیدهای ازت در شکل ۶ ارائه شده است. در ناحیه احتراق دیزلی، با توجه به بالا بودن دمای احتراق و نیز وجود نقاط داغ در محفظه که حاصل احتراق نواحی غنی از سوخت در شعله است، میزان اکسیدهای ازت تولیدی زیاد است. با تعجیل در پاشش سوخت و در ناحیه احتراق کم‌دما میزان تولید اکسیدهای ازت کاهش می‌یابد. البته در ابتدا شیب این کاهش بسیار کم است. کم بودن میزان تغییر تولید اکسیدهای ازت در ابتدای محدوده احتراق کم‌دما می‌تواند ناشی از وجود لایه‌های مخلوط هوا و سوخت تزریقی در این ناحیه که ابتدای محدوده احتراق تقریباً پیش آمیخته است، باشد که منجر به تولید اکسیدهای ازت به صورت موضعی می‌شود. با تعجیل بیشتر در زمان پاشش سوخت که منجر به اختلاط کامل‌تر سوخت و هوا می‌شود، مقدار این آلاینده کاهش چشمگیری خواهد داشت. در محدوده احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، افزون بر دمای کم احتراق، با توجه به سرعت بالای احتراق و نیز سطح همگنی مخلوط که با تغییر زمان تزریق سوخت ثابت می‌ماند، میزان انتشار اکسیدهای ازت خیلی کم و تقریباً بدون تغییر است.

شکل ۷ نشان دهنده تأثیر زمان‌بندی تزریق سوخت بر میزان آلاینده دوده منتشره حاصل از احتراق است. در محدوده احتراق دیزلی، نواحی غنی از سوخت در نزدیکی افشانه سوخت ایجاد می‌شوند که با یک شعله نفوذی مصرف می‌گردند. احتراق این نواحی غنی از سوخت منجر به انتشار دوده می‌شود. با پیش انداختن زمان تزریق سوخت در احتراق کم‌دما، به دلیل کاهش سطح لایه‌لایه شدن مخلوط، میزان انتشار این آلاینده کاهش می‌یابد. با تعجیل بیشتر در زمان پاشش

احتراق ناقص سوخت و یا فرار سوخت از احتراق به خاطر برخورد به سطوح محفظه احتراق یا ورود به درز و شکاف‌ها باشد. آلاینده مونوکسید کربن، حاصل احتراق ناقص است. در احتراق ناقص، بخشی از کربن به‌جای تولید دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن را ایجاد می‌نماید. تأثیر زمان‌بندی تزریق سوخت بر آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته در شکل ۴ و بر آلاینده مونوکسید کربن در شکل ۵ قابل مشاهده است. در ناحیه احتراق دیزلی مقادیر این آلاینده‌ها، به دلیل دمای بالا در هنگام پاشش سوخت و نیز در خلال احتراق و افزایش قابلیت اکسیداسیون آنها، ناچیز است. با تعجیل در پاشش سوخت و در ناحیه احتراق کم‌دما، سوخت به محیطی با فشار و دمای پایین تزریق می‌شود. این امر سبب می‌شود که احتمال برخورد سوخت به سطوح محفظه احتراق افزایش یابد. افزون بر آن، در این ناحیه دمای محفظه احتراق کم است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در ناحیه احتراق کم‌دما مقادیر این آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش آلاینده‌ها می‌تواند به پدیده خیس نمودن دیواره (برای هیدروکربن‌های نسوخته) و احتراق ناقص سوخت پاشیده شده به درون مخلوطی با فشار و دمای پایین مربوط باشد.



شکل ۳: تغییرات پارامتر حساسیت احتراق بر اثر تغییر در زمان تزریق سوخت



شکل ۴: تغییرات میزان انتشار هیدروکربن‌های نسوخته بر اثر تغییر در زمان تزریق سوخت

بین دو احتراق پیش‌گفته قرار دارد، سطح آلاینده‌گی دوده و اکسیدهای ازت نیز در بین دو سطح آلاینده‌گی و نزدیک به سطح آلاینده‌گی احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن قرار دارد.



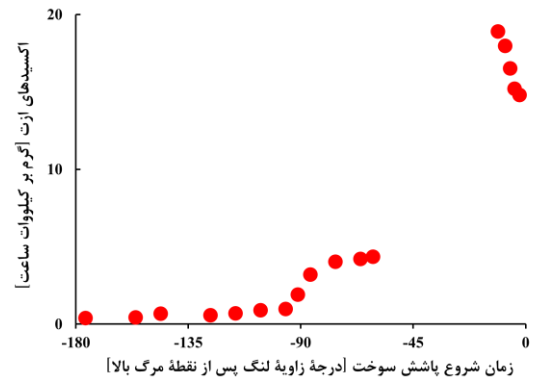
شکل ۸: سطح انتشار آلاینده‌های دوده و اکسیدهای ازت در فناوری‌های سه‌گانه احتراقی

۴- نتیجه‌گیری

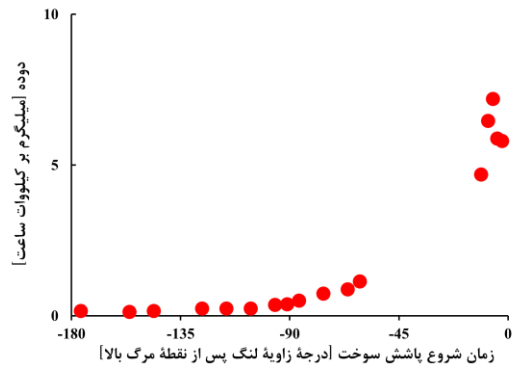
در این پژوهش، تأثیر زمان تزریق سوخت بر تغییر نوع احتراق در موتورهای درون‌سوزی که از پاشش مستقیم سوخت به درون محفظه احتراق بهره می‌برند، مورد بررسی قرار گرفت. دو فناوری احتراقی کلی که مورد مطالعه قرار گرفتند عبارتند از فناوری‌های احتراق دیزلی و احتراق کم‌دما. وجه تمایز این دو نوع فناوری احتراقی، سطح وابستگی زمانی پدیده‌های پاشش سوخت و احتراق است. در احتراق دیزلی، وابستگی زیادی بین این پدیده‌ها وجود دارد؛ در حالی که در احتراق کم‌دما، این دو پدیده نسبت به هم دارای فاصله زمانی قابل ملاحظه‌ای هستند. دو نوع از احتراق کم‌دما که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از احتراق تقریباً پیش‌آمیخته و احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن. تفاوت این دو نوع احتراق کم‌دما، در سطح همگنی مخلوط سوخت و هوا پیش از شروع احتراق است. در احتراق تقریباً پیش‌آمیخته، با وجود اختلاط مناسب سوخت و هوا پیش از شروع احتراق، لایه‌بندی موضعی جزئی در محفظه احتراق وجود دارد در حالی که در احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، از این عامل می‌توان صرف‌نظر نمود و مخلوط سوخت و هوای موجود در محفظه احتراق را کاملاً همگن در نظر گرفت. به‌طور خلاصه، نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به این شرح خلاصه نمود:

۱. پاشش سوخت در نزدیکی نقطه مرگ بالا و وابستگی زمانی پدیده‌های تزریق و احتراق، منجر به احتراق دیزلی می‌گردد. با پیش‌اندازی پاشش سوخت به زمان‌های ابتدایی مرحله تراکم و فراهم آوردن فرصت کافی برای اختلاط همگن سوخت و هوا،

سوخت و افزایش تأخیر در اشتعال، سطح همگنی مخلوط سوخت و هوا افزایش می‌یابد و میزان تولید آلاینده دوده مقدار ناچیزی خواهد شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در محدوده احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، با توجه به یکسان ماندن سطح همگنی مخلوط با تغییر زمان پاشش سوخت، میزان انتشار دوده نیز تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۶: تغییرات میزان انتشار اکسیدهای ازت بر اثر تغییر در زمان تزریق سوخت



شکل ۷: تغییرات میزان انتشار دوده بر اثر تغییر در زمان تزریق سوخت

مقایسه میزان انتشار آلاینده‌های دوده و اکسیدهای ازت در سه فناوری احتراقی دیزلی، تقریباً پیش‌آمیخته و اشتعال تراکمی مخلوط همگن در شکل ۸ ارائه شده است. مزیت‌های آلاینده‌گی احتراق کم‌دما نسبت به احتراق دیزلی و همچنین برتری احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن نسبت به احتراق تقریباً پیش‌آمیخته در این نمودار قابل درک است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در احتراق دیزلی، دوده و اکسیدهای ازت زیادی تشکیل می‌شود. در احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، مقدار انتشار این آلاینده‌ها بسیار ناچیز است. با این وجود، در فناوری احتراق میانی تقریباً پیش‌آمیخته که در مرز

اکسیدهای ازت بین سطوح آلاینده‌گی دو نوع احتراق قرار می‌گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

شایسته است که مراتب قدردانی از گروه تکنولوژی احتراق دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی آیندهوون هلند به جهت در اختیار قرار دادن بستر آزمون برای اجرای آزمون‌ها اعلام گردد.

۶- منابع

- [1] Fathi M, Jahanian O, Ganji DD, Wang S, Somers B. (2017). Stand-alone single- and multi-zone modeling of direct injection homogeneous charge compression ignition (DI-HCCI) combustion engines. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1181-90.
- [2] Gupta SK, Krishnasamy A. (2024). A relative comparison of HCCI, PCCI, and RCCI combustion strategies: an alternative fuels perspective. *International Journal of Engine Research*, 25(6), 1078-1092.
- [3] Fakhari AH, Gharehghani A, Salahi MM, Mahmoudzadeh Andwari A. (2024). RCCI combustion of ammonia in dual fuel engine with early injection of diesel fuel. *Fuel*, 365, 131182.
- [4] Krishnan MG, Rajkumar S, Devarajan Y, Rajiv A. (2024). A comprehensive review on advancement and challenges of renewable biofuelled reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine. *Journal of the Energy Institute*, 113, 101540.
- [5] Zhu J, Wang Z, Li R, Liu S, Li M. (2024). Experimental and simulation study of methanol/coal-to-liquid (CTL) reactivity and combustion characteristics of diesel engines in RCCI mode. *Fuel*, 357, 129799.
- [6] Imtenan S, Varman M, Masjuki H, Kalam M, Sajjad H, Arbab M, et al. (2014). Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review. *Energy Conversion and Management*, 80, 329-56.
- [7] Fathi M, Jahanian O, Shahbakhti M. (2017). Modeling and controller design architecture for

احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن به دست می‌آید. پاشش سوخت در بین این دو محدوده که مخلوط نه کاملاً همگن و نه کاملاً لایه‌لایه است، منجر به احتراق تقریباً پیش آمیخته می‌شود. ۲. در احتراق دیزلی، ارتباط تنگاتنگی بین پدیده‌های پاشش و احتراق وجود دارد و هم‌زمان با پاشش، احتراق نواحی غنی از سوخت نیز در داخل استوانه پدیدار می‌شود؛ بنابراین، تأخیر در اشتعال نسبتاً کم است و زمان تزریق سوخت تأثیر چندانی بر آن ندارد. در احتراق کم‌دما، تعجیل در پاشش سوخت باعث افزایش تأخیر در اشتعال، افزایش زمان در دسترس برای اختلاط سوخت و هوا و جدا شدن پدیده‌های پاشش و احتراق می‌شود. ۳. در احتراق دیزلی، زیاد بودن مقدار پارامتر حساسیت احتراق، نشانگر زیاد بودن میزان حساسیت زمان‌بندی احتراق به زمان تزریق سوخت است. در احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، مقدار این پارامتر، ناچیز و نزدیک به صفر است. در احتراق میانی تقریباً پیش آمیخته، مقدار این پارامتر بین این دو حد است و با تعجیل در تزریق سوخت این مقدار اُفت می‌نماید. در این نوع احتراق، حساسیت احتراق نه به اندازه احتراق دیزلی زیاد است که بتوان از تزریق سوخت به‌عنوان عملگر کنترلی زمان‌بندی احتراق استفاده نمود و نه به اندازه احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن کم است که تأثیر پدیده پاشش سوخت بر احتراق ناچیز باشد. این اُفت حساسیت احتراق به زمان‌بندی تزریق سوخت، منجر به چالش عدم کنترل‌پذیری موتور کم‌دما سوز می‌شود؛ بنابراین، فناوری احتراق تقریباً پیش آمیخته با برهم‌زنی همگنی کامل مخلوط سوخت و هوا نسبت به احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، کنترل‌پذیری احتراق را می‌تواند تا حدی بهبود بخشد. ۴. در احتراق دیزلی، مقادیر آلاینده‌های هیدروکربن‌های نسوخته و مونوکسید کربن ناچیز است. با تعجیل در پاشش سوخت و در محدوده احتراق کم‌دما، مقادیر این آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. ۵. در احتراق دیزلی، دوده و اکسیدهای ازت زیادی تشکیل می‌شود و در احتراق کم‌دما، مقدار این آلاینده‌ها به‌صورت هم‌زمان کاهش می‌یابد. در احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن، مقدار انتشار این آلاینده‌ها بسیار ناچیز است و در فناوری احتراق میانی تقریباً پیش آمیخته که در مرز بین احتراق دیزلی و احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن قرار دارد، سطح آلاینده‌گی دوده و

- [16] Shen M, Lonn S, Johansson B. (2015). Transition from HCCI to PPC Combustion by Means of Start of Injection. SAE Technical Paper, 2015-01-1790.
- [17] Hematian R, Massah, J, Hassan-beygi, SR, Hajjalimohammadi A. (2022). Numerical and experimental investigation of common rail fuel injection system and evaluating influence of fuel pressure on injection characteristics and pressure fluctuations. The Journal of Engine Research, 59(59), 63-72. [In Persian]
- [18] Singh M, Kumar P, Sandhu SS. (2024). An investigation of optimum control of injection timing/injection pressure for a multicylinder common rail direct injection engine fueled with AB20 blend. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 238(1), 415-426.
- [19] Mei Q, Naruemon I, Liu L, Wu Y, Ma X. (2023). Numerical Investigation on the Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine with Flexible Fuel Injection. Machines, 11(1), 120.
- [20] Selvaraj K. (2024). A comprehensive review: role of fuel injection methodologies on performance enhancement and mitigation of emissions in the diesel engine. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 36(2), 219-43.
- [21] Rajendran S, Dhairiyasamy R, Jaganathan S, Murugesan S, Muthusamy R, Periannan S, Muniyappan G, Jaganathan B, Srinivasan K, Elangandhi H, Annamalai E. (2023). Effect of injection timing on combustion, emission and performance characteristics of safflower methyl ester in CI engine. Results in Engineering, 20, 101599.
- [22] Gharehghani A, Fakhari AH, Aghahasani M. (2023). Investigating the influence of injection timing on the performance of a RCCI engine. The Journal of Engine Research, 70(1), 91-105. [In Persian]
- [23] Nazemian M, Neshat E, Khoshbakhti Saray R, Poorghasemi K. (2019). Investigation on the effect of injection timing on Exergy Terms in an cycle-by-cycle combustion control of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines – A comprehensive review. Energy Conversion and Management, 139, 1-19.
- [8] Fathi M, Khoshbakhti Saray R, Pourfallah M, Kheyrollahi J, Javadirad G. (2011). EGR and Intake Charge Temperature Effects on Dual-Fuel HCCI Combustion and Emissions Characteristics. SAE Technical Paper, 2011-24-0050.
- [9] Korkmaz S, Yaman H, Yeşilyurt MK. (2024). Developments in the RCCI engines powered by several alternative fuel types: An overview. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 1-18.
- [10] Izadi Najafabadi M, Dam N, Somers B, Johansson B. (2016). Ignition Sensitivity Study of Partially Premixed Combustion by Using Shadowgraphy and OH* Chemiluminescence Methods. SAE Technical Paper, 2016-01-0761.
- [11] Thring R. (1989). Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. SAE Technical Paper, 892068.
- [12] Fathi M, Jahanian O, Domiri Ganji D. (2017). Experimental determination of direct injection homogeneous charge compression ignition (DI-HCCI) combustion regime. Fuel and Combustion, 10 (2), 28-39. [In Persian]
- [13] Wang Y, Zhu Z, Yao M, Li T, Zhang W, Zheng Z. (2016). An investigation into the RCCI engine operation under low load and its achievable operational range at different engine speeds. Energy Conversion and Management, 124, 399–413.
- [14] Kaiadi M, Johansson B, Lundgren M, Gaynor J. (2013). Experimental Investigation on different Injection Strategies for Ethanol Partially Premixed Combustion. SAE Technical Paper, 2013-01-0281.
- [15] Bakker P, De Abreu Goes J, Somers L, Johansson B. (2014). Characterization of Low Load PPC Operation using RON70 Fuels. SAE Technical Paper, 2014-01-1304.

- [28] Virt M, Zöldy M. (2024). Realization of Low Temperature Combustion in an Unmodified Diesel Engine. *Cognitive Sustainability*, 3(2), 18-25.
- [29] Elbanna AM, Xiaobei C, Can Y, Elkelawy M, Bastawissi HA. (2023). A comparative study for the effect of different premixed charge ratios with conventional diesel engines on the performance, emissions, and vibrations of the engine block. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(49), 106774-89.
- [30] Hoang AT. (2020). Critical review on the characteristics of performance, combustion and emissions of PCCI engine controlled by early injection strategy based on narrow-angle direct injection (NADI). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 13791-805.
- [31] Khandal SV, Banapurmath NR, Gaitonde VN, Hiremath SS. (2017). Paradigm shift from mechanical direct injection diesel engines to advanced injection strategies of diesel homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines-A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 369-84.
- RCCI engine. *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, 49(3), 337-43. [In Persian]
- [24] Pourmousavi Kani SI, Khadem J, Nikzadfar K, Carlucci AP. (2022). Experimental investigation of the effects of the high cetane number fuel injection on the performance of a direct injection low-temperature combustion engine. *Fuel and Combustion*, 15(3), 20-49. [In Persian]
- [25] Kakoee A, Mikulski M, Vasudev A, Axelsson M, Hyvönen J, Salahi MM, Mahmoudzadeh Andwari A. (2024). Start of Injection Influence on In-Cylinder Fuel Distribution, Engine Performance and Emission Characteristic in a RCCI Marine Engine. *Energies*, 17(10), 2370.
- [26] Bobi S, Kashif M, Laonual Y. (2022). Combustion and emission control strategies for partially-premixed charge compression ignition engines: A review. *Fuel*, 310, 122272.
- [27] Coskun G, Demir U, Soyhan HS, Turkcan A, Ozsezen AN, Canakci M. (2018). An experimental and modeling study to investigate effects of different injection parameters on a direct injection HCCI combustion fueled with ethanol-gasoline fuel blends. *Fuel*, 215, 879-91.



Design and Construction of a Two-Axis Angle Control Testbed with a Hardware-in-the-Loop Approach

Vahid Bohlouri*¹, Mohammadamin Bagheri², Esmael Ghafari³

1. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.
2. B.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

Precise calibration of attitude determination sensors prior to deployment necessitates advanced platforms with two or three degrees of freedom that ensure high accuracy and real-time monitoring capabilities. In response to this requirement, a two-degree-of-freedom testbed has been designed and implemented to enable thorough functional evaluation of sensors and systems before their deployment phase and to offer real-time tracking of platform dynamics and sensor responses. The system is composed of two primary subsystems: a mechanical framework and an electronics subsystem. The mechanical framework is engineered with high precision to mitigate misalignments and ensure accurate component placement, including a reaction wheel that enhances control system efficiency. The electronics subsystem incorporates key elements such as batteries, actuators, communication interfaces, and control boards, enabling seamless and efficient operation. A PID controller has been employed to achieve precise and stable control of the platform. Experimental evaluations demonstrate that the system achieves angular accuracy of 0.11° in the pitch axis and 0.20° in the yaw axis. These findings underscore the platform's efficacy as a reliable tool for pre-deployment calibration and performance testing of attitude determination sensors and establish its foundation as a versatile hardware-in-the-loop platform for detailed sensor performance evaluations.

Keywords

Position Control
Two-axis Mechanism
PID Controller
Control Testbed
Hardware in the Loop

Received: 10.11.2024

Revised: 11.05.2024

Accepted: 11.16.2024

*Corresponding Author

Vahid Bohlouri

Email

V.Bohlouri@nus.ac.ir

1- Introduction

Evaluating the functionality of subsystems and individual components plays a crucial role in space system development, particularly for attitude control mechanisms. Rigorous testing processes, such as hardware-in-the-loop (HIL) techniques, are essential for ensuring optimal performance [1]. Utilizing versatile platforms with multiple degrees of freedom—such as two- and three-axis configurations—has proven effective for these evaluations [2]. These platforms often incorporate dynamic elements and sensory equipment, including gyroscopes, accelerometers, and actuators, enabling precise simulation of operational conditions [3]. This research presents an

innovative two-degree-of-freedom testbed designed specifically for evaluating and calibrating sensors and related systems. Its modular and economical structure facilitates the seamless integration of different components, delivering both precision and cost efficiency. Such systems have demonstrated utility in advancing the capabilities of attitude control setups. Notably, control algorithms tailored to mechanical setups with two degrees of freedom, like the lightweight dual-axis gimbal systems designed for precise angular movements, underline the importance of such developments in spacecraft engineering [4]. By focusing on accessibility and affordability, this newly developed platform makes



strides in creating adaptable solutions for space-related testing scenarios. Its flexibility design offer opportunities to explore control techniques and refine critical technologies, making it a valuable asset in the ongoing progress of space system innovation.

2- Design and Methodology

The experimental setup is constructed around a dual-axis mechanism, where a rotating base supports an elongated arm equipped with reaction wheels at its extremities. The arm's rotation relative to the base defines the inclination angle (θ), while a secondary rotational axis (ψ) is facilitated through a turntable that underpins the entire assembly. The frame, crafted using 3D printing technology, leverages PLA polymer for its lightweight nature, production flexibility, and suitability for intricate designs. These characteristics ensure precise alignment during assembly, reducing the risk of component misalignment and enhancing operational stability.

To control the system's orientation, reaction wheels generate rotational forces. Achieving substantial angular momentum without excessive weight was realized by integrating 3D-printed components with. The orthogonal arrangement of these wheels minimizes cross-axis torque disturbances, ensuring efficient control. Additionally, movable counterweights are strategically positioned to balance the structure and maintain equilibrium in diverse configurations. Even when motors are inactive, the system incorporates stabilizing joints that uphold structural integrity.

This modular and lightweight setup provides a versatile platform for testing advanced control algorithms, making it ideal for dynamic experiments in orientation regulation. As demonstrated in Fig. 1, the design effectively addresses challenges associated with multi-axis dynamics.

The developed system incorporates diverse control algorithms, which can be implemented on the processing hardware. It facilitates seamless online

communication with a computer, supporting real-time monitoring and enabling adjustments to the controller parameters. This feature allows for the implementation, testing, and observation of various control strategies. The structure of the control system is depicted in fig. 2.



Figure 1: Overview Of The Constructed Two-Degree-Of-Freedom device.

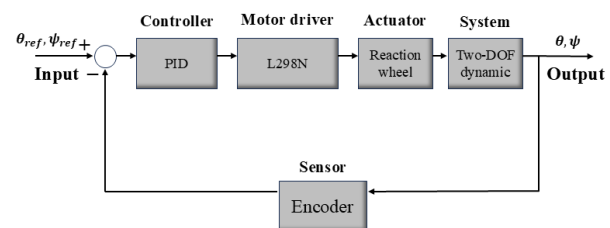


Figure 2: Block diagram of the two-axis angle control of the constructed device.

3- Discussion and Results

The accuracy of the attitude control system was evaluated in both pitch and yaw axes, with the reliability of the system's accuracy tested through 100 repeated trials for each axis, showing steady-state errors below 0.11 degree and 0.20 degree, respectively.

The dual-axis performance was further analyzed by optimizing controller gains, as summarized in Table I, and the step responses for the first axis (θ) and the second axis (ψ) are illustrated in Fig. 3 and 4.

Table 1: pid control coefficients for pitch and yaw at three input angles

Axis	Angle °	K_p	K_i	K_d
θ	15	1.8	0.0007	0.05
	30	0.95	0.0007	0.7
	45	0.5	0.00055	0.2
ψ	15	3.5	0.001	1
	30	1.4	0.0005	0.15
	45	1	0.0004	1.5

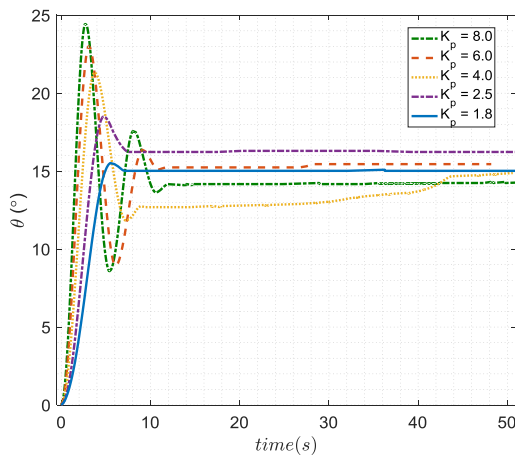


Figure 3: step response of the first axis for different proportional gain coefficients

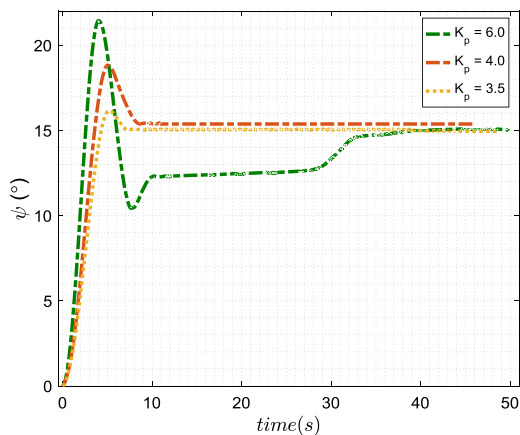


Figure 4: Step response of the second axis for different proportional gain coefficients

In Fig. 5, the system responses for the first axis are presented for various integral control gains. This figure highlights how changes in the integral gain affect the system's behavior, enabling the

identification of the optimal response for a specific gain value.

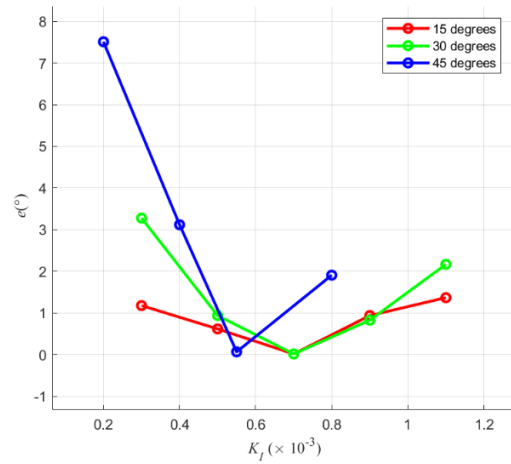


Figure 5: steady-state error of the first axis versus varying integral gains

In Fig. 6, the steady-state error of the second axis is plotted against varying integral gains, illustrating the system's behavior and identifying the optimal integral gain for the best response.

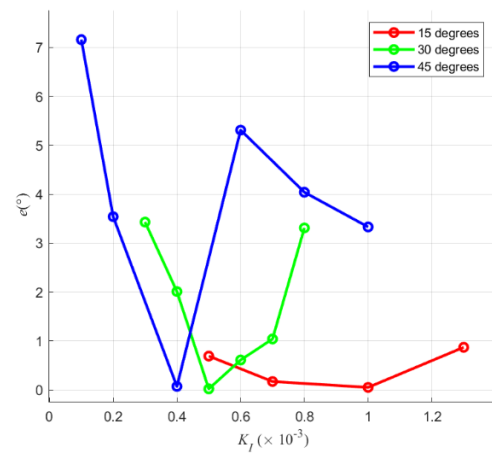


Figure 6: Steady-state error of the second axis versus varying integral gains

4- Conclusion

This study introduced a two-degree-of-freedom testbed designed for precise calibration and functional evaluation of attitude determination sensors prior to deployment. The platform, equipped with a high-precision mechanical framework and an electronics subsystem, ensures real-time tracking of dynamics and sensor responses. The mechanical framework minimizes

misalignments, and the electronics subsystem integrates actuators, control boards, and communication interfaces for seamless operation. The system's performance was assessed under varying proportional and integral gain coefficients to determine the optimal response for precise and stable control. Experimental results demonstrated angular accuracies of 0.11° in the pitch axis and 0.20° in the yaw axis, validating the platform's reliability as an effective tool for pre-deployment calibration and performance testing of attitude determination sensors.

5- References

- [1] W. Ley, K. Wittmann, and W. Hallmann, "Handbook of Space Technology", vol. 22, John Wiley & Sons, 2009.
- [2] J. Uscategui, X. Wang, G. Cuba, and M. Guarirapa, "High-Precision Magnetic Testbed Design and Simulation for LEO Small-Satellite Control Test," *Aerospace*, vol. 10, no. 7, p. 640, 2023.
- [3] V. Bohlouri, H. Haghghi, S. Kaviri, E. Maani, and S. Seyedzamani, "Design and Implementation of Hardware-in-the-loop (HIL) Test-bed for Spacecraft Attitude Control," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 12, no. 1, 2019. (in Persian)
- [4] V. Bohlouri, H. Hosseini-Onari, M. N. Meibody, and S. Seyedzamani, "An Online Hardware-in-the-Loop Testbed for Spacecraft Attitude Control," in *2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1002-1006, IEEE, 2019.



طراحی و ساخت بستر آزمون دومحوره کنترل زاویه با رویکرد سخت‌افزار در حلقه

وحید بهلولوری^{۱*}، محمدمبین باقری^۲، اسماعیل غفاری^۳

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

۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

کلمات کلیدی

کنترل زاویه

مکانیسم دومحوره

تناسبی - انتگرالی - مشتقی

بستر آزمون

سخت‌افزار در حلقه

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

*نویسنده مسئول

وحید بهلولوری

ایمیل

v.bohlouri@nus.ac.ir

این مقاله به بررسی طراحی و ساخت دستگاه مکانیکی کنترل زاویه دومحوره مبتنی بر سخت‌افزار در حلقه به‌منظور ساخت بستر آزمون دومحوره پرداخته است. هدف از این دستگاه رسیدن به بستر آزمون کنترل دومحوره زاویه با خطای کوچک به‌منظور ارزیابی و تست حسگرهای وضعیت یا به‌عنوان میز دو درجه آزادی کوچک برای کنترل وضعیت اجزای ماهواره بوده است. دستگاه از دو بخش اصلی سازه مکانیکی و بخش الکترونیکی تشکیل شده و الگوریتم کنترلی در بستر سخت‌افزار در حلقه نوشته شده و قابلیت تعریف انواع کنترل‌کننده‌ها بر روی آن وجود دارد. سازه از میله قابل دوران، کوپلینگ، باتاقان‌ها، بدنه، پایه و بخش الکترونیکی از یک برد پردازشگر، حسگر انکودر، باتری، مازول مخبراتی و یک موتور کورلس با دیسک دوار به‌عنوان چرخ عکس‌العملی، تشکیل شده است. این دستگاه به‌صورت دو درجه آزادی توانایی مانورهای وضعیت پیچ (pitch) و یاو (yaw) را داشته و خطای وضعیت آن متناسب با الگوریتم کنترلی است. قابلیت اطمینان دقت این دستگاه به ازای صد مرتبه تکرار آزمون برای مانورهای مذکور به ترتیب مقدار ۰/۱۱ و ۰/۲ درجه، با کنترل‌کننده PID، صحت‌گذاری شده است. تحلیل عملکرد دستگاه به ازای بررسی زوایای ورودی مختلف، ضرایب متنوع کنترل‌کننده، شرایط اولیه متفاوت، مانورهای تک‌محوره و دومحوره به تفصیل بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده عملکرد مناسب دستگاه ساخته شده با خطای میانگین کمتر از ۰/۲۳ درجه می‌باشد.

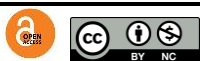
۱- مقدمه

[۳]. به‌طور نمونه شبیه‌ساز حرکت وضعی ماهواره بدون اصطکاک [۵،۴]، ایجاد میدان مغناطیسی معادل نقطه مداری [۶] طراحی یک سیستم مکترونیکی به‌منظور پایش داده‌های سلامت و وضعیت ماهواره در پیاده‌سازی بسترهای آزمون سخت‌افزار در حلقه در منابع بررسی شده است [۷]. همچنین در مرجع [۸] یک بستر سخت‌افزار در حلقه با میز سه درجه آزادی برای بررسی عملکرد ماهواره‌های کلاس نانو ارائه شده است. علاوه بر این در برخی از بسترهای سخت‌افزاری از عملگر تراستر یا شبیه آن استفاده شده [۹،۱۰] و در برخی دیگر از بسترها از چرخ عکس‌العملی یا عملگر مغناطیسی^۲ برای کنترل مانورهای وضعیت استفاده می‌شود [۱۱]. در مجموع بررسی و دسته‌بندی بسترهای آزمون ماهواره‌ها در مرجع [۱۲] با بررسی ادوات،

یکی از فرآیندهای عمومی در سامانه‌های فضایی تست و آزمون زیرسیستم‌ها، اجزاء، تجهیزات و بخش‌های مختلف آن است. در این بین زیرسیستم تعیین و کنترل وضعیت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرسیستم کنترل وضعیت یک سامانه فضایی و بخش‌های آن، آزمون‌های مختلفی از جمله آزمون سخت‌افزار در حلقه^۱ اجزای کنترلی را دارد [۱]. در این بین تجهیزات مختلفی به‌عنوان بستر آزمون زیرسیستم کنترل وضعیت توسعه یافته که میزهای دو و سه درجه آزادی از جمله این تجهیزات اساسی برای انجام آزمون‌های کنترل و تعیین وضعیت هستند [۲]. برخی از این سخت‌افزارها به‌صورت مدل روی میز بوده و برخی دیگر شامل مکانیسم‌های دو و سه درجه آزادی بوده و دسته دیگر تجهیزات کنترلی نظیر حسگرها و عملگرها را نیز شامل می‌شوند

² Magnotorquer

¹ Hardware in the Loop (HIL)



مکانیکی در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این بازو با دوران حول تکیه‌گاه می‌تواند زاویه پیچش (θ) را تولید کند. کل سازه بر روی یک یاتاق کف‌گرد سوار شده که می‌تواند دوران محور دیگر (ψ) را ایجاد کند. بدنه سفید رنگ دستگاه از مواد پی‌ال‌ای^۲ و در فرآیند تولید با استفاده از چاپگر سه‌بعدی آماده‌شده تا دقت بالایی در جاگذاری و مونتاژ قطعات حاصل شود. انتخاب مواد پی‌ال‌ای به دلیل ویژگی‌های خاصی چون وزن کم، استحکام کافی برای این نوع کاربردها و امکان تولید قطعات با هندسه پیچیده و دقیق انجام گرفته است. این ویژگی‌ها باعث شده تا قطعات با دقت بسیار بالا در جای خود نصب‌شده و از جابجایی ناخواسته آن‌ها جلوگیری شود.

در این سازه، دیسک‌های چرخ‌های عکس‌العملی نقش کلیدی در تولید گشتاور لازم و یکنواخت برای کنترل وضعیت ایفا می‌کنند. این دیسک‌ها با دقت بالایی طراحی شده‌اند تا از استحکام و یکنواختی مناسبی داشته باشند. یکی از چالش‌های طراحی، دستیابی به اینرسی بالای دیسک‌ها بدون افزایش بیش‌ازحد وزن آن‌ها بود که با استفاده از پرینتر سه‌بعدی انجام شد. به‌علاوه، دیسک‌ها به‌صورت عمود بر هم نصب‌شده‌اند تا بتوانند گشتاورهای القایی حول محورهای دیگر را به‌طور مؤثری کنترل کنند. چینش عمودی عملگرها باعث کاهش تداخل گشتاورها شده و می‌تواند دقت کنترلی را افزایش دهد.

وزنه‌های متمرکز مشخص‌شده در تصویر شماره ۱ نیز در بخش مکانیکی به‌گونه‌ای استفاده‌شده‌اند که تعادل جرمی سیستم حفظ شود. این وزن‌ها قابل تنظیم هستند و بر روی محورهای مختلف جاگذاری شده‌اند تا تعادل استاتیکی سیستم در زوایای مختلف حفظ شود. استفاده از کوپلینگ‌های ۸*۸ میلی‌متری در این بخش به‌منظور ایجاد توزان جرمی سیستم صورت گرفته است. این طراحی این امکان را فراهم می‌کند تا پس از متوقف شدن موتور هم محورهای سیستم به دلیل تعادل جرمی به‌صورت استاتیکی در جای خود ثابت بمانند و به پایداری سیستم در حین عملکرد کمک کنند.

همچنین در شکل ۲ سایر اجزا، شامل موتور کورلس^۳، کوپلینگ، برد الکترونیکی راه‌انداز موتور، برد پردازشی الکترونیکی، انکودر نوری، ماژول مخابراتی و باتری لیتیومی به ترتیب از سمت چپ شکل تا سمت راست نمایش داده‌شده است.

قابل‌ذکر است که محور اول (پیچ)، محدودیت زاویه‌ای $\pm 56/4^\circ$ درجه داشته و محور دوم (بازو) بدون محدودیت است.

عملگرها و تجهیزات آن‌ها انجام‌شده است. یکی از چالش‌های اصلی در تجهیزات حساس فضایی مانند دوربین‌ها، رادارها، لیزرها و برخی آنتن‌ها، حفظ جهت‌گیری دقیق آن‌ها نسبت به یک هدف ثابت یا متحرک است که در یک فضاییم حائز اهمیت است [۱۳]. در ماهواره‌ها چرخ‌های عکس‌العملی با تولید گشتاور کنترلی دقیق، امکان کنترل وضعیت و جهت‌گیری این تجهیزات را فراهم می‌کنند. این چرخ‌ها به‌طور گسترده‌ای در ماهواره‌های مختلف استفاده‌شده‌اند و ثابت کرده‌اند که در مأموریت‌هایی که به‌دقت بالای کنترل وضعیت نیاز دارند، عملکرد مناسبی ارائه می‌دهند [۱۴].

مسئله دیگر الگوریتم کنترل وضعیت در سیستم‌های مکانیکی و رباتیکی، به‌ویژه در سیستم‌های فضایی و دو درجه آزادی است. در این راستا، به‌طور نمونه آرانتز و همکارانش در مطالعه‌ای، به بهینه‌سازی کنترل وضعیت ماهواره‌های پلتفرم چند مأموریتی با استفاده از الگوریتم روشن-خاموش پرداخته‌اند [۱۵]. همچنین، پینس و همکارانش نیز یک سیستم گیمبال^۱ دومحوره سبک و با کارایی بالا طراحی کردند که توانست کنترل زاویه‌ای دقیق را برای کاربردهای فضایی فراهم نماید [۱۶]. این مطالعات در جهت دستیابی به دقت بالا در سیستم‌های دو درجه آزادی انجام‌شده است. الگوریتم‌های کنترلی در بسترهای سخت‌افزار در حلقه متناسب با نوع دینامیک و مکانیزم-های موجود متفاوت است به‌طور نمونه یکی از تحقیقات در این زمینه مربوط به سیستم هلیکوپترهای کوانسر است که در این نوع از مکانیزم-ها، از پره‌ها برای تولید نیروی محرکه و کنترل وضعیت استفاده‌شده و مزایایی داشته است [۱۷].

برخی بسترهای آزمون به‌منظور مانورهای وضعیت ماهواره تهیه می‌شوند که به‌طور نمونه بیان شدند اما برخی دیگر به‌منظور ارزیابی یک حسگر یا یک عملگر کارآیی دارند [۱۸]. در این مطالعه یک بستر آزمون سخت‌افزار در حلقه دو درجه آزادی به‌منظور آزمون حسگرها و اجزا طراحی و ساخته‌شده به‌طوری‌که کنترل‌کننده‌های مختلفی بر روی آن قابل‌تعریف است.

۲- ساخت بخش سازه و مکانیک دستگاه

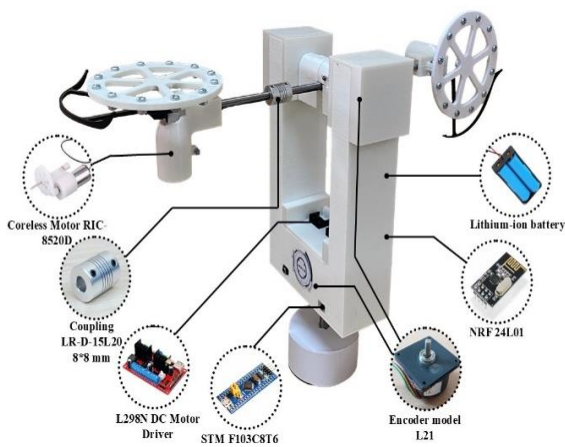
ساختار مکانیکی بستر آزمون دو درجه آزادی شامل یک بازوی گسترده بوده که در دو سر آن دو چرخ عکس‌العملی قرار گرفته و مرکز آن بر روی یک تکیه‌گاه قابل دوران قرار گرفته است. همان‌طور که این ساختار

³ Coreless

¹ Gimbal

² PLA

دقیقی از موقعیت زاویه‌ای هر محور در اختیار میکروکنترلر قرار می‌دهند.



شکل ۱: نمایی از سیستم مکانیکی دو درجه آزادی ساخته‌شده

شکل ۲: نمایی از اجزای دستگاه دو درجه آزادی ساخته‌شده

برای فعال‌سازی عملگرها، از یک راه‌انداز موتوری ۴ کاناله با مشخصه L298N استفاده‌شده که می‌تواند تا ۲ آمپر جریان به هر کانال اعمال کند. این انتخاب به دلیل توانایی مدیریت جریان‌های بالا و دو کانال رزرو برای افزودگی است.

برای تولید گشتاور از چرخ عکس‌العملی ساخته‌شده استفاده‌شده است. این عملگر با استفاده از یک موتور کورلس و یک دیسک دوار و همچنین با کنترل شتاب ساخته‌شده است. موتور کورلس یک موتور جریان مستقیم با دور بالا بوده که با راه‌انداز کنترل سرعت و شتاب آن انجام می‌شود. عملگر واکنشی مذکور بر اساس رابطه ریاضی زیر گشتاور تولید می‌نماید.

$$M = I\alpha(N.m) \quad (1)$$

$$H = I\omega (r.m.v) \quad (2)$$

که در آن M گشتاور تولیدی، I میزان ممان اینرسی دیسک دوار و α میزان شتاب زاویه‌ای دیسک دوار، H ممان زاویه‌ای و ω سرعت زاویه‌ای دیسک دوار است. همچنان که از رابطه فوق مشخص است چنانچه یک دیسک دوار با ممان اینرسی مشخص، تغییرات سرعت (شتاب) داشته باشد می‌تواند گشتاور تولید شود. در اینجا این عملگر با ایجاد گشتاور می‌تواند حول محور مربوطه دوران نماید. فعال‌سازی عملگر ساخته‌شده با راه‌انداز انجام می‌شود. از این عملگر (البته با مشخصه فضایی) در کنترل وضعیت ماهواره بسیار زیاد استفاده می‌شود [۱۹]. نمایی از چرخ عکس‌العملی^۱ ساخته‌شده در شکل ۳ ارائه‌شده است که در آن یک موتور کورلس و یک دیسک‌گردان مشاهده می‌شود.

جدول ۱: تجهیزات و مشخصات دستگاه

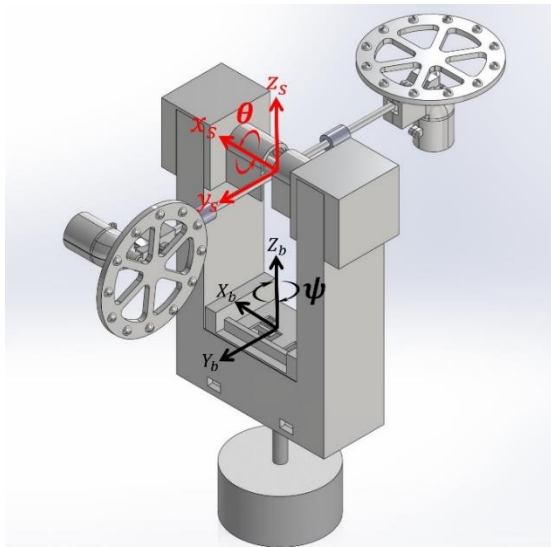
تعداد	مشخصه فنی	تجهیز
۲ عدد	۱۴/۸ وات توان مصرفی	موتور کورلس
۲ بسته باتری	۲۲۰۰ میلی‌آمپر ساعت، ۳/۷ تا ۴/۲ ولت	باتری لیتیومی
۱ عدد	چهار کاناله، ۲ آمپر	راه‌انداز موتور
۱ عدد	STM32 F103C8T6 ۶۰ میلی وات توان مصرفی	برد الکترونیکی پردازشی
۲ عدد	حد تفکیک ۵۰۸۰ پالس	انکودر L21
۲ عدد	۱۰۰ متر برد	ماژول مخابراتی NRF24L01
۲ عدد	۶۵ گرم	دیسک دوار
-	۱۷۰۰ گرم	جرم کل دستگاه

۳- طراحی بخش کنترل و الکترونیک دستگاه

به‌منظور خوانش داده از حسگرها، پردازش داده، داده گردانی و فعال نمودن عملگر نیاز به برد الکترونیکی پردازشی است تا از یک طرف بتواند داده حسگرها را خوانش نموده و از طرف دیگر الگوریتم کنترلی بر روی آن نوشته شود و همچنین بتواند عملگرهای کنترلی را فعال نماید. بدین منظور از یک میکرو کامپیوتر مبتنی بر پردازنده ARM با سری STM استفاده‌شده است. با توجه به اینکه دو محور به‌طور هم‌زمان کنترل می‌شوند از دو حسگر انکودر دقیق ۵۰۸۰ پالس به ازای ۳۶۰ درجه با دقت ۰/۰۷ درجه استفاده‌شده است. این حسگرها به‌طور مستقیم به موتورهای محورهای پیچ و یا متصل شده‌اند و اطلاعات

¹ Reaction Wheel

زاویه‌های محور اول، α_ψ شتاب زاویه‌های محور دوم و θ زاویه محور اول (زاویه پیچ) است.



شکل ۴: مدل سازی دستگاه ساخته شده در نرم افزار سالیدورک

بلوک دیاگرام کنترلی دستگاه ساخته شده در شکل ۵ ترسیم شده است. مطابق این تصویر، ورودی توسط رایانه به برد الکترونیکی پردازشی اعمال شده و داده‌های حسگرها هم به این برد وارد می‌شوند. مطابق الگوریتم نوشته شده در کنترل کننده، فرمان کنترلی به راه انداز موتور اعمال شده و عملگر (چرخ عکس‌العملی) فعال می‌شود. برحسب میزان درصد عرض پالس اعمال شده، عملگر فعال می‌شود و دینامیک وضعیت دو درجه آزادی را تغییر داده و زاویه‌های پیچ و یاو عوض می‌شوند. حسگرها به صورت حلقه بسته داده‌های وضعیت را به کنترل کننده بازخورد می‌دهند.

مطابق شکل ۵، الگوریتم‌های کنترلی متفاوتی می‌تواند بر روی برد پردازشی سخت‌افزاری نوشته شود و از طرفی داده‌ها به صورت برخط^۱ توسط فرستنده مخابراتی به رایانه ارسال شده و بخش مانیتورینگ نتایج را ایجاد می‌نمایند. به عبارتی قابلیت سخت‌افزار در حلقه شامل دسترسی به کنترل کننده و امکان تغییر الگوریتم آن و از طرفی مانیتور کردن برخط داده‌ها در این دستگاه وجود دارد؛ بنابراین می‌توان الگوریتم‌های کنترلی متفاوتی را در این دستگاه توسعه داد و نتایج آن را مشاهده نمود.



شکل ۳: نمایی از عملگر چرخ عکس‌العملی ساخته شده

به منظور ارتباط دوطرفه برد پردازشی و کنترل کننده با رایانه و همچنین نمایش داده‌ها و نتایج، از یک ماژول مخابراتی با مشخصه NRF24L01 استفاده شده است. با استفاده از این فرستنده و گیرنده مخابراتی داده‌ها بین دستگاه ساخته شده و رایانه تبادل می‌شود. این ماژول باعث قابلیت مشاهده برخط نتایج و به روزرسانی دستورات جدید کنترلی شده است.

به منظور تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز دستگاه از باتری‌های لیتیوم-یونی دوسلولی با ظرفیت ۲۲۰۰ میلی‌آمپر ساعت و ولتاژ ۳/۷ تا ۴/۲ ولت استفاده شده است.

الگوریتم کنترلی PID به صورت گسسته بر روی برد الکترونیکی با یک تراشه ARM کد نویسی شده و برد پردازشی با فرکانس کاری ۳۶ مگاهرتز عملکرد دارد. داده حسگرها نیز از طریق ماژول مخابراتی به برد پردازشی وارد می‌شوند.

۴- ساختار کارکردی و کنترلی دستگاه

مدل سازی دستگاه در نرم افزار سالیدورک انجام شده و در شکل ۴ ارائه شده است. مطابق شکل، در این مدل محورهای دوران با Z_b و X_s مشخص شده که دو زاویه θ و ψ را ایجاد می‌کنند. با فرض ساده شونده معادلات حرکت این دستگاه در رابطه زیر مشخص شده است.

$$\begin{bmatrix} M_\theta \\ M_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Disk1} \alpha_\theta \\ I_{Disk2} \alpha_\psi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (۳)$$

که در این رابطه M_θ گشتاور تولیدی محور اول (محور پیچ)، M_ψ گشتاور تولیدی محور دوم (محور یاو)، I_{Disk1} ممان اینرسی دیسک دوار محور اول، I_{Disk2} ممان اینرسی دیسک دوار محور دوم، α_θ شتاب

۵- نتایج و بحث

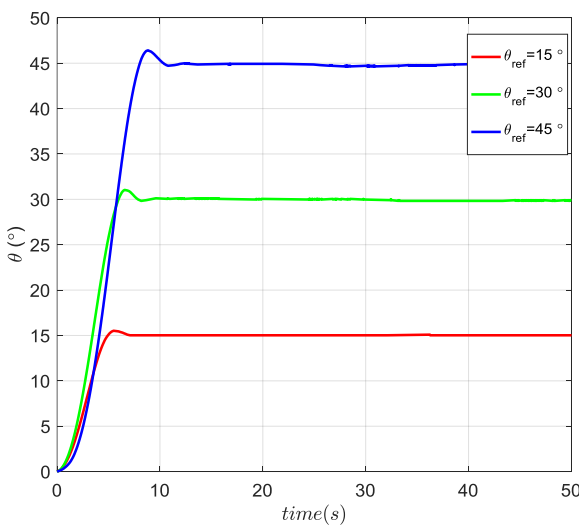
در این بخش، دقت سیستم کنترل وضعیت در دو محور پیچ و یاو به صورت تک محوره و دومحوره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهند که در محور پیچ، خطای حالت ماندگار به کمتر از ۰/۱۱ درجه و در محور یاو به کمتر از ۰/۲۰ درجه محدود شده است که با احتمال ۶۸ درصد در بیش از ۱۰۰ آزمایش تجربی به دست آمده است. این دقت بالا تضمین کننده عملکرد قابل اعتماد این دستگاه است. قابل ذکر است که این دقت به ازای یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی حاصل شده است در صورتی که کنترل کننده تغییر یابد ممکن است دقت بهبود یابد.

در این قسمت رفتار و عملکرد کنترلی این دستگاه به ازای تغییر ضرایب کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی بررسی می شود. تنظیم ضرایب کنترل کننده PID بنا به تجربه طراح و بر اساس آزمون های تجربی مختلف مطابق جدول ۲ انتخاب شده است.

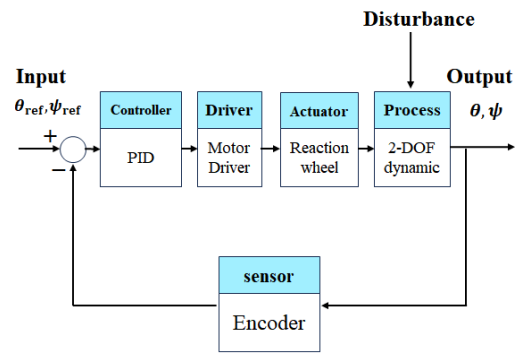
جدول ۲: ضرایب کنترل PID در محور اول به ازای سه زاویه ورودی

θ	K_p	K_i	K_d
15	1.8	0.0007	0.05
30	0.95	0.0007	0.7
45	0.5	0.00055	0.2

در شکل ۸، پاسخ پله محور اول دستگاه به ازای سه زاویه ورودی مرجع متفاوت در مدت زمان ۵۰ ثانیه ترسیم شده است. همان طور که از این شکل مشاهده می شود، سرعت پاسخ بسیار مناسب بوده و میزان فرابرجش بسیار اندک هست و خطای حالت ماندگار نیز ناچیز است.

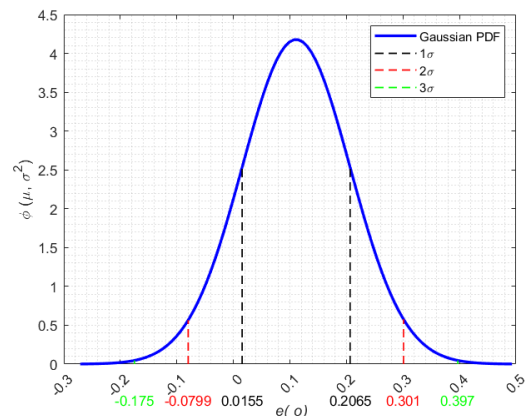


شکل ۸: پاسخ پله محور اول به ازای سه زاویه ورودی مختلف

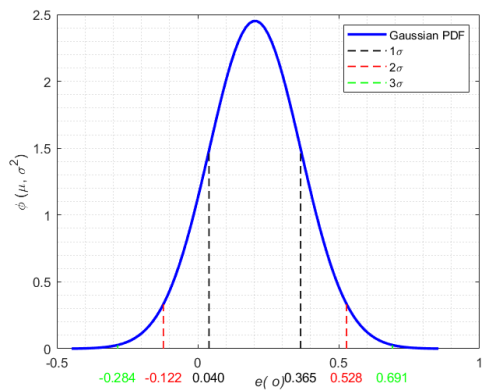


شکل ۵: دیاگرام بلوکی کنترل زاویه دومحوره دستگاه ساخته شده

بعد از ساخت، دقت و خطای عملکردی دستگاه بایستی ارزیابی شود، لذا در ارزیابی ابتدایی برای محور اول و محور دوم، آزمون به دست آوردن میانگین خطا و انحراف معیار^۱ خطا طراحی شد. در این آزمون به ازای هر محور ۱۰۰ مرتبه ارزیابی انجام شد و نهایتاً با ترسیم نتایج، نمودار 3σ به صورت شکل ۶ و ۷ برای دو محور مختلف به دست آمده است. مطابق این دو شکل میانگین دقت کنترلی برای محور اول و دوم به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۲۰ درجه بوده است. همچنین انحراف معیار محور اول و دوم به ترتیب ۰/۰۹ و ۰/۱۶ درجه بوده است.

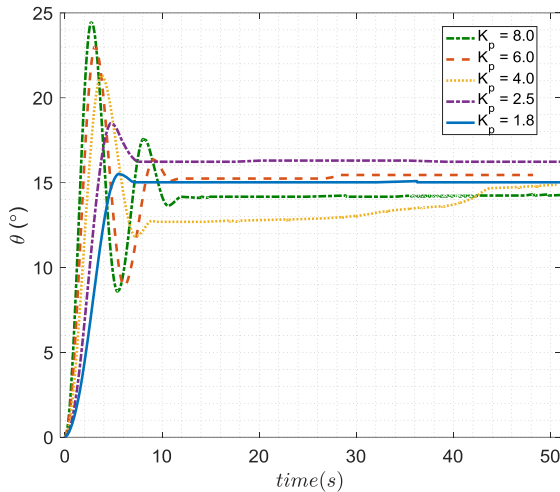


شکل ۶: میانگین و انحراف معیار خطای نشانه روی محور اول (θ)



شکل ۷: میانگین و انحراف معیار خطای نشانه روی محور دوم (ψ)

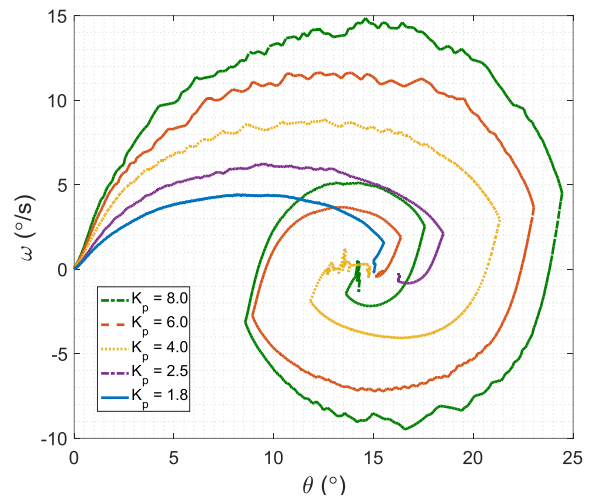
¹ Standard deviation



شکل ۱۰: دقت نشان‌دهنده‌ی محور اول به ازای تغییرات بهره تناسبی

در شکل ۱۲ نمودار خطای وضعیت محور اول به ازای شرایط اولیه مختلف ترسیم شده است. در این شکل ورودی مرجع صفر بوده و طبق انتظار، بعد از گذشت چند ثانیه سیستم کنترل، وضعیت را به سمت صفر همگرا نموده است.

آزمون‌های کنترلی برای محور دوم (ψ) هم مشابه محور اول تکرار شده و به ازای مقادیر ضرایب کنترل کننده PID ذکر شده در جدول ۳، نتایج جالب توجهی به دست آمده است. در شکل ۱۳ نمودار پاسخ پله محور دوم (ψ) به ازای سه ورودی مختلف ترسیم شده است. مطابق این شکل تراجش بسیار ناچیز و خطای حالت ماندگار نیز خیلی کم است. به ازای مانور وضعیت محور دوم، نمودار سرعت زاویه‌ای برحسب زاویه در شکل ۱۴ ترسیم شده است. این نمودار به ازای سه بهره تناسبی مختلف ترسیم شده است. در شکل ۱۵ نمودار پاسخ پله محور دوم سیستم کنترلی برحسب تغییرات بهره کنترل تناسبی ترسیم شده است. با افزایش بهره تناسبی میزان تراجش و سرعت پاسخ افزایش داشته است. در شکل ۱۶، میزان میانگین مطلق خطای وضعیت محور دوم برحسب تغییر بهره انتگرالی ترسیم شده است. همان‌طور که از این شکل هم مشخص می‌شود با تغییر بهره انتگرالی کنترل کننده، می‌توان خطا را به صفر نزدیک کرد.

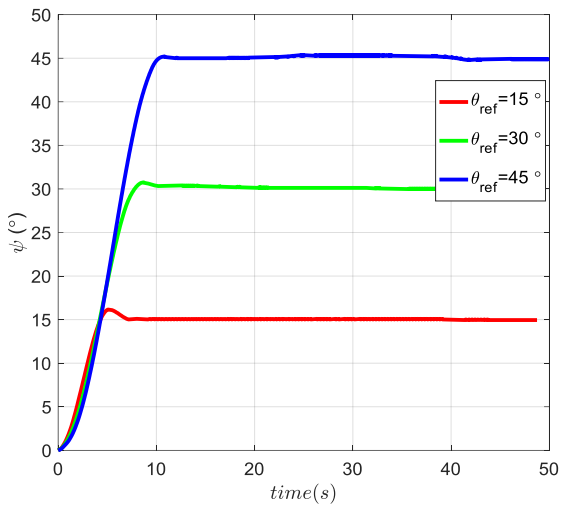


شکل ۹: سرعت زاویه‌ای برحسب زاویه در محور اول به ازای تغییرات بهره تناسبی

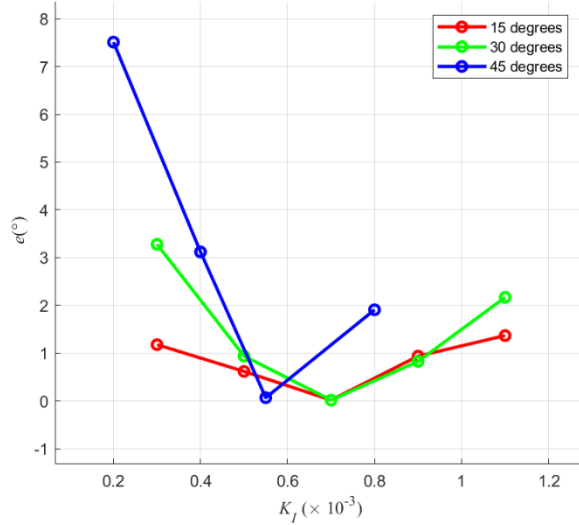
در شکل ۹، سرعت زاویه‌ای محور اول برحسب زاویه محور اول ترسیم شده است. این شکل به خوبی رفتار دو متغیر حالت θ و $\dot{\theta}$ برحسب یکدیگر و به ازای ضرایب مختلف بهره تناسبی کنترل کننده را نشان می‌دهد. به ازای بهره‌های مختلف کنترل تناسبی، میزان تغییرات زاویه و سرعت زاویه‌ای در این شکل مشخص شده است. در شکل ۱۰ هم‌پاسخ پله سیستم کنترلی به ازای ضرایب مختلف کنترل تناسبی ترسیم شده است. در شکل ۱۱ میزان میانگین مطلق خطای نشان‌دهنده برحسب تغییرات بهره انتگرالی ترسیم شده است. این شکل نشان‌دهنده چگونگی تأثیر کنترل انتگرالی بر میزان خطاست. قابل ذکر است در شکل‌ها، میانگین خطای مطلق نشان‌دهنده‌ی مطابق رابطه زیر لحاظ شده است.

$$e = \frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} |\theta_{ref} - \theta| dt \quad (4)$$

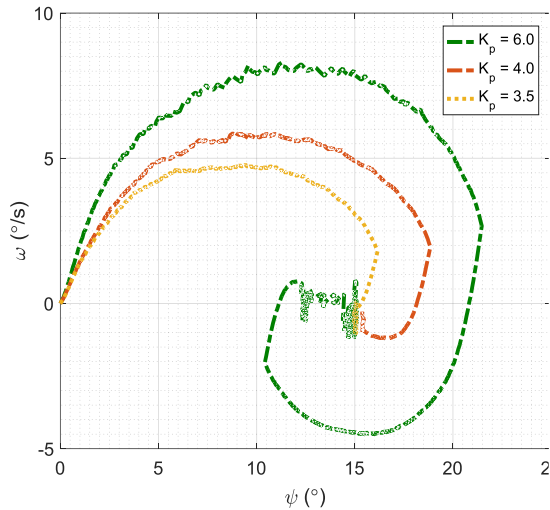
که در آن t_f زمان نهایی که در اینجا ۵۰ ثانیه لحاظ شده است، t_0 زمان شروع و θ_{ref} ورودی مرجع می‌باشد.



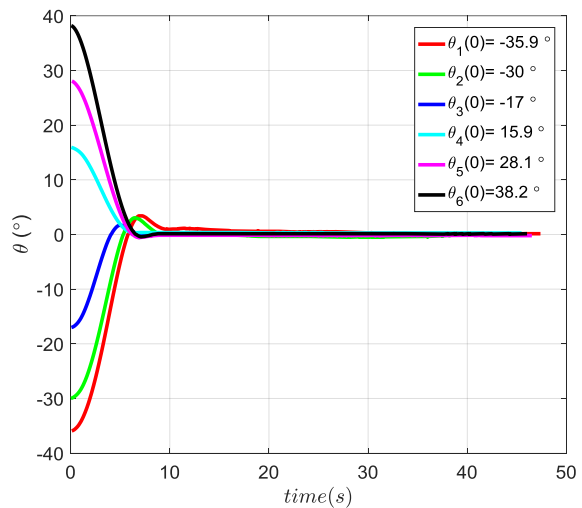
شکل ۱۳: پاسخ پله محور دوم به ازای سه ورودی مختلف



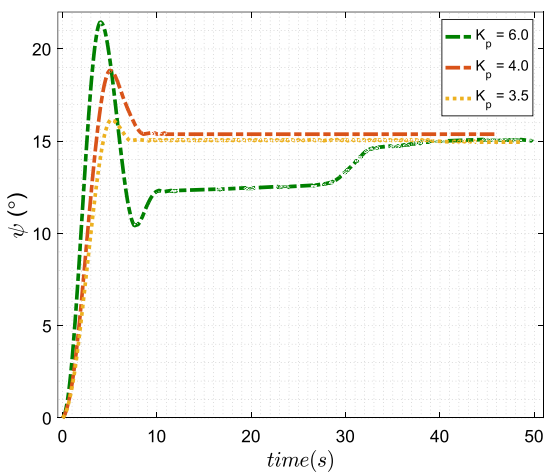
شکل ۱۱: خطای نشانه روی محور اول به ازای تغییرات بهره انتگرالی



شکل ۱۴: سرعت زاویه‌ای بر حسب زاویه در محور دوم به ازای تغییرات بهره تناسبی



شکل ۱۲: خطای وضعیت به ازای شرایط اولیه‌های مختلف با ورودی مرجع صفر

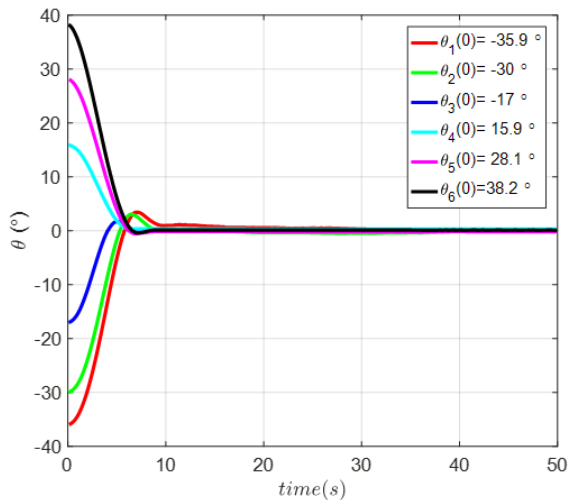


شکل ۱۵: دقت نشانه روی محور دوم به ازای تغییرات بهره تناسبی

جدول ۳: ضرایب کنترل PID در محور دوم به ازای سه زاویه ورودی

ψ	K_p	K_i	K_d
15	3.5	0.0001	1
30	1.4	0.0005	0.15
45	1	0.0004	1.5

کند. در این نمودار شرایط اولیه متفاوت به طور ویژه زوایای منفی و مثبت، انتخاب شده تا توانایی دستگاه در مواجهه با شرایط اولیه متفاوت ارزیابی شود.



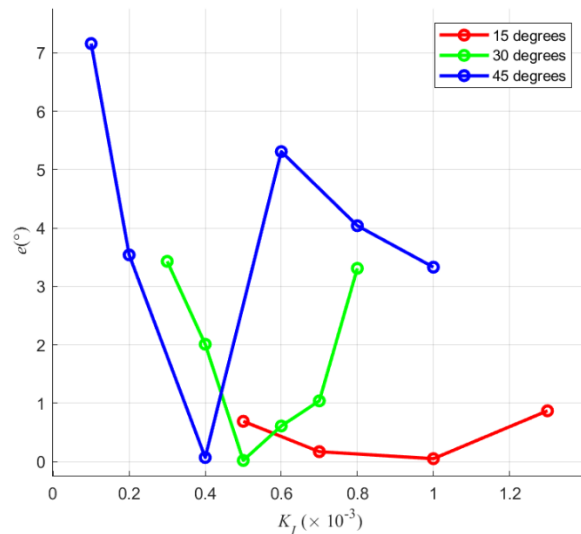
شکل ۱۷: خطای وضعیت به ازای شرایط اولیه‌های مختلف با ورودی مرجع صفر

جدول ۴: ضرایب کنترل PID در دو محور به ازای سه زاویه ورودی

Angle	K_p	K_i	K_d
θ	5	10	0.0005
	10	3	0.0005
	20	1.5	0.0005
ψ	5	11	0.0005
	15	4	0.0001
	30	2	0.0005

در حین مانور دو درجه آزادی، بررسی تأثیر دو زاویه بر روی یکدیگر جالب توجه است، لذا در شکل ۲۱ زاویه محور دوم برحسب زاویه محور اول به ازای سه ورودی مرجع متفاوت ترسیم شده است. دقت شود که در این نمودار، شرایط اولیه صفر بوده و در انتها نمودارها به مقدار مرجع خود نزدیک شده‌اند. رفتار شبه خطی این نمودار نشان‌دهنده کم بودن تأثیر دو محور بر روی یکدیگر است.

دستگاه ساخته شده به صورت دو درجه آزادی توانایی مانورهای وضعیت پیچ و یا داشته و خطای وضعیت آن متناسب با الگوریتم کنترلی می‌تواند متفاوت باشد. قابلیت اطمینان دقت این دستگاه به ازای صد مرتبه تکرار آزمون به ترتیب مقدار ۰/۱۱ و ۰/۲۰ درجه صحه‌گذاری شده است. همچنین به ازای زوایای ورودی متفاوت، ضرایب مختلف کنترل کننده و به ازای شرایط اولیه مختلف و به صورت تک‌محوره و دومحوره تحلیل عملکرد دستگاه کنترلی انجام شده است.



شکل ۱۶: خطای نشان‌دهنده روی محور دوم به ازای تغییرات بهره انتگرالی

در شکل ۱۷ نمودار خطای وضعیت محور دوم (ψ) به ازای شرایط اولیه مختلف ترسیم شده است. در این شکل ورودی مرجع صفر بوده و کنترل کننده توانسته بعد از گذشت چند ثانیه، وضعیت را به سمت صفر همگرا نماید.

در این قسمت نتایج برای کنترل دومحوره و به طور توأمان ارائه شده است. ابتدا ضرایب کنترلی مناسب به ازای چند ورودی مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. در شکل ۱۸ نمودار پاسخ پله دو محور θ و ψ به ازای چند ورودی متفاوت ترسیم شده است. قابل ذکر است همه شکل‌های این بخش در حالت مانور دو محور به صورت توأمان انجام شده است. در شکل ۱۹، نمودار اندازه سرعت زاویه‌ای دومحوره برحسب اندازه زاویه دو محور به ازای سه شرایط اولیه مختلف و با فرض ورودی مرجع صفر (یعنی فقط به ازای شرایط اولیه و هدف رسیدن به زاویه و سرعت زاویه‌ای صفر) ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پس از گذشت چند ثانیه، سرعت و زاویه به سمت صفر همگرا شده‌اند. به عبارتی این نمودار می‌خواهد رفتار سیستم کنترلر دومحوره را به صورت اثر توأمان دو زاویه θ و ψ برحسب سرعت زاویه‌ای‌ها نمایش دهد. برای لحاظ کردن اثر توأمان دو محور از رابطه ریاضی اندازه یا نرم مطابق رابطه ریاضی زیر استفاده شده است.

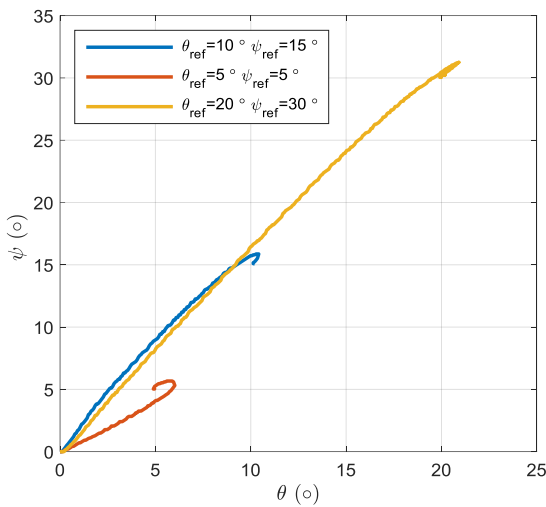
$$\|z\| = \sqrt{\theta^2 + \psi^2} \quad (5)$$

که در آن Z اندازه یا نرم^۱ دو زاویه مذکور است.

به ازای ورودی مرجع صفر و با فرض چند شرط اولیه متفاوت، نمودار زاویه به صورت دومحوره در شکل ۲۰ ارائه شده است. مطابق این شکل این دستگاه با خطای کمی توانسته ورودی مرجع صفر را دنبال

¹ Norm

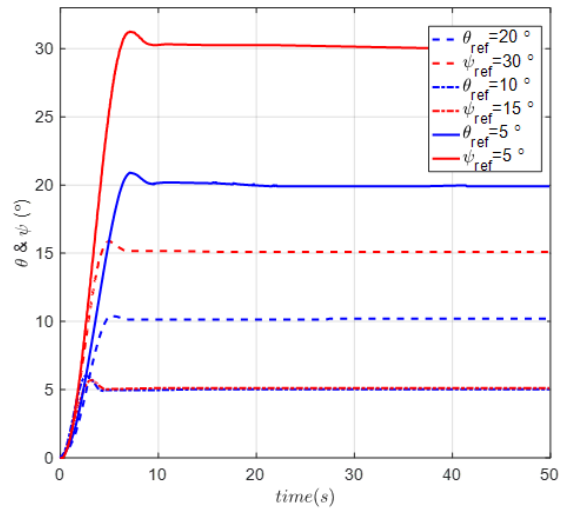
این دستگاه قابلیت انجام آزمون‌های دو درجه آزادی برخی از حسگرهای وضعیت در بستر سخت‌افزار در حلقه را دارد.



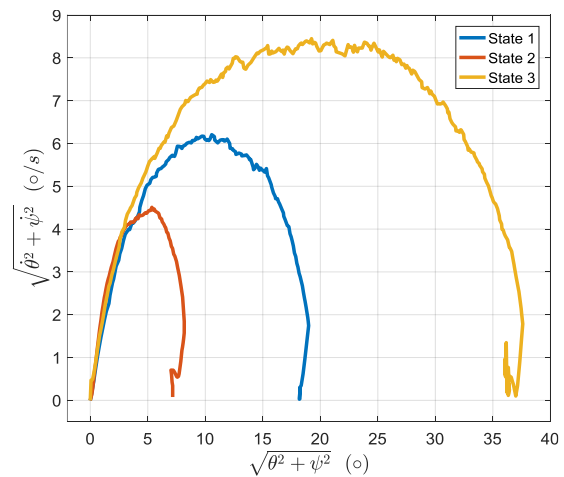
شکل ۲۱: زاویه دوم برحسب زاویه محور اول به ازای سه ورودی مرجع مختلف

۶- نتیجه‌گیری

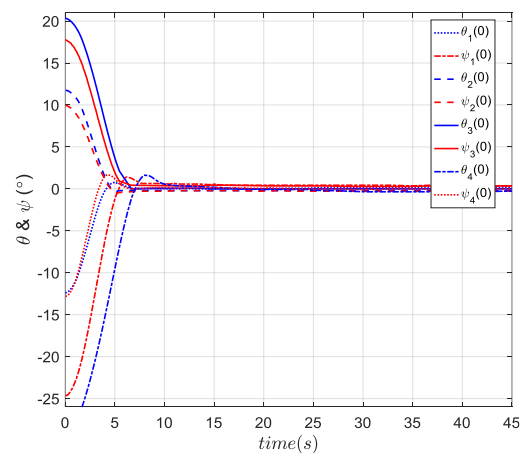
در این مقاله به بررسی نتایج طراحی و ساخت بستر آزمون دستگاه سخت‌افزار در حلقه دومحوره زاویه پرداخته شد. هدف از ساخت این دستگاه رسیدن به کنترل دومحوره زاویه با خطای کوچک به منظور ارزیابی و تست حسگرهای وضعیت یا به‌عنوان میز دو درجه آزادی برای کنترل وضعیت بوده است. این دستگاه که برای آزمون‌های وضعیت دومحوره کارایی دارد، از یک بخش مکانیکی و سازه‌ای و از بخش الکترونیکی و کنترلی ساخته شده است. به ازای کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی رفتار و پاسخ کنترلی این دستگاه بررسی شد و نمودارهای پاسخ پله، پاسخ به ازای شرایط اولیه مختلف، نمودارهای خطا برحسب ضرایب کنترلی مختلف به دست آمده است. موتور کورلس، دیسک موتور، کوپلینگ، بازوی متحرک، راه‌انداز موتور، برد پردازشی الکترونیکی، انکودر نوری، ماژول مخابراتی، باتری لیتیومی بخش‌هایی از این دستگاه هستند. این دستگاه به‌صورت دو درجه آزادی توانایی مانورهای وضعیت پیچ و یابو داشته و خطای وضعیت آن متناسب با الگوریتم کنترلی متغیر می‌باشد. قابلیت اطمینان دقت این دستگاه به ازای صد مرتبه تکرار آزمون برای مانورهای مذکور به ترتیب مقدار ۰/۱۱ و ۰/۲۰ درجه صحت‌گذاری شده است. همچنین به ازای زوایای ورودی مختلف، ضرایب مختلف کنترل‌کننده و به ازای شرایط اولیه مختلف و به‌صورت تک‌محوره و دومحوره تحلیل عملکرد دستگاه کنترلی انجام شده است. این دستگاه قابلیت انجام آزمون‌های دو درجه آزادی برخی از حسگرهای وضعیت در بستر سخت‌افزار در حلقه را دارد.



شکل ۱۸: پاسخ پله دو محور کوپل شده به ازای سه ورودی مختلف



شکل ۱۹: اندازه سرعت زاویه‌های دومحوره برحسب اندازه زاویه به ازای سه شرایط اولیه مختلف (ورودی مرجع صفر)



شکل ۲۰: خطای وضعیت دومحوره به ازای شرایط اولیه‌های مختلف

- [3] V. Bohlouri, H. Haghighi, S. Kaviri, E. Maani, S. Seyedzamani, Design and Implementation of Hardware-in-the-loop (HIL) Test-bed for Spacecraft Attitude Control, Journal of Space Science and Technology, Vol. 12, No. 1, 2019. (in Persian)
- [4] Inumoh, L.O., Forshaw, J.L. and Horri, N.M. "Tilted wheel satellite attitude control with airbearing table experimental results" Acta Astronautica, Vol. 117, :2015, pp. 414-429..
- [5] Krishnanunni, A.R. and et al., "Inertia and Center of Mass Estimation of a 3 DoF Air Bearing Platform". IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, No. 1, 2018, pp. 219-224.
- [6] Hurtado-Velasco, R. and Gonzalez-Llorente, J., "Simulation of the magnetic field generated by square shape Helmholtz coils" Applied Mathematical Modelling, Vol. 40, No. 23-24, 2016, pp. 9835-9847.
- [7] Chesi, S., Perez, O. and Romano, M., "A dynamic, hardware-in-the-loop, three-axis simulator of spacecraft attitude maneuvering with nanosatellite dimensions", Journal of Small Satellites, Vol. 4. No. 1, 2015, pp. 315-328.
- [8] Newton, A., 2021. Design, Development, and Experimental Validation of a Nanosatellite Attitude Control Simulator (Doctoral dissertation, University of Guelph).
- [9] Kazemi, E.M. and Jozvaziri, M.A., Developed of an Algorithm for Design and Construction a Hot Gas Thruster and Compared with Experimental Result", Aerospace Knowledge and Technology Journal, Vol. 6, No. 2, 2017, pp. 73-86.
- [10] Mirshams, M. and et al., "Using air-bearing based platform and cold gas thruster actuator for satellite attitude dynamics simulation," Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 12(, 2015, pp. 1-12.
- [11] Bohlouri, V., Hosseini-Onari, H., Meibody, M. N., & Seyedzamani, S. (2019, April). An Online Hardware-in-the-Loop Testbed for Spacecraft Attitude Control. In *2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 1002-1006). IEEE.

همچنین دقت کنترلی آن می‌تواند با تعریف کنترل‌کننده‌های مختلف بهبود یابد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
e	میانگین مطلق خطای نشانه‌روی
s	ثابته
In	سیگنال ورودی
I	ممان اینرسی
K_p	بهره تناسبی
K_d	بهره مشتقی
K_i	بهره انتگرالی
h	گام زمانی
M	گشتاور تولیدی
M_θ	گشتاور تولیدی محور اول
M_ψ	گشتاور تولیدی محور دوم
X_b	محور اول دستگاه مختصات بدنه
Y_b	محور دوم دستگاه مختصات بدنه
Z_b	محور سوم دستگاه مختصات بدنه
x_s	محور اول دستگاه مختصات میله
y_s	محور دوم دستگاه مختصات میله
z_s	محور سوم دستگاه مختصات میله
I_{Disk1}	ممان اینرسی محور اول
I_{Disk2}	ممان اینرسی محور دوم
علائم یونانی	
θ	زاویه پیچ
$\dot{\theta}$	سرعت زاویه‌ای محور اول
ψ	زاویه یابو
$\dot{\psi}$	سرعت زاویه‌ای محور دوم
α	شتاب زاویه‌ای
α_θ	شتاب زاویه‌ای محور اول
α_ψ	شتاب زاویه‌ای محور دوم
σ	انحراف معیار
μ	میانگین
زیرنویس	
ref	مرجع ورودی
0	مقدار اولیه
$^\circ$	درجه

۸- منابع

- [1] Ley, W., Wittmann, K., & Hallmann, W. (Eds.). (2009). *Handbook of space technology* (Vol. 22). John Wiley & Sons.
- [2] Uscategui, Jhonny, Xinsheng Wang, Gerson Cuba, and María Guarirapa. "High-Precision Magnetic Testbed Design and Simulation for LEO Small-Satellite Control Test." *Aerospace* 10, no. 7 (2023): 640.

- High-Precision Space Applications." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 47, No. 3, 2011.
- [17] N. Sai Krishna, Sushmita Gosavi, Shivika Singh, Naman Saxena, Anirudh Kalijie, Paras Shah, Vishwanath Datla. "Design and Implementation of a Reaction Wheel System for CubeSats." IEEE Aerospace Conference, 2020.
- [18] J. A. Olsen, Attitude Determination and Control System Testbed for Hardware and Software Testing and Verification for Small Satellites, Master's thesis, NTN university, 2021.
- [19] V. Bohlouri, Improving the performance of satellite attitude control with a reaction wheel actuator and considering sensor noise, Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 2, No. 1, 2023.
- [12] M. Stromecki, and A. B. Younes. "Spacecraft Attitude Testbed." Advances in Space Research (2024).
- [13] Larson, W.J. and Wertz, J.R., Space mission analysis and design, Microcosm, Inc., Torrance, CA (US), 1992.
- [14] V. Bohlouri, S. Kaviri, M. Taghinezhad, M. Naddafi Pour Meibody, S. Seyedzamani, Modeling and System Identification of a Reaction Wheel with Experimental Data, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 437-446, 2018. (in Persian).
- [15] Arantes, G. Jr., Martins-Filho, L.S., Santana, A.C. "Optimization of Attitude Control for Brazilian Multimission Satellite Platforms Using On-Off Systems." Journal of Spacecraft and Rockets, 2009.
- [16] Pines, D.J., Hakala, D.B., Malueg, R. "Design of a Lightweight, Two-Axis Gimbal System for



Preparation of Al-B4C Composite by Mechanical Alloying Method and Investigation of Its Thermomechanical Properties

Ali Alizadeh^{*1}, Masoud Lotfian², Mohsen Heydari Beni³, Jafar Eskandari Jam⁴

1. Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
2. M.Sc., Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
3. Ph.D. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
4. Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

The combination of aluminum and its alloys with the powder metallurgy process has enabled various industries to take advantage of the advantages of powder metallurgy production while using the unique properties of this light metal. In this research, B4C reinforcement was used to strengthen aluminum alloy 5083, and Al-B4C nanocomposite was produced by mechanical alloying method and then extrusion and press-sintering operations were performed on the powders. Al5083 and Al5083-B4C powders were produced during the alloying process for 24 hours with a pellet to powder ratio of 20:1 and under argon atmosphere. First, the produced powders are compressed by cold press, and then the press-sinter samples are extruded at 600 degrees under nitrogen atmosphere and the extrusion samples are extruded at 505 degrees with an extrusion ratio of 9:1. In the following, the deformation behavior of Al5083 in the temperature range of 550-350 and strain rate of 0.01-0.1 has been studied. Also, a structural equation has been obtained in each of the production states for the silane stress in the form of a hyperbolic sine. The microstructure of the samples produced by both extrusion and press-sintering methods before the hot pressure test was also examined by optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM) equipped with EDS spectrometer. The results of thermomechanical tests and microstructural studies show that the samples produced by the extrusion method have better mechanical properties than the press-sintered samples.

Keywords

Hierarchical Thin-Walled Structures
ABS Polymer
3D Printer
Lateral Impact
Energy Absorption

Received: 08.04.2024

Revised: 11.18.2024

Accepted: 11.17.2024

*Corresponding Author

Ali Alizadeh

Email

a_alizadeh@mut.ac.ir

1- Introduction

Thin wall structures are one of the most efficient energy absorbing systems in various industries, such as automotive, railway and military, due to their lightness, suitable energy absorption capacity and high energy absorption to weight ratio, in order to protect the lives of passengers as well as pedestrians. Pedestrians are considered during accidents or protection of equipment and devices.

Zhang et al. [1] worked on the amount of energy absorption in linear and tubular structures under axial destruction. In this research, which deals with the simulation and experimental testing of parts

with a special geometry, circular aluminum tubes are arranged next to each other in different states and are subjected to quasi-static load. In addition, the weight of all samples is considered the same for a better comparison.

Li et al. [2] worked on the energy absorption characteristics of series structures under axial and diagonal loads. In this research, the samples were made by aluminum round tubes. By using these pipes, the cross section of the structures has become triangular, square and hexagonal. Also, by using



more pipes, the mentioned structures have been optimized.

Ngoc et al. [3] have worked on the energy absorption characteristics of square series structures under axial load. The design of these structures was inspired by the internal structure of bone and bamboo. In this research, first the samples were simulated by Abaqus software and then they were verified by theoretical method. According to the conducted studies, in most of them, especially in thin-walled structures, the tests performed were quasi-static, and the response of energy absorbers to impact has been investigated less. Also, in the articles that have investigated the impact test, they have focused more on the axial impact mode. Also, the material of the examined samples was mainly made of metal, which cannot be used in all conditions due to the high weight and special physical conditions of metals. However, the case that is noteworthy in the above studies is the lack of examination of multicellular thin-walled structures with mesh and different geometries and made of polymer under lateral impact load. Therefore, in this study, this issue has been investigated.

2- Modeling and Formulation

In this study, a total of eight thin-walled structures made of ABS and subjected to lateral impact have been investigated. ABS polymer has been used to make samples by 3D printer. Also, these parts were printed by Novin Negar Additive Manufacturing Company and by Kitek M1 machine. These samples were drawn under the ASTM D638 standard in SolidWorks software and then printed. The simulations of this project have been carried out by Abaqus software. After the end of the simulation, by doing independence from the mesh, the mesh with dimensions of 0.8 mm and type S4R was selected for different samples and the comparison of the results of the samples with each other has been discussed in terms of energy absorption characteristics. For the experimental test process, a weight drop test machine was used. In order to perform experimental tests, at first, the set of weights is set in such a way that their total weight is

equal to 6.615 kg. Also, the striking surface is considered to be flat so that the force enters the upper surface of the parts in a wide and equal manner. Two samples were made from each of the samples and a total of 8 tests were performed. By this device, the command to drop the weight is sent and the weight collides with the samples. As a result, the amount of shrinkage due to plastic deformation and the performance of the samples against impact can be investigated. During the descent of the weight, the data of the acceleration of the weight was entered into the computer by the sensor and the acceleration-time graph of the weight was extracted.

In these simulations, an impact with an energy of 25 joules has been applied and the amount of total absorbed energy in all structures is more than 95% of the applied energy. Also, according to the values of absorption energy at a distance of $x=3.15$ mm, which is in equilibrium conditions for all 8 samples, it can be seen that sample 1HR16 is the best sample in terms of energy absorption. Sample 1HR16 has the highest value and sample 2H2Q8 has the lowest average crushing force. The amount of crushing efficiency for an ideal energy absorber is 1 (100%), but achieving this number is very difficult. As a result, according to the results, sample 1HR16 has the best efficiency of crushing force among all samples. According to the numerical and experimental results and their interpretation, it is clear that the sample 1HR16 is the best sample to be used as an energy absorber. It was also observed that with the increase in the number of houses in each row, the energy absorption properties and parameters improve, and in general, the rectangular house samples are better energy absorbers than the similar square house samples.

3- Conclusion

The purpose of this study was to investigate numerically and experimentally the destruction of thin-walled multi-cell quadrangular structures made by 3D printers due to lateral impact. Below is a summary of the results of numerical simulations and experimental tests.

In general, and according to the results of simulations and experimental tests, by increasing the number of houses in each sample and reducing the wall thickness of the samples in order to keep the weight, the amount of energy absorption, the average crushing force and the efficiency of crushing force increases. Also, the amount of change in length and shrinkage of each sample decreases with the increase in the number of houses.

Considering that the rectangular house samples were created by adding a horizontal reinforcement to the square house samples, it can be seen that the amount of energy absorption in the equilibrium distance, the average crushing force and the energy efficiency The flattening of rectangular samples, like any square sample, has increased. By increasing the number of square houses from 6 to 8, the amount of energy absorption has increased by 5%, the average crushing force has increased by 15%, and the crushing force efficiency has increased by 30%.

By increasing the number of rectangular houses from 12 to 16, the amount of energy absorption has increased by 16%, the average crushing force has increased by 35%, and the crushing force efficiency has increased by 47%. By converting a sample of 6 square houses to a sample of 12 rectangular houses, the average crushing force increases by about 7% and the efficiency of crushing force increases by 20%.

By converting a sample of 8 square houses to a sample of 16 rectangular houses, the average crushing force increases by 30% and the crushing force efficiency increases by 37%. By adding inner layers to the samples, the values of energy absorption parameters decrease.

The smaller the amount of shrinkage (change in length) of the sample under impact, the greater the maximum shrinkage force and resistance of the sample to impact. According to these points and

results, it is obvious that sample 1HR16 is the best energy absorber among these samples.

4- References

- [1] Suryanarayana, C., Al-Aqeeli, N., "Mechanically alloyed nanocomposites," *Progress in Materials Science*, Vol. 58, pp. 383-502, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2012.10.001, 2023.
- [2] Suresh, S., Vasudevan, M., "Effect of B4C Reinforcement on the Mechanical Properties of Al Composites," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 43, pp. 2345-2352, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.345, 2022.
- [3] Kumar, S., Balaji, A., "Characterization of Al/B4C Composites Synthesized by Mechanical Alloying," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 878, pp. 160512, DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.160512, 2023.
- [4] Sahoo, S.K., Mishra, S.C., "Investigation of Al-B4C Composites for High Temperature Applications," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, pp. 6734-6741, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.030, 2024.
- [5] Zhu, Y., Hu, C., "Thermomechanical and Microstructural Properties of Al-B4C Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 187, pp. 107878, DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107878, 2024.
- [6] Zhao, H., Chen, X., "Microstructural and Wear Properties of Al-B4C Composites," *Materials & Design*, Vol. 196, pp. 109057, DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109057, 2023.
- [7] Sahoo, S.K., Mishra, S.C., "Investigation of Al-B4C Composites for High Temperature Applications," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, pp. 6734-6741, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.030, 2020.



تهیه کامپوزیت Al-B₄C به روش آلیاژسازی مکانیکی و بررسی خواص ترمومکانیکی آن

علی علیزاده^{۱*}، مسعود لطفیان^۲، محسن حیدری بنی^۳، جعفر اسکندری جم^۴

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

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

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

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

چکیده

کلمات کلیدی

آلومینیوم
آلیاژسازی مکانیکی
آزمون فشار گرم
اکستروژن

در این پژوهش از تقویت‌کننده B₄C جهت استحکام‌بخشی به آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ استفاده شد و نانو کامپوزیت Al-B₄C به روش آلیاژسازی مکانیکی تولید و سپس عملیات اکستروژن و پرس-زینتر بر روی پودرها انجام گرفت. تولید پودرهای Al5083 و Al5083-B₄C طی عملیات آلیاژسازی به مدت ۲۴ ساعت و با نسبت گلوله به پودر ۲۰:۱ و تحت اتمسفر آرگون صورت گرفت. ابتدا پودرهای تولیدی توسط پرس سرد فشرده‌شده و سپس نمونه‌های پرس-زینتر در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس تحت اتمسفر نیتروژن و نمونه‌های اکستروژن تحت دمای ۵۰۵ درجه سلسیوس با نسبت اکستروژن ۹۰:۱ اکستروژن شده‌اند. در ادامه رفتار تغییر شکل Al5083 در محدوده دمایی ۳۵۰-۵۵۰ درجه سلسیوس و نرخ- کرنش ۰/۱-۰/۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین یک معادله ساختاری در هر یک از حالات تولیدی برای تنش سیلان به صورت سینوس هاپربولیک به دست آمده است. ریزساختار نمونه‌های تولیدی به هر دو روش اکستروژن و پرس-زینتر قبل از آزمون فشار گرم نیز توسط میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به طیف‌سنج EDS مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمون‌های ترمومکانیکی و مطالعات ریزساختاری نشان می‌دهد، نمونه‌های تولیدی به روش اکستروژن خواص مکانیکی مطلوب‌تری نسبت به نمونه‌های پرس-زینتر را دارند.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸

*نویسنده مسئول

علی علیزاده

ایمیل

a_alizadeh@mut.ac.ir

۱- مقدمه

در نهایت موجب شکسته شدن ذرات می‌گردند. بنابراین این فرآیند آلیاژسازی مکانیکی تحت تأثیر دو فرآیند متضاد جوش سرد (یکی شدن ذرات در اثر ضربه) و شکست (خرد شدن ذرات در اثر ضربه) قرار دارد. زمانی فرآیند آلیاژسازی مکانیکی به اتمام می‌رسد که سرعت جوش خوردن ذرات با سرعت شکستن آن‌ها برابر باشد که نتیجه‌ی آن، اندازه متوسط ذرات در یک حد ثابت است [۲ و ۳]. کامپوزیت‌های آلومینیوم-کاربید بور (Al-B₄C) به دلیل خواص مکانیکی بالا و وزن سبک، در صنایع مختلفی از جمله دفاع، هوافضا و خودروسازی کاربرد دارند. این کامپوزیت‌ها به خاطر مقاومت در برابر سایش و حرارت، گزینه‌ای مناسب برای تولید زره و تجهیزات با کارایی بالا هستند. نوآوری‌های جدید در روش‌های تولید مانند آلیاژسازی مکانیکی و پرس-سینک‌های حرارتی به بهبود خواص ترمومکانیکی آن‌ها کمک کرده است. همچنین، تحلیل‌های میکرو ساختاری و استفاده از نانو

آلیاژسازی مکانیکی یکی از روش‌های فرآوری پودر است که در دمای اتاق یا کمی بالاتر از آن انجام می‌شود [۱]. در سال ۱۹۶۶ فرآیند آسیا کردن توسط بنجامین و همکارانش برای ایجاد استحکام در دماهای بالای سوپر آلیاژهای پایه نیکل مورد استفاده در توربین‌های گازی ابداع شد. امروزه نیز این روش برای ساخت انواع مواد با ساختارها و خواص گوناگون استفاده می‌شود. به‌طور مثال می‌توان به ساخت کامپوزیت‌ها شامل کامپوزیت‌های زمینه فلزی و سرامیکی اشاره نمود [۲]. آلیاژسازی مکانیکی فرآیند حالت جامدی است که در آن مخلوط پودری شکل در یک آسیا (اغلب در اتمسفر خنثی) تحت تأثیر برخورد‌های پرانرژی بین اجزا آسیا (گلوله و محفظه) قرار می‌گیرد. در حین انجام این فرآیند، تغییر شکل پلاستیک شدیدی در ذرات پودر ایجاد می‌شود و در نتیجه کریستال‌ها به شدت تحت کرنش قرار می‌گیرند. با گذشت زمان، باندهای برشی ایجاد می‌شوند و شروع به رشد می‌کنند و



بررسی رفتار تغییر شکل گرم در مواد نانو کامپوزیت و نانو ساختار برای شکل دهی ثانویه دارای اهمیت ویژه‌ای است. علاوه بر آن مکانیزم‌های بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد دینامیکی و حل شدن رسوبات ریزساختار، بر خواص مکانیکی نهایی تأثیرگذار است. با توجه به امکان وقوع هم‌زمان و اندرکنش فرایندهای مذکور، مطالعه رفتار تغییر شکل در دمای بالا و مکانیزم‌های آن امری ضروری به نظر می‌رسد. لذا، در این پژوهش شرایط ساخت آلیاژ به همراه تقویت کننده B_4C توسط روش آلیاژسازی مکانیکی، همراه با مشخصه یابی مکانیکی آن در دماهای بالا جهت دستیابی به شرایط ساخت بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش از پودر آلیاژ آلومینیوم Al5083 به‌عنوان زمینه و پودر کاربید به‌عنوان تقویت کننده استفاده شده است که به روش افشانش گازی در متالورژی پودر مشهد ساخته شده است. پودر مذکور دارای متوسط اندازه ذرات زیر ۱۰۰ ($85\mu m$) میکرون بوده است. چگالی ظاهری این پودر به روش هال (استاندارد ASTM B417) اندازه‌گیری شد که تقریباً $01/1\text{ gr/cm}^3$ است. ترکیب شیمیایی پودر Al5083 استفاده شده در این پژوهش که به روش طیف‌سنجی جذب اتمی تعیین شده است در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی پودر Al5083

عناصر	Al	Mg	Si	Mn	Fe	Ti	Cu	Zn	Cr
Wt-%	Rem.	۴-۹	-۰/۷	-۰/۴	۰/۴	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۲۵	-۰/۲۵
		۴	۰/۴	۰/۱					۰/۰۵

۲-۲- روش تحقیق

اسید استتاریک ($(CH_3(CH_2)_{16}COOH)$) به‌عنوان عامل کنترل کننده‌ی فرآیند آلیاژسازی مورد استفاده قرار گرفت. میزان ۲ درصد وزنی از اسید استتاریک به پودرهای اولیه افزوده شد. انجام فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و تولید پودرهای کامپوزیتی Al5083- B_4C ، در آسیای گلوله‌ای از نوع سایشی مجهز به سیستم خنک کننده‌ی آبگرد صورت گرفت. محفظه‌ی آسیا از جنس فولاد زنگ نزن و با حجم سه لیتر بود. از گلوله‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن و با قطر $4/8\text{mm}$ استفاده شد. نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۲۰ و سرعت

ذرات می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد کلی این مواد منجر شود. در ادامه به تعدادی از آن‌ها در از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

بررسی تأثیر فشار داغ بر میکرو ساختار و انسجام نانو کامپوزیت Al5083/ B_4C [۴]. بهبود خواص ترمومکانیکی نانو کامپوزیت‌های Al5083/SiC با پرس ایزو استاتیک [۵]. تأثیر نسبت اکستروژن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های Al2024/SiC [۶]. بررسی اثرات تنش‌های حرارتی و تغییر شکل‌های ترمومکانیکی در کامپوزیت‌های تقویت شده با کاربید بور و ماتریس آلومینیومی [۷]. بررسی تأثیر ذرات گرافن و کاربید بور بر خواص ترمومکانیکی و مقاومت در برابر سایش [۸]. بررسی رفتار سایش و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت شده با B_4C و SiC [۹]. مطالعه ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های Al6063 تقویت شده با ذرات کاربید بور [۱۰]. بررسی تأثیر محتوای مختلف B_4C بر رفتار مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌های آلومینیومی [۱۱]. بررسی تأثیر افزایش درصد B_4C بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های Al- B_4C [۱۲]. بررسی تأثیر فرایندهای ترمومکانیکی بر ساختار کامپوزیت‌های آلومینیومی تقویت شده با B_4C [۱۳]. تفاوت پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده تاکنون، در نوع آلیاژ آلومینیوم (Al5083) و ترکیب آن با روش آلیاژسازی مکانیکی تحت تأثیر دماهای به خصوصی است. با توجه به نیروی محرکه بالا برای رشد دانه‌ها در دماهای بالای تغییر شکل،

از پودر B_4C با متوسط اندازه ذرات ۲۰ میکرون و با چگالی $2/56\text{gr/cm}^3$ به میزان ۳ و ۵ درصد وزنی به‌عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. در جدول ۲ درصد وزنی ترکیب شیمیایی پودر B_4C ارائه شده است.

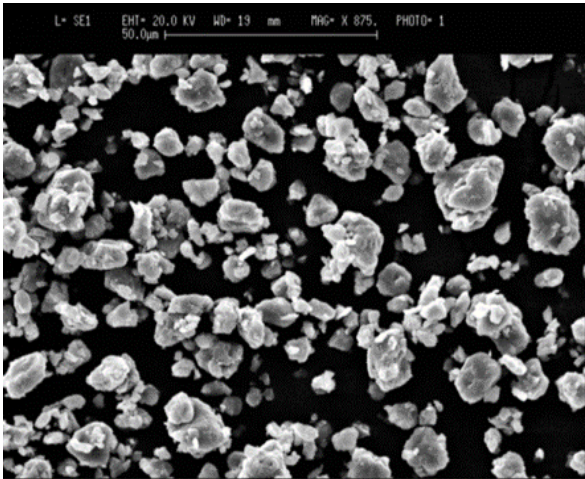
جدول ۲: درصد وزنی ترکیب شیمیایی پودر B_4C

مجموع بور	مجموع کربن	کل بور و کربن
%۷۷/۵	%۲۱/۵	۹۹%

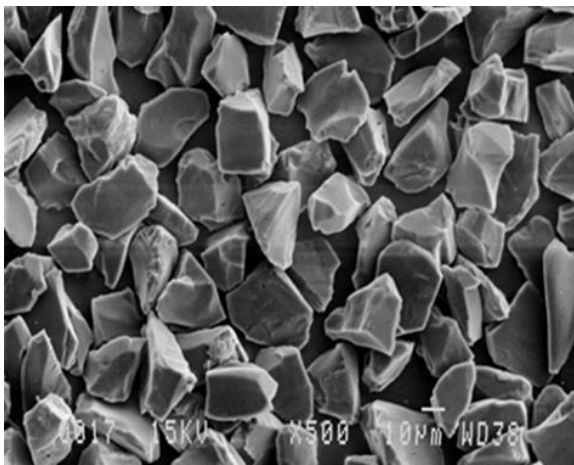
دوران 460rpm بود. محفظه‌ی آسیا تحت اتمسفر آرگون قرار داشت و آلیاژسازی به مدت ۲۴ ساعت ادامه یافت. جهت اندازه‌گیری دانسیته ظاهری پودر در حین فرآیند آسیای مکانیکی، عملیات آسیا در بازه‌ی زمانی سه‌ساعته قطع شده و مقداری از پودر جهت اندازه‌گیری دانسیته ظاهری از محفظه‌ی آسیا خارج شد. به‌منظور اثر ذرات کاربید بور و زمان آلیاژسازی مکانیکی بر مورفولوژی ذرات پودر Al5083 اندازه‌ی دانه‌های زمینه‌ی آلومینیومی پودر Al5083 در ابتدا و انتهای زمان آسیا کاری از پودرهای موجود نمونه‌برداری شد. به‌منظور بررسی چگالی ظاهری پودرها نیز، در فواصل مختلف (هر سه ساعت) از پودرهای Al5083 و Al5083-3wt%B₄C نمونه‌برداری شد. تغییر مورفولوژی پودرها در ابتدا و انتهای فرآیند آلیاژسازی مکانیکی به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل S360 Cambridge مورد بررسی قرار گرفت. چگالی ظاهری پودرها به روش هال (استاندارد ASTM-B417) اندازه‌گیری شد. فشرده‌پذیری پودرها با استفاده از فشار تک‌محوری سرد مورد ارزیابی قرار گرفت. به دلیل آن‌که روش ساخت یکی از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش است، از دو قالب فولادی استفاده شد. قالب فولادی از جنس SPK با قطر محفظه‌ی یک سانتی‌متر به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌های پرس-زینتر و قالب فولادی از جنس فولاد گرم کار با قطر محفظه‌ی سه سانتی‌متر به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌های اکستروژن مورداستفاده قرار گرفت. در هر دو قالب عملیات فشردن تحت تنش ۷۰۰ مگا پاسکال انجام شد. زمان توقف در تنش فشاری مذکور دو دقیقه در نظر گرفته شد. پس از خروج نمونه‌ها از قالب چگالی به روش حجمی اندازه‌گیری شد. برای زینتر نمونه‌های پودری از یک کوره‌ی تیوبی استفاده شد. گاز نیتروژن (N₂) به‌عنوان اتمسفر کوره در نظر گرفته شد. ابتدا نمونه‌ها داخل کوره قرار داده شدند و به کوره به مدت ۶۰ دقیقه زمان داده شد تا به دمای ۴۰۰ درجه برسد. در دمای فوق نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه نگه‌داشته شدند تا مواد فرار نظیر PCA حذف شوند سپس کوره بعد از ۳۰ دقیقه زمان به دمای ۶۰۰ درجه رسید که نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در این دما زینتر شدند و در کوره تا دمای رسیدن به محیط تحت اتمسفر سرد شدند. به دلیل رسیدن به چگالی نزدیک به چگالی تئوری از روش اکستروژن داغ استفاده شد، قرص‌های پودری آماده‌شده توسط پرس سرد در قالب اکستروژن داغ با نسبت ۹:۱ قرار داده شدند. در این پژوهش از قالب اکستروژن با جنس فولاد گرم کار H13 استفاده شد. این قالب اکستروژن متشکل از دو ماتریس متصل شونده و یک سنبه می‌باشد، ماتریس بالایی استوانه‌ای شکل و ماتریس پایینی دارای شیب

خروجی می‌باشد که توسط پیچ به هم متصل می‌شود و توسط یک سنبه استوانه‌ای شکل عمل فشردن صورت می‌گیرد (شکل ۳-۷). دمای موردنیاز برای اکستروژن از طریق سیم‌پیچی که دور قالب اکستروژن قرار دارد، فراهم می‌شود و برای کنترل دمای قالب از نشانگر دما متصل به ترموکوپل استفاده شده است. دمای اکستروژن داغ ۵۰۵ درجه به‌طور ثابت برای تمامی نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. مدت‌زمان پیش‌گرم نمونه‌ها در این دما، برای تمامی نمونه‌ها ۲۵ دقیقه محاسبه شده است. به دلیل داشتن کمترین اصطکاک بین قالب و نمونه برای اکستروژن و داشتن سطحی باکیفیت بالا از روانکار گرم کار D321R Molykote استفاده شده است. عملیات اکستروژن توسط پرس با ظرفیت ۱۰۰ تن و مجهز به سیستم اندازه‌گیری نیرو و کنترل سرعت انجام شد و سرعت اکستروژن 1 mm/s در نظر گرفته شده است. به دلیل تعیین مشخصه‌های تغییر شکل گرم و عدم گلوئی شدن و در-نتیجه عدم محدودیت در اعمال کرنش، از آزمون فشار گرم استفاده شده است. به‌منظور انجام آزمون فشار گرم از دستگاه Zwick/Roll استفاده شد. این دستگاه مجهز به کوره با دقت $5 \pm ^\circ\text{C}$ است. جنس فک‌های فشاری از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل بود. نمونه‌های این آزمون استوانه‌هایی با قطر 10 mm و ارتفاع 15 mm بوده‌اند. این آزمون در سه دمای ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و دو سرعت فک ۶ و ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفته است. زمان نگهداری نمونه‌ها به‌منظور هم‌دما شدن در بین دو فک دستگاه ۳ دقیقه در نظر گرفته شد و سپس آزمون فشار گرم انجام شده است. به‌منظور کاهش اصطکاک بین سطح فک‌ها و نمونه در حین اعمال کرنش، چندلایه نوار تفلون بر روی نمونه‌ها پیچیده شده بود. نیروی اعمالی و جابه‌جایی فک‌ها نیز جهت محاسبه‌ی تنش و کرنش در حین تغییر شکل گرم توسط دستگاه ثبت گردیده است. هم‌چنین، ثابت بودن سرعت فک و کاهش ارتفاع نمونه در حین اعمال کرنش، باعث افزایش نرخ کرنش گردیده که به‌منظور تعیین نرخ کرنش متوسط، زمان نیز در حین اعمال کرنش ثبت شده است. به‌منظور بررسی تغییرات ریزساختاری، نمونه‌ها پس از آماده‌سازی توسط میکروسکوپ الکترونی و نوری بررسی شده‌اند. در اکستروژن و پرس-زینتر، نمونه‌ها در دو راستای عمودی و موازی جهت اعمال فشار آماده‌سازی و در راستای اعمال فشار در تغییر شکل گرم، با استفاده از سنباده‌های ۱۰۰-۲۰۰۰ سنباده‌زنی شدند. در ادامه عملیات پولیش با خمیر الماسه ۶، ۳ و ۱ میکرون انجام گرفت. جهت حکاکی از محلول کلکتر (2/5 O₃، 1/5 HCl، 1 HF و 95 H₂O) استفاده شد. تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط

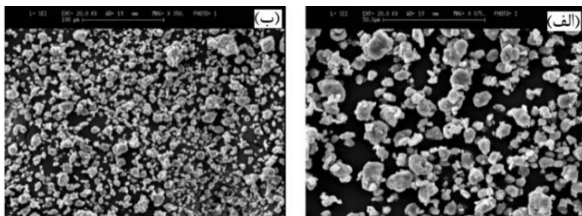
نتیجه‌ی وجود این ذرات سخت بین ذرات پودر فلزی نرم باعث افزایش تغییر شکل موضعی در هنگام جوش سرد شد. در نتیجه مکانیزم‌های جوش سرد و شکست در حضور ذرات تقویت‌کننده سریع‌تر صورت پذیرفت و آلیاژسازی مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده سریع‌تر انجام گرفت [۲].



شکل ۲: مورفولوژی پودر Al5083 بدون تقویت‌کننده بعد ۲۴ ساعت آلیاژسازی مکانیکی



شکل ۳: تصویر SEM ذرات پودر B4C



شکل ۴: مورفولوژی پودر Al5083-3%B4C بعد ۲۴ ساعت آلیاژسازی مکانیکی در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000.

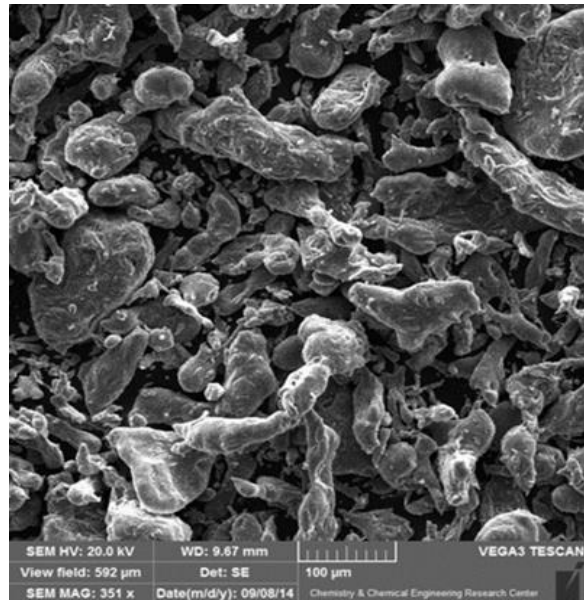
میکروسکوپ‌های Cambridge S360 مدل ۱۹۹۰ و VEGA3 TESCAN گرفته شدند.

۳- نتایج

یکی از اهداف این مطالعه تولید پودر نانو ساختار Al5083 با استفاده از روش آلیاژسازی مکانیکی و سپس مخلوط پودر تقویت‌کننده B4C در زمینه Al5083 به صورت همگن (داخل آسیا) و سرانجام تولید پودر نانو کامپوزیت Al5083-B4C است.

۳-۱- بررسی پودرهای فرآوری شده

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از دو پودر Al5083 بدون تقویت‌کننده قبل از آلیاژسازی مکانیکی و بعد از آن به ترتیب در شکل ۱ و ۲ آورده شده است. همچنین تصویر SEM ذرات تقویت‌کننده B4C در شکل ۳ نشان داده شده است.



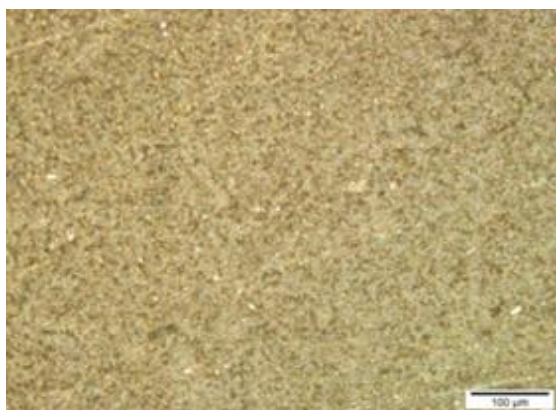
شکل ۱: مورفولوژی پودر Al5083 بدون تقویت‌کننده قبل از آلیاژسازی مکانیکی

در شکل ۴ و ۵ مورفولوژی پودرهای Al-3%B4C و Al-5%B4C بعد از ۲۴ ساعت آلیاژسازی مکانیکی ارائه شده است. محققین قبلی نشان داده‌اند که ترتیب مراحل آسیا در آلیاژ حاوی ذره تقویت‌کننده همانند پودر آلیاژ آلومینیوم بدون حضور تقویت‌کننده است. حضور ذرات سرامیکی ترد در زمینه‌ی نرم منجر به سریع‌تر شدن عمل آلیاژسازی مکانیکی شد [۳]. در مراحل اولیه آسیا کاری، ذرات پودر فلزی نرم و انعطاف‌پذیر توسط برخورد گلوله‌ها پهن شده است. این در حالی است که ذرات تقویت‌کننده‌ی سخت، خرد یا تکه‌تکه شده‌اند، این ذرات خرد شده تمایل دارند تا توسط اجزای انعطاف‌پذیر احاطه شوند.

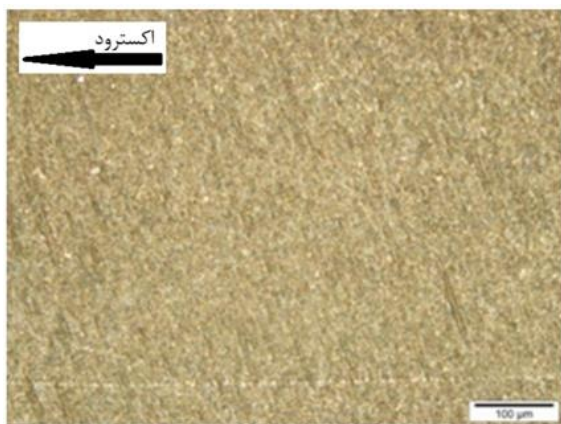
افزودن ذرات تقویت‌کننده پودرهایی با مورفولوژی هم محورتر و با توزیع یکنواخت‌تر به دست آمده است. همچنین با اضافه شدن میزان تقویت‌کننده از ۳٪ به ۵٪ نیز پودر زمینه آلومینیوم نیز ریزتر شده است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم‌های موجود در کامپوزیت‌های با مقدار بیشتر فاز تقویت‌کننده با سرعت بیشتری اتفاق افتاده است. همچنین سختی در زمینه به علت افزایش فاز تقویت‌کننده و ریزتر شدن اندازه دانه اتفاق افتاده است [۱۴].

۳-۲- آنالیز ریزساختاری نمونه‌های تولیدی به روش اکستروژن و پرس-زینتر

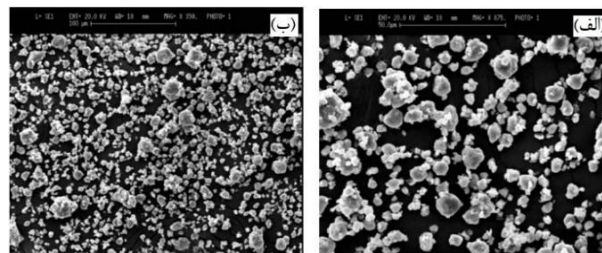
در شکل‌های ۶ تا ۹ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های Al-Mill (آلومینیوم آسیا شده بدون تقویت‌کننده) و Al-3%B₄C در دو راستای موازی و عمود بر جهت اکستروژن و در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های Al-Mill و Al-3%B₄C در دو راستای موازی و عمود بر جهت فشار در نمونه‌های پرس-زینتری نشان داده شده است.



شکل ۶: تصویر میکروسکوپ نوری نمونه Al-Mill ساخته شده به روش اکستروژن، عمود بر جهت اکستروژن

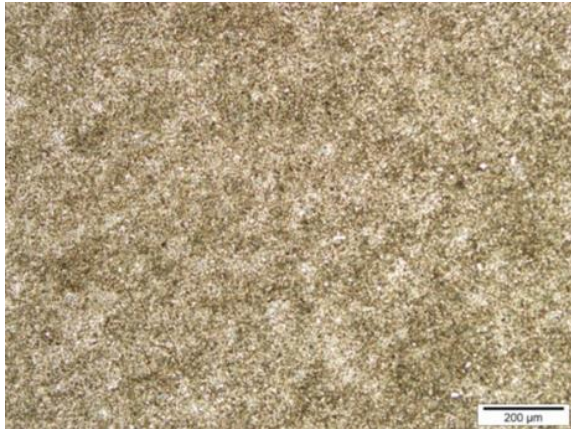


شکل ۷: تصویر میکروسکوپ نوری نمونه Al-Mill ساخته شده به روش اکستروژن، موازی محور اکستروژن

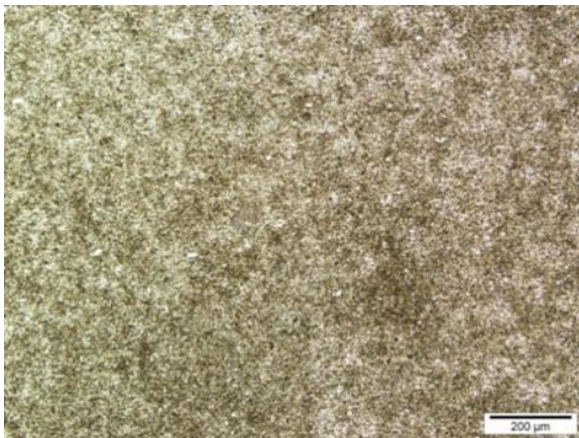


شکل ۵: مورفولوژی پودر Al5083-5%B₄C بعد ۲۴ ساعت آلیاژسازی مکانیکی در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000

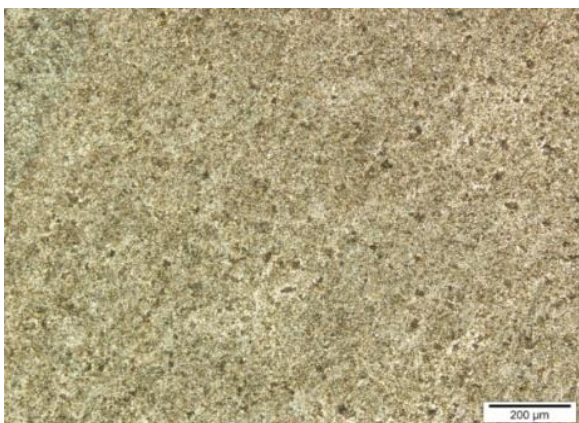
به منظور به دست آوردن زمان مناسب جهت آسیا کاری، عملیات آسیا در بازه‌ی زمانی سه ساعته قطع شده و مقداری از پودر جهت اندازه‌گیری دانسیته ظاهری از محفظه‌ی آسیا خارج شد. مقدار دانسیته ظاهری طبق روش توضیح داده شده در استاندارد ASTM-B41 محاسبه گردید. در زمانی که میزان چگالی ظاهری در بازه زمانی تغییر نمی‌کند می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه تغییرات فیزیکی و واکنش‌های شیمیایی در پودر مورد مطالعه اتفاق افتاده است. در این مطالعه در مورد تمامی پودرها بررسی لازم جهت به دست آوردن زمان بهینه آسیا انجام شد و در انتها مدت زمان ۲۴ ساعت به منظور انجام عملیات آلیاژسازی مکانیکی انتخاب گردید. همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده است، شکل ذرات اولیه ناهمگن بوده و پس از آسیا کاری به مدت ۲۴ ساعت، ذرات به صورت همگن خرد شده و شکلی تقریباً کروی پیدا کرده‌اند که دارای نسبت سطح به حجم بالاتری است. با مقایسه پودر حاوی تقویت‌کننده و پودر فاقد تقویت‌کننده ریزتر بودن ذرات پودر حاوی تقویت‌کننده مشخص است که نشان داد اضافه شدن ذرات سخت تقویت‌کننده در ریزتر شدن اندازه ذرات نهایی تأثیر مستقیم دارد. در واقع حضور ذرات سرامیکی در بین ذرات پودر آلیاژ زمینه در حین فرایند آسیا کاری می‌تواند باعث تغییر شکل در ذرات مجاور تقویت‌کننده شود. در واقع با افزایش تغییر شکل موضعی، ذرات زمینه کار سخت‌تر شده و در نتیجه فرایند جوش خوردن ذرات آلومینیوم که در بخش قبلی توضیح داده شد، اتفاق افتاد. علت آن فعال شدن مکانیزم جوش خوردن با رسیدن میزان تغییر شکل ذرات و چگالی نایجایی‌ها به یک مقدار بحرانی است. در واقع این بدین معنی است که ذرات سخت تقویت‌کننده باعث انتقال انرژی به زمینه فلزی همانند گلوله‌های آسیا هستند. مطالعاتی در گذشته نشان داده است که چقرمگی شکست پودرهای کامپوزیتی کمتر از زمینه تقویت نشده است و این خود باعث سرعت بخشیدن به فرایند شکست ذرات شده است. سختی بالاتر در پودر کامپوزیتی دلیل پایین بودن چقرمگی شکست آن‌ها است. با مقایسه تصاویر ۱، ۳ و ۴ می‌توان دریافت که با



شکل ۱۰: تصویر میکروسکوپ نوری Al-Mill ساخته شده به روش پرس-زینتر، عمود بر جهت فشار

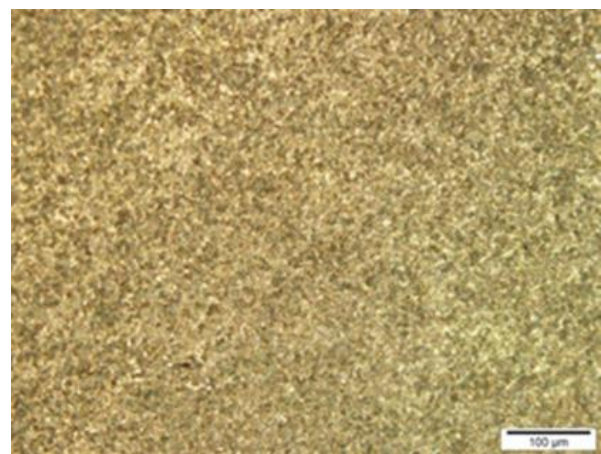


شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپ نوری Al-Mill ساخته شده به روش پرس-زینتر، موازی جهت فشار

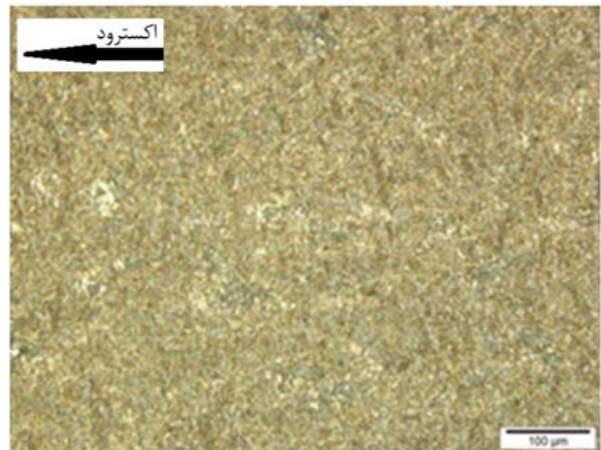


شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ نوری نمونه Al-3%B4C ساخته شده به روش پرس-زینتر، عمود بر جهت فشار

همان‌طور که مشاهده گردید، کشیدگی دانه‌های زمینه‌ی آلومینیومی و همچنین ذرات تقویت‌کننده‌ی B4C در راستای محور اکستروژن به‌خوبی مشخص شد. علاوه بر این، با توجه به شکل‌های ۶ تا ۹، مرزخانه‌ها در ریزساختار نمونه‌ها به‌راحتی قابل مشاهده نبودند و نمونه دارای تقویت‌کننده، ریزدانه‌تر از نمونه‌ی بدون تقویت‌کننده بود [۱۵]. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نیز میزان تخلخل بالا در نمونه‌های تولیدی به روش پرس-زینتر به‌خوبی مشاهده شد. به‌علاوه، در این تصاویر نیز به‌وضوح مشاهده گردید که نمونه‌ی دارای تقویت‌کننده‌ی B4C از نمونه‌ی بدون تقویت‌کننده ریزدانه‌تر بود [۱۶].

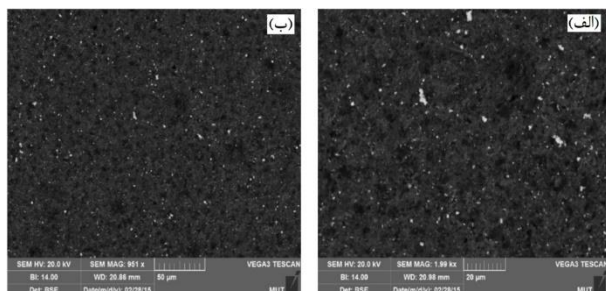


شکل ۸: تصویر میکروسکوپ نوری نمونه Al-3%B4C ساخته شده به روش اکستروژن، عمود بر جهت اکستروژن

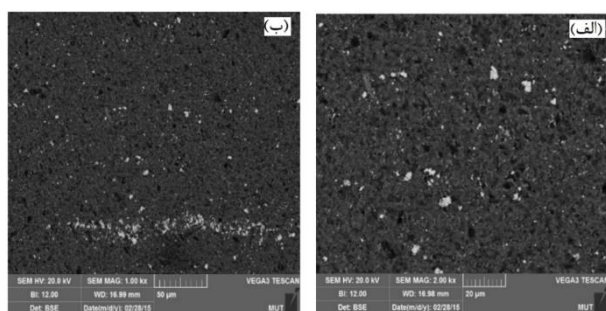


شکل ۹: تصویر میکروسکوپ نوری نمونه Al-3%B4C ساخته شده به روش اکستروژن، موازی جهت اکستروژن

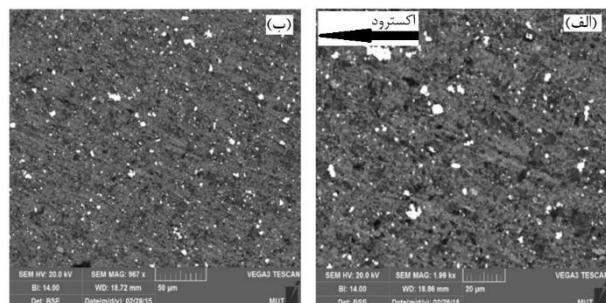
پس از انجام عملیات اکستروژن به مراتب کمتر از نمونه‌های پرس-زینتر شده است [۱۸].



شکل ۱۵: ریزساختار SEM نمونه‌ی Al-Mill ساخته‌شده به روش پرس-زینتر، موازی برجهت پرس-زینتر در دو بزرگنمایی X1000 و X2000

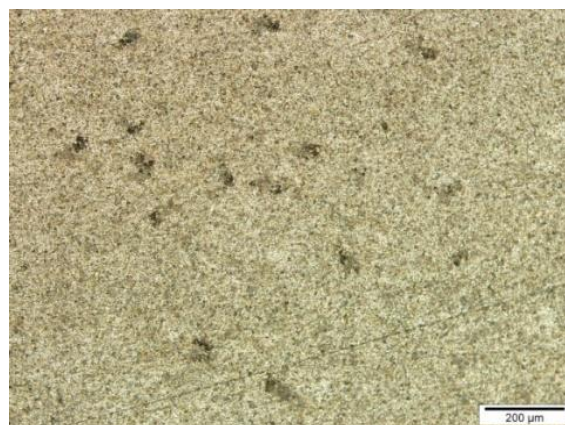


شکل ۱۶: ریزساختار SEM نمونه‌ی Al-Mill ساخته‌شده به روش اکستروژن، عمود جهت اکستروژن در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000



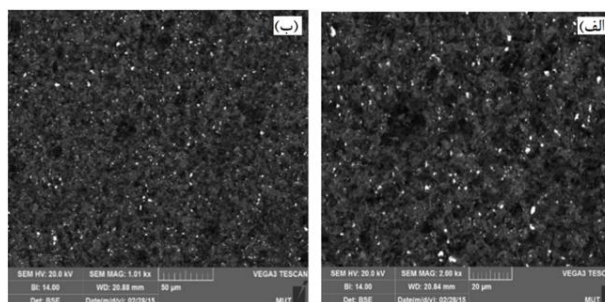
شکل ۱۷: ریزساختار SEM نمونه‌ی Al-Mill ساخته‌شده به روش اکستروژن، موازی با جهت اکستروژن در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ تصاویر مربوط به نمونه‌هایی با ۳٪ وزنی B₄C به‌عنوان فاز تقویت‌کننده قابل مشاهده است. این نمونه‌ها نیز پس از عملیات آسیا کاری تحت عملیات پرس-زینتر قرار گرفته‌اند. برای بررسی بهتر آنالیز کمی عنصری EDS نیز در ادامه ارائه شده است. لکه‌های سفیدرنگ موجود در تصاویر نیز حضور فازهای غنی از آهن را تأیید کرده است. این فازها در اثر ساییدگی گلوله‌های فلزی در حین آسیا کاری به پودرها اضافه شده‌اند [۱۹].



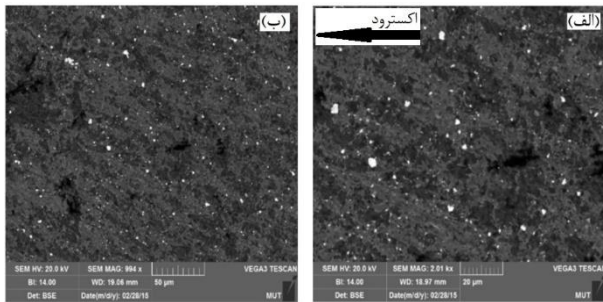
شکل ۱۳: تصویر میکروسکوپ نوری نمونه Al-3%B₄C ساخته‌شده به روش پرس-زینتر، در جهت فشار

تصاویر SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی) نمونه‌های Al-Mill و Al-3%B₄C در دو راستای موازی و عمود برجهت اکستروژن و موازی و عمود برجهت پرس-زینتر به ترتیب در شکل‌های ۱۴ تا ۲۱ آورده شده است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های بدون فاز تقویت‌کننده آمده است. این نمونه‌ها پس از آسیا کاری تحت عملیات پرس-زینتر قرار گرفته‌اند که شکل ۱۴ مربوط به سطوح عمود بر فشار و شکل ۱۵ در جهت فشار اعمالی است. همان‌طور که مشخص است، نمونه‌ها پس از اعمال فشار دارای تخلخل کمی بوده و اعمال فشار موجب از بین رفتن تخلخل‌ها شده است. همچنین میزان تخلخل‌ها در جهت فشار اعمالی به میزان بیشتری از بین رفته‌اند [۱۷].

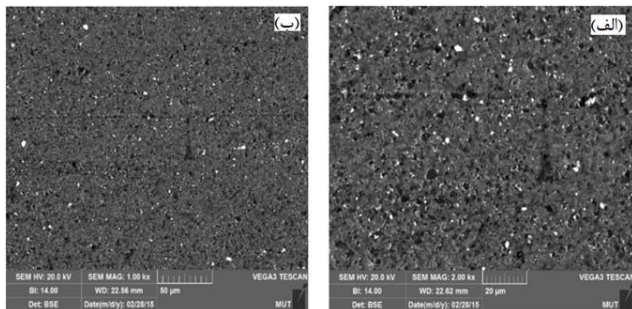


شکل ۱۴: ریزساختار SEM نمونه‌ی Al-Mill ساخته‌شده به روش پرس-زینتر، عمود جهت پرس-زینتر در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000

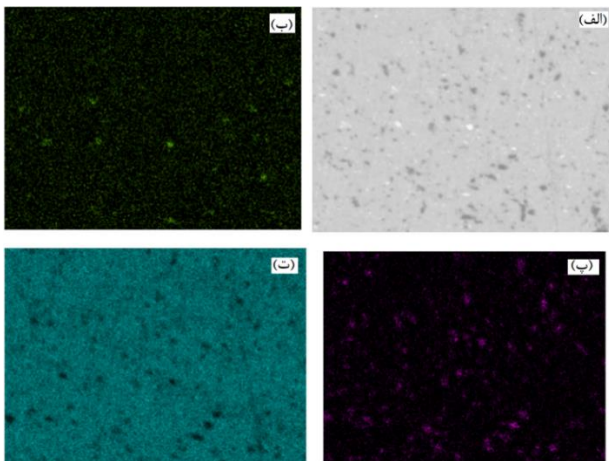
در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های بدون فاز تقویت‌کننده آمده است. این نمونه‌ها پس از آسیا کاری تحت عملیات اکستروژن داغ قرار گرفته‌اند که شکل ۱۶ مربوط به سطوح عمود بر اکستروژن و شکل ۱۷ در جهت عملیات اکستروژن است. با توجه به شکل ۱۷ کشیدگی دانه‌ها در جهت اعمال اکستروژن قابل‌رؤیت است که می‌توان استنباط نمود میزان تخلخل‌های باقیمانده



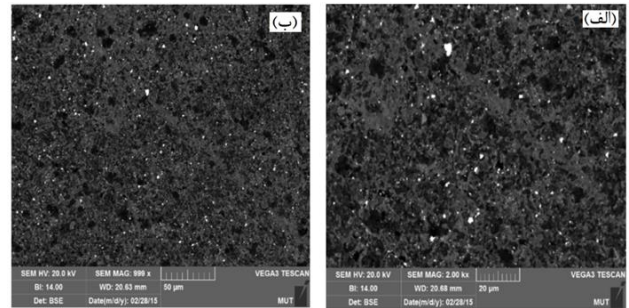
شکل ۲۰: ریزساختار SEM نمونهی Al-3%B4C ساخته شده به روش اکستروژن، موازی برجتهت اکستروژن در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000



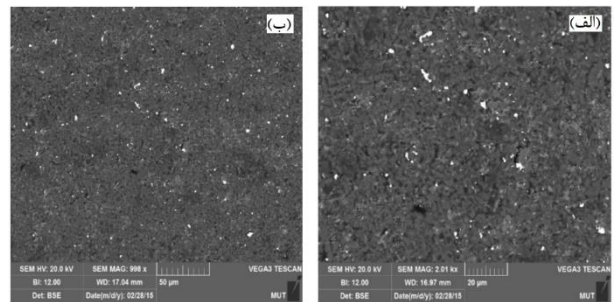
شکل ۲۱: ریزساختار SEM نمونهی Al-3%B4C ساخته شده به روش اکستروژن، عمود جهتهت اکستروژن در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000



شکل ۲۲: اسکن سطحی از تصویر مورفولوژی سطحی به دست آمده از تصویر الکترونی ثانویه در SEM مربوط به ماده نمونه Al-3%B4C (الف) کربن (ب) آهن (پ) برم (ت) آلومینیوم



شکل ۱۸: ریزساختار SEM نمونهی Al-3%B4C ساخته شده به روش پرس-زینتر، عمود جهتهت پرس-زینتر در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000



شکل ۱۹: ریزساختار SEM نمونهی Al-3%B4C ساخته شده به روش پرس-زینتر، موازی برجتهت پرس-زینتر در دو بزرگنمایی (الف) X2000 و (ب) X1000

در شکل های ۲۰ و ۲۱ تصاویر مربوط به نمونه های با ۳٪ وزنی تقویت کننده آمده است که نمونه ها پس از فرایند آسیا کاری تحت عملیات اکستروژن داغ قرار گرفته اند. در نمونه های نشان داده شده در شکل های ۲۰ و ۲۱ اثر عملیات اکستروژن بر ک شیدگی دلنه ها قابل مشاهده است که نشان داد میزان تخلخل نیز با انجام این عملیات کاهش یافته است [۲۰].

در شکل های ۲۲ و ۲۳ به ترتیب آنالیز EDS سطحی و نقطه ای از سطح نمونه Al-3%B4C تولید شده به روش اکستروژن ارائه شده است. با توجه به آنالیز EDS گرفته شده از سطح نمونه، می توان توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات تقویت کننده را مشاهده کرد. وجود ذرات غنی از آهن که در حین پروسه آسیا سازی وارد پودر شده اند نیز قابل اثبات است. در آنالیز نقطه ای مربوط به ذرات موجود در مورفولوژی سطحی، نقاط سفید رنگ فازهای رسوب داده شده در حین اکستروژن است که در نتیجهی قرارگیری آلیاژ Al5083 در دمای بالا در حین عملیات اکستروژن و سرد شدن در هوا پس از اکستروژن تشکیل شده است. این نقاط فاز بین فلزی غیر قابل عملیات حرارت پذیر $Al_6(Mn,Fe)$ تشخیص داده شده است [۲۱].

منجر به کاهش انسجام ساختاری و کاهش استحکام کششی نهایی شود. در مجموع، میزان و توزیع ذرات تقویت کننده B₄C به طور مستقیم بر روی رفتار مکانیکی، انسجام دانه‌ها و مقاومت به سایش تأثیر گذار است.

۳-۳- نتایج آزمون فشار گرم

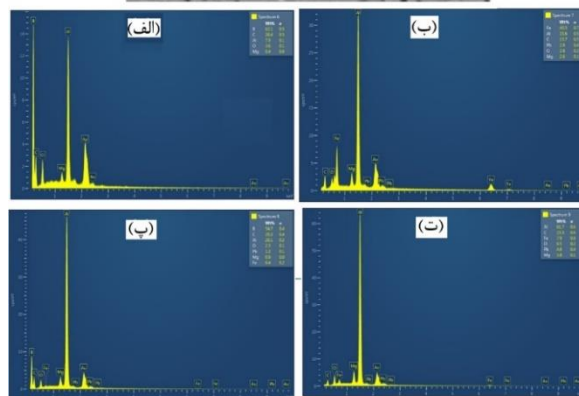
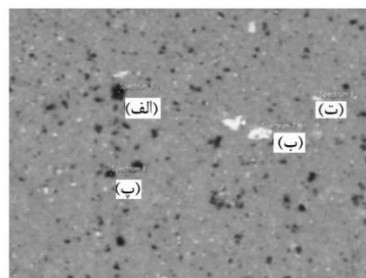
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای دما، نرخ کرنش، اثر تقویت کننده و روش ساخت بر منحنی‌های تنش سیلان Al5083، آزمون فشار گرم در دماهای ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و در نرخ کرنش ۰/۱ و ۰/۱ بر روی نمونه‌ها انجام شده است. پارامترهای بررسی شده علاوه بر دما و نرخ کرنش شامل نمونه‌های بدون تقویت کننده، تقویت کننده با ۳ و ۵ درصد B₄C بود که به دو روش اکستروژن و پرس-زینتر ساخته شده بودند. با توجه به منحنی‌های حاصل از آزمون فشار گرم می‌توان گفت افزایش مقدار تنش سیلان در ابتدای تغییر شکل، حاصل افزایش چگالی نابجایی‌ها است [۲۲] در حین تغییر شکل پلاستیک سه حالت وجود دارد: کاهش تنش سیلان بعد از نمایان شدن تنش پیک که نشان دهنده‌ی غلبه‌ی فرآیندهای کار نرمی بر کار سختی است. دومین حالت بروز تنش پیک و صاف شدن نمودار پس از آن است که نشان دهنده تعادل در فرآیندهای کار سختی و کار نرمی است و در حالت سوم که در آن نمودار به صورت صعودی شروع به بالا رفتن کرده که بیانگر غالب بودن فرآیندهای کار سختی بر کار نرمی است. به طور کلی یک نمونه در حین آزمون فشار گرم می‌تواند متأثر از فرآیندهای کار نرمی و کار سختی به صورت هم‌زمان باشد ولی در انتها شکل منحنی، وابسته به فرآیند غالبی است که در نمونه اتفاق می‌افتد [۲۳].

۳-۳-۱- تأثیر دما بر منحنی‌های سیلان

همان‌طور که در منحنی‌های تنش-کرنش مشاهده شد (شکل ۲۴ تا ۲۹) با ازدیاد دما، منحنی‌ها به سطوح پایین‌تر منتقل شده‌اند. لازم به ذکر است که مقدار تنش بیشینه و کرنش متناظر با آن هم با افزایش دما، کاهش یافته است. یعنی در نرخ کرنش ثابت، درصد تقویت کننده یکسان و روش ساخت مشابه تحت تأثیر افزایش دما، کاهش تنش تسلیم سیلان مشاهده شده است [۲۴].

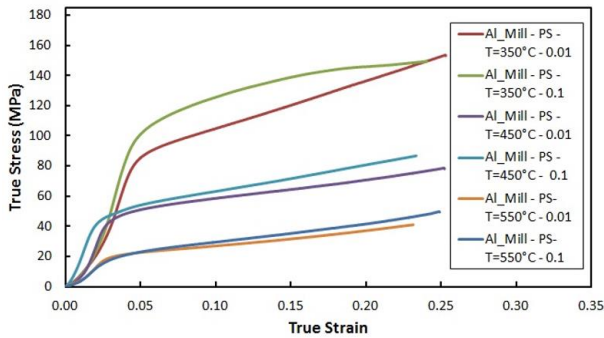
۳-۳-۲- تأثیر نرخ کرنش بر منحنی‌های سیلان

در مقایسه‌ی سطوح منحنی‌های مختلف دیده شد که با افزایش نرخ کرنش، منحنی‌ها به سطوح بالاتر (افزایش تنش تسلیم) منتقل شده‌اند.

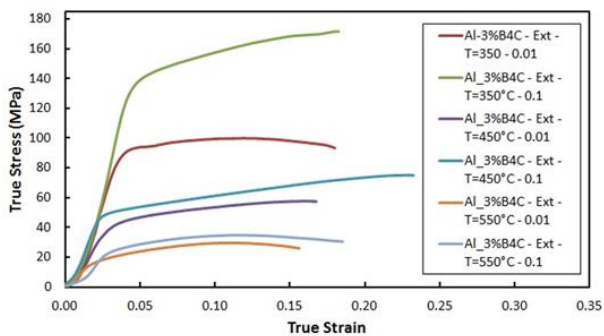


شکل ۲۳: اسکن نقطه‌ای از ذرات قابل مشاهده در تصویر مورفولوژی سطحی به دست آمده از تصویر الکترونی ثانویه در SEM در ۴ ناحیه مختلف

در بررسی میکروسکوپی ریزساختار سه نمونه پودر آلومینیوم ۵۰۸۳ خالص، Al-3%B₄C و Al-5%B₄C که به روش اکستروژن و پرس-زینتر تولید شده‌اند، تفاوت‌های بارزی در رفتار فازهای مختلف و تعامل زمینه و تقویت کننده مشاهده شد. در نمونه آلومینیوم ۵۰۸۳ خالص بدون تقویت کننده، دانه‌ها پس از فرآیند آسیا کاری ریزتر و همگن‌تر شده‌اند که این کاهش اندازه دانه‌ها به دلیل افزایش نرخ جوانه‌زنی حین زینترینگ است. در نمونه Al-3%B₄C، ذرات B₄C به طور نسبت یکنواختی در زمینه آلومینیومی توزیع شده‌اند و مرزهای دانه‌ها تحت تأثیر ذرات کاربید بورون قرار گرفته‌اند که موجب بهبود توزیع تنش و کاهش تمایل به رشد دانه‌ها شده است. این فازها به عنوان نقاط تمرکز کرنش در طی فرآیندهای ترمومکانیکی عمل کردند. از طرفی، در نمونه Al-5%B₄C، به دلیل درصد بالاتر B₄C، تجمع ذرات تقویت کننده بیشتر و تشکیل خوشه‌هایی در ساختار مشاهده شد؛ این خوشه‌ها می‌توانند به عنوان مناطق تمرکز تنش عمل کنند و در نتیجه باعث افزایش احتمال ایجاد ریزترک‌ها در حین فشار اکستروژن شوند. همچنین، در مرزهای مشترک بین زمینه آلومینیومی و ذرات B₄C در نمونه‌های حاوی تقویت کننده، جدایش جزئی و منافذی در سطح نانو به چشم می‌خورد که به علت عدم ترشوندگی کامل ذرات B₄C توسط مذاب آلومینیوم حین زینترینگ ایجاد شده است. این پدیده در نمونه Al-5%B₄C بیشتر مشهود است و می‌تواند

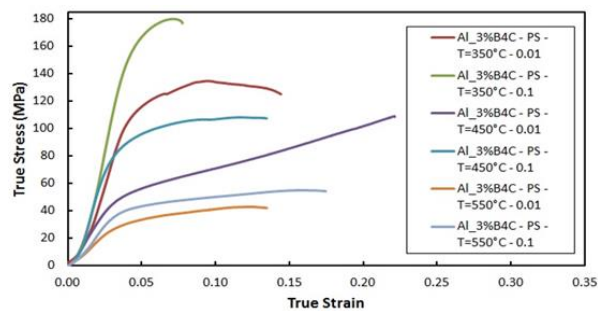


شکل ۲۵: نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ ساخته شده به روش پرس-زینتر



شکل ۲۶: نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم برای Al-3%B4C ساخته شده به روش اکستروژن

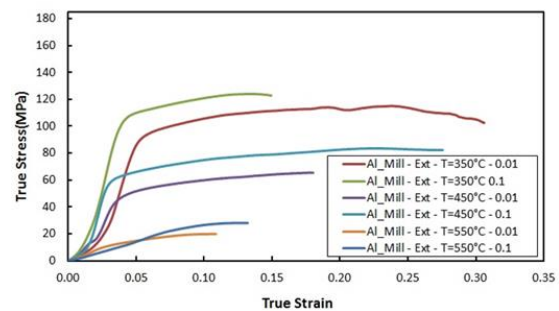
در شکل ۲۷ نمودارهای تنش-کرنش آلومینیوم آسیا شده همراه با سه درصد فاز تقویت کننده (به روش پرس-زینتر) ارائه شده است. در این مورد هم رفتاری مشابه نمونه‌های تولید شده به روش اکستروژن در تغییرات دما و تفاوت در نرخ کرنش را مشاهده شد. این بدان معناست که با افزایش دما، سطوح نمودار کاهش و با افزایش نرخ کرنش سطوح نمودار افزایش پیدا کرده است [۲۸].



شکل ۲۷: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم برای Al-3%B4C ساخته شده به روش پرس-زینتر

شکل ۲۸ مربوط به نمونه‌های آلومینیوم آسیا شده با پنج درصد وزنی فاز تقویت کننده‌ی، تولید شده به روش اکستروژن در دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت است. همین‌طور که مشاهده شد،

همچنین مقدار تنش بیشینه و کرنش متناظر با آن نیز افزایش یافته است. به عبارتی در دما یکسان، درصد تقویت کننده مشابه و روش ساخت ثابت تحت تأثیر افزایش نرخ کرنش، افزایش تنش سیلان دیده شده است. در شکل ۲۴ نمودارهای تنش-کرنش آلومینیوم آسیا شده را که به روش اکستروژن ساخته شده‌اند، در دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای موجود در شکل مشخص است، با افزایش دما از 350°C به 550°C منحنی‌های سیلان به سطوح پایین تری منتقل شده‌اند. علاوه بر این با افزایش نرخ کرنش منحنی‌های سیلان در سطوح بالاتری قرار دارند. می‌توان گفت در دمای 550°C ، نرخ کرنش تأثیر کمتری در تغییر مساحت زیر نمودار تنش-کرنش نسبت به دماهای پایین تر دارد [۲۵ و ۲۶].



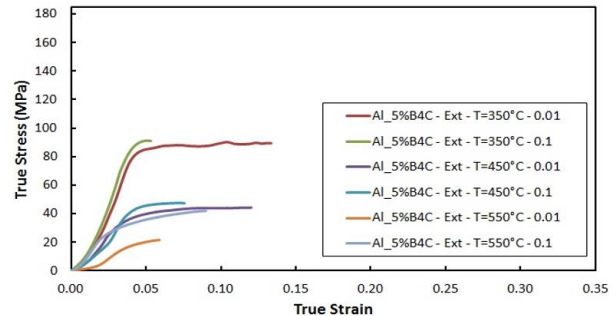
شکل ۲۴: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ آسیا شده ساخته شده به روش پرس-زینتر

در شکل ۲۵ نمودارهای تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم آسیا شده به روش پرس-زینتر ساخته شده‌اند در دماها و نرخ کرنشی مختلف نشان داده شده است. گراف‌های مربوط به حالت ساخت پرس-زینتر نیز نتایج مشابه حالت ساخت اکستروژنی را تأیید کردند. در این گراف‌ها با افزایش دما، کاهش در سطح منحنی‌های سیلان و با افزایش نرخ کرنش، افزایش در سطح منحنی‌های سیلان مشاهده و علاوه بر این با افزایش دما تأثیر افزایش نرخ کرنش بر تغییر تنش تسلیم، کمتر شد [۲۷].

شکل ۲۶ مربوط به نمونه‌های آلومینیوم همراه با سه درصد فاز تقویت کننده‌ی B_4C ، ساخته شده به روش اکستروژن است که در دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت مورد آزمون فشار گرم قرار گرفته‌اند. در این نمودارها نیز می‌توان میزان کاهش سطح منحنی‌های سیلان را با افزایش دما به خوبی مشاهده کرد. در مورد نرخ کرنش نیز می‌توان گفت که با افزایش نرخ کرنش انتقال سطوح منحنی‌های سیلان به سمت بالا اتفاق افتاده است. همچنین افزایش نرخ کرنش در دماهای بالا تأثیر کمتری در بالا بردن سطوح نمودار داشته است [۲۸].

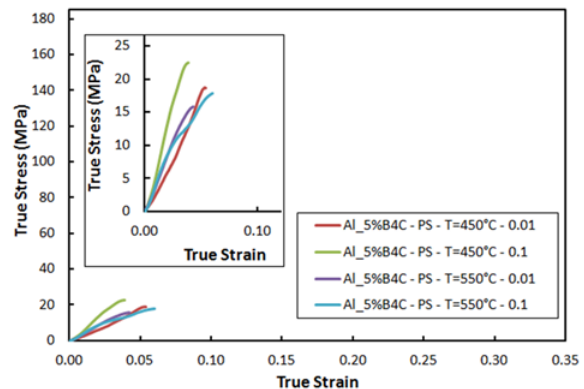
در سطح پایین‌تر از سطح منحنی‌های ساخته‌شده به روش پرس-زینتر قرار گرفت. علت این امر همگن بودن نمونه‌های اکستروژنی و بالا بودن دانسیته آن‌ها و در نتیجه کم بودن درصد تخلخل آن‌ها نسبت به نمونه‌های پرس-زینتری است. به عبارت دیگر در نمونه‌های با تخلخل بالا، مکانیزم سخت شدن ناشی از افزایش دانسیته، مکانیزم غالب بوده و منجر به بالا رفتن سطح منحنی‌های تنش-کرنش شده است. در شکل ۳۰ نمودار تنش-کرنش در شرایط دمایی یکسان و نرخ کرنش مشابه رسم شده است. همان‌طور که مشاهده شد در نمونه‌های ساخته‌شده به روش اکستروژن با اضافه کردن و افزایش درصد تقویت‌کننده، مساحت زیر نمودار تنش-کرنش کاهش یافته است. تبلور مجدد دینامیکی یک فرآیند متالورژیکی تابع زمان و دما است، به عبارتی هرچه زمان بیشتر و دما بالاتر باشد، تبلور مجدد با نرخ بالاتری انجام می‌شود. در تبلور مجدد دینامیکی که با توجه به بررسی‌های محققین دیگر در این آلیاژ رخ می‌دهد احتمال سه اتفاق وجود دارد: الف) تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته که مکانیزم آن با جوانه‌زنی و رشد همراه است. ب) تبلور مجدد دینامیکی پیوسته که از تبدیل مرز دانه‌های زاویه کوچک به زاویه بزرگ تشکیل شده است و ج) تبلور مجدد دینامیکی هندسی که از شکسته شدن دانه‌های اولیه ایجاد شود. از آنجایی که وجود ذرات تقویت‌کننده باعث ریزدانه شدن آلیاژ می‌گردد، به دلیل اندازه کوچک دانه‌های اولیه در نمونه‌های اکستروژن شده، نیروی محرکه بالایی برای رشد دانه در دماهای بالا به منظور کاهش انرژی سطحی وجود دارد. به عبارت دیگر با افزایش فاز تقویت‌کننده، ریزدانه شدن در آلیاژ با نسبت بالاتری اتفاق می‌افتد و با توجه به مطالب ذکر شده قبلی، تنش تسلیم نمودار پایین می‌آید. این بدان معناست که کسر حجمی تقویت‌کننده به صورت غیرمستقیم (با توجه به تأثیر در ریزدانه کردن آلیاژ) بر فرآیند تبلور مجدد اثرگذار است و با افزایش کسر حجمی، تنش تسلیم نمودار کاهش یافته است. به عبارت ساده‌تر تغییر فرم به نیروی کمتری نیاز دارد. از طرفی در نمونه‌های ساخته‌شده به وسیله پرس-زینتر نیز مکانیزم‌های ذکر شده، اتفاق می‌افتد اما احتمال دارد مکانیزم سخت-شوندگی ناشی از افزایش دانسیته مکانیزم غالب باشد. در شکل ۳۰ مقایسه دو حالت ساخت اکستروژن و پرس-زینتر در شرایطی که میزان تقویت‌کننده یکسان ارائه شده است. نمودارها در حالتی که روش ساخت به صورت پرس-زینتر بوده است در مکان‌های بالاتری قرار گرفته‌اند که احتمال می‌رود، اثر سخت شدن ناشی از افزایش دانسیته علت اصلی آن بوده باشد [۲۹].

در این نمونه‌ها نیز افزایش دما باعث کاهش سطوح منحنی‌های تنش سیلان و افزایش نرخ کرنش سبب افزایش سطوح منحنی-های تنش سیلان شده است [۲۸].



شکل ۲۸: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم برای Al-5%B₄C ساخته‌شده به روش اکستروژن

با مقایسه‌ی شکل ۲۶ با ۲۸ می‌توان دریافت که نمونه‌های با درصد تقویت‌کننده‌ی بیشتر میزان تنش اعمالی کمتری را تحمل کرده‌اند. اثبات شد که مقاومت به تغییر فرم با عدم پیوستگی فصل مشترک ذرات سخت تقویت‌کننده و زمینه نرم آلومینیوم کاهش یافته است. علت این امر آن است که این عدم پیوستگی می‌تواند مکان‌های مناسبی برای جوانه‌زنی ترک باشد، از این رو با توجه به توضیحات داده‌شده احتمال ایجاد ترک با افزایش فاز سخت B₄C افزایش یافته است. در شکل ۲۹ نمودارهای تنش-کرنش آلومینیوم آسیا شده با پنج درصد وزنی فاز تقویت‌کننده که به روش پرس-زینتر ساخته شده‌اند، در دماها و نرخ کرنش مختلف ارائه شده است [۲۸].

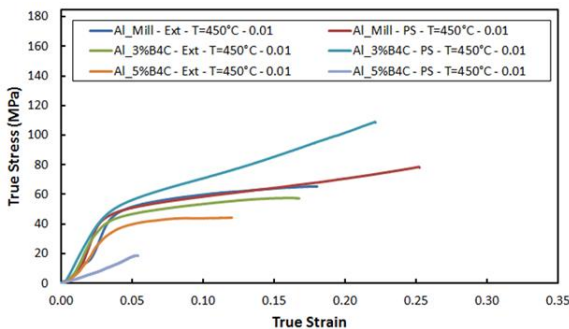


شکل ۲۹: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم برای Al-5%B₄C ساخته‌شده به روش پرس-زینتر

۳-۳-۳- تأثیر روش ساخت بر منحنی‌های سیلان

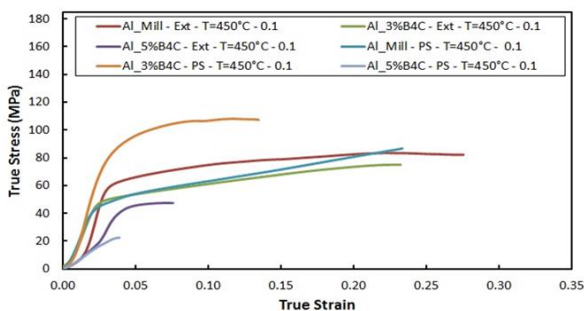
با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش (شکل ۳۰ تا ۳۵) در شرایطی که دما یکسان، نرخ کرنش مشابه و درصد تقویت‌کننده ثابت در نظر گرفته‌شده، سطوح منحنی نمونه‌های ساخته‌شده به روش اکستروژن

پایین تبدیل مرزهای زاویه کوچک به مرزهای زاویه بزرگ صورت گرفته است (تبلور مجدد دینامیکی پیوسته). این بدین معنی است که به علت رشد دانه‌ها در آلیاژ، حرکت نابجایی‌ها آسان‌تر بوده و در نتیجه تغییر فرم در تنش کمتر اتفاق افتاده است. انطباق نتایج شکل ۳۲ با نمودار شکل ۳۰ نشان داد که در نمونه‌های ساخته شده به روش پرس-زینتر، بالاتر بودن تنش تسلیم نمودار نمونه‌ی دارای تقویت‌کننده را می‌توان مربوط به اثر ذرات تقویت‌کننده در قفل کردن نابجایی‌ها دانست. با مقایسه دو روش ساخت در میزان درصد فاز تقویت‌کننده مشابه، مساحت زیر نمودار چقرمگی نمونه ساخته‌شده به روش پرس-زینتر بالاتر از مساحت زیر نمودار چقرمگی نمونه ساخته شده به روش اکستروژن بود که علت این امر را می‌توان با در نظر گرفتن میزان تخلخل موجود در آن‌ها و بررسی حالات مشابه ذکر شده توجیه کرد [۳۰].

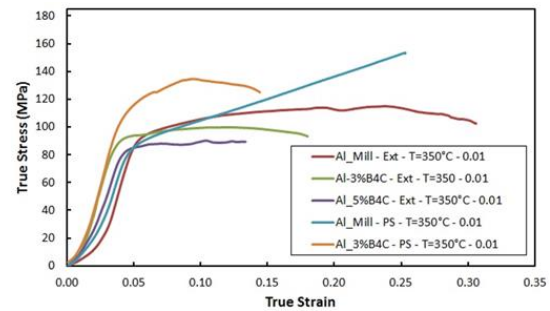


شکل ۳۲: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱

شکل ۳۳ در دما و نرخ کرنش ثابت رسم شده است. همان‌طور که مشاهده شد در نمونه‌های ساخته‌شده به روش اکستروژن با اضافه کردن و افزایش درصد تقویت‌کننده مساحت زیر نمودار چقرمگی افزایش یافته است. با مقایسه دو شکل ۳۱ و ۳۳ می‌توان دریافت که سطوح نمودار با نسبت کمتری در شکل ۲۸ افزایش یافته‌اند. علت این امر را می‌توان با توجه به بالاتر بودن دما متوجه شد. هرچه دما بالاتر باشد، سطوح نمودار به سطوح پایین‌تری انتقال یافته است [۳۰].

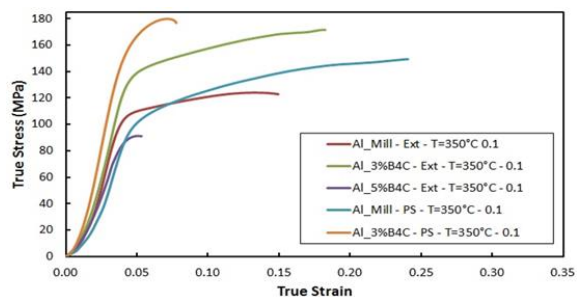


شکل ۳۳: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۱



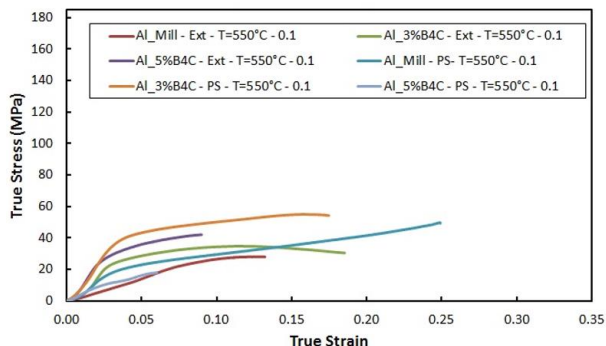
شکل ۳۰: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱

در شکل ۳۱ نمودار تنش-کرنش در شرایط دمای یکسان و نرخ کرنش مشابه رسم شده است. در نمونه‌های ساخته‌شده به روش اکستروژن با اضافه کردن و افزایش درصد تقویت‌کننده، مساحت زیر نمودار تنش-کرنش افزایش یافته است. همان‌طور که گفته شد، فرآیند تبلور مجدد علاوه بر اثر پذیری از دما، تابع زمان نیز بود. تصور بر این است که زمان لازم برای اثرگذاری مطلوب فرآیند تبلور مجدد در اختیار نمونه‌ها قرار نگرفته است لذا با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده سطوح نمودار افزایش یافته است، زیرا ذرات فاز تقویت‌کننده باعث قفل شدن نابجایی‌ها شده است. در مقایسه دو حالت ساخت در درصد تقویت‌کننده‌ی یکسان، مساحت زیر نمودار چقرمگی نمونه ساخته‌شده در حالت پرس-زینتر در مکان بالاتری نسبت به نمونه‌ی ساخته‌شده به روش اکستروژن است. علت این امر را می‌توان وجود درصد تخلخل بالاتر این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده توسط اکستروژن دانست. به عبارتی سخت شدن ناشی از افزایش دانسیته مکانیزم غالب بوده است [۳۰].



شکل ۳۱: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۱

شکل ۳۲ در دما و نرخ کرنش ثابت رسم شده است. در این نمودار نیز، نمونه‌های ساخته‌شده به روش اکستروژن، با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده، سطوح نمودارهای سیلان را به میزان بیشتری کاهش داده‌اند. که با نتایج گرفته‌شده در دمای ۳۵۰ درجه و نرخ کرنش مشابه مطابقت دارد. به عبارتی در تغییر شکل در دمای بالا و نرخ کرنش

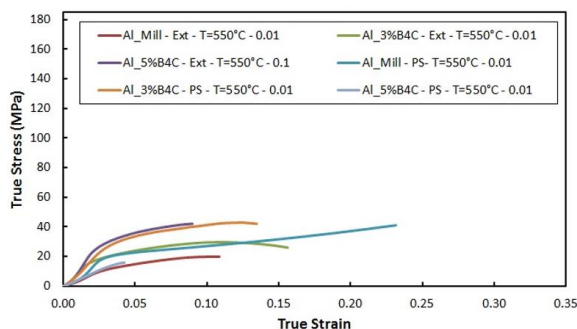


شکل ۳۵: نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۱

۳-۳-۴- تأثیر درصد تقویت‌کننده بر منحنی‌های سیلان

با مقایسه‌ی نمودارهای تنش-کرنش (شکل ۳۶ تا ۴۱) تأثیر ذرات تقویت‌کننده را می‌توان بدین گونه شرح داد که هرچه ذرات تقویت‌کننده ریزتر و نحوه‌ی پخش شدن آن‌ها یکنواخت‌تر باشد، این ذرات به‌صورت مؤثرتری به‌عنوان مانع‌هایی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل کرده و مساحت زیر نمودار چقرمگی بالاتر رفته است. البته خود ذرات تقویت‌کننده می‌توانند به‌عنوان منابع تولید نابجایی‌ها عمل کرده و در نتیجه هرچه تعداد ذرات بیشتر باشد مساحت زیر نمودار چقرمگی بالاتر خواهد رفت. از طرفی این ذرات تقویت‌کننده می‌توانند فرآیند تبلور مجدد را در حالتی غیرمستقیم تسریع بخشند که نتیجه‌ای جز پایین آمدن سطح منحنی‌ها نخواهد داشت و از آنجاکه تبلور مجدد فرآیند متالورژیکی‌ای وابسته به دما و زمان است، با پایین آمدن نرخ کرنش و به‌تبع، زمان بیشتر جهت رسیدن به میزان کرنش مشخص، افت تنش تسلیم در نمودار اتفاق افتاده است. وقتی نرخ کرنش زیاد باشد در نتیجه‌ی آن زمان رسیدن به کرنش مشخص کمتر بوده و مساحت زیر نمودار چقرمگی بالاتر است. در دماهای بالاتر، تبلور مجدد سریع‌تر انجام شده و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک در میزان تنش پایین‌تری اتفاق افتاده و مساحت زیر نمودار چقرمگی‌ها پایین‌تر است. شایان‌ذکر است که در مورد نمونه‌های ساخته‌شده به روش پرس-زینتر عامل سخت شدن ناشی از افزایش دانسیته نیز در محل قرارگیری منحنی‌ها مؤثر است و عامل غالب محسوب می‌شود. در نتیجه هرچه درصد تقویت‌کننده بالاتر و تخلخل بیشتر باشد، ترک در نمونه‌ها قبل از رسیدن به تنش پیک مشاهده شده و شکست نمونه‌ها اتفاق می‌افتد. در شکل ۳۶ نمودارهای مربوط به آلومینیوم بدون تقویت‌کننده همراه با درصد‌های مختلف تقویت‌کننده در دمای یکسان و نرخ کرنش‌های متفاوت که همگی توسط روش اکستروژن تولید شده‌اند مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده شد در نرخ کرنش ۰/۱، با افزایش درصد

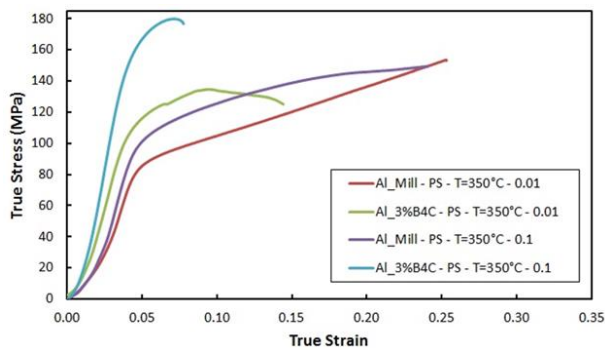
در شکل ۳۴، نمودار نمونه‌های مختلف در دو پارامتر ثابت دما و نرخ کرنش رسم شده است. در نمونه‌های ساخته‌شده به روش اکستروژن با اضافه کردن و افزایش درصد تقویت‌کننده مساحت زیر نمودار چقرمگی افزایش یافته است. در تغییر شکل در دمای بالا تبدیل مرزهای زاویه کوچک به مرزهای زاویه بزرگ صورت گرفته است (تبلور مجدد دینامیکی پیوسته) که رشد دانه‌ها در آلیاژ، باعث حرکت راحت‌تر نابجایی‌ها در نمونه شده و در نتیجه تنش کمتری برای تغییر فرم نیاز خواهد بود. بالا بودن دما تا این حد، می‌تواند فرآیند تبلور مجدد را بدون در نظر گرفتن زمان سریع‌تر نماید. تصور بر این است که تنها ذرات تقویت‌کننده مانع حرکت نابجایی‌ها بوده‌اند و سطوح نمودار تنش سیلان را بالاتر نشان داده است. این مطلب در مورد نمونه‌های ساخته‌شده به روش پرس-زینتر هم صادق است. با مقایسه دو روش ساخت در میزان درصد تقویت‌کننده‌ی یکسان، مساحت زیر نمودار چقرمگی‌های تولیدشده به روش پرس-زینتر بالاتر از سطح نمونه‌های تولیدی به روش اکستروژن است که این امر به میزان تخلخل در نمونه‌ها و افزایش استحکام ناشی از افزایش دانسیته مرتبط است [۳۰].



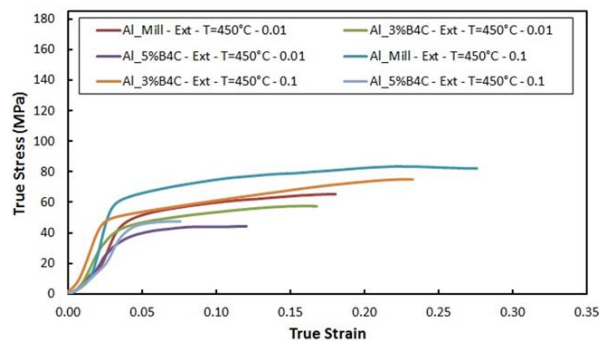
شکل ۳۴: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۱

شکل ۳۵ در دما و نرخ کرنش ثابت رسم شده است. در این نمودار نیز، برای نمونه‌های ساخته‌شده به روش‌های اکستروژن و پرس-زینتر، با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده، سطوح نمودارهای سیلان افزایش یافته است. که در این حالت نیز مانند حالت قبل وجود ذرات تقویت‌کننده باعث بالا رفتن سطوح نمودارهای تنش سیلان شده است. با مقایسه دو روش ساخت در میزان درصد تقویت‌کننده‌ی یکسان، مساحت زیر نمودار چقرمگی‌های تولیدشده به روش پرس-زینتر بالاتر از سطح نمونه‌های تولیدی به روش اکستروژن است که علت آن غالب بودن مکانیزم سخت شدن به‌واسطه‌ی افزایش دانسیته بود [۲۹].

منحنی‌های تنش سیلان بود [۳۰].



شکل ۳۷: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد ساخته‌شده به روش پرس-زینتر

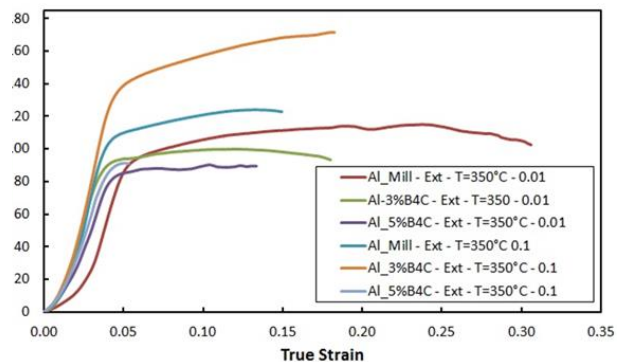


شکل ۳۸: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد ساخته‌شده به روش اکستروژن

در شکل ۳۹ نمودارهای مربوط به آلومینیوم بدون تقویت‌کننده همراه با درصد‌های مختلف تقویت‌کننده در دمای یکسان و نرخ کرنش-های متفاوت که همگی توسط روش پرس-زینتر تولیدشده‌اند نمایش داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، به دلیل وجود تخلخل در نمونه‌های تولیدی به روش پرس-زینتر و افزایش کار سختی ناشی از افزایش دانسیته به واسطه فشار گرم، فرآیند غالب در این نمونه‌ها فرآیند کار سختی است. در مورد نمونه‌های با درصد فاز تقویت‌کننده پنج درصد وجود تخلخل و تردی ناشی از افزایش فاز تقویت‌کننده منجر به بروز ترک و اشاعه آن و جلوگیری از سیلان ماده شده است [۳۰].

در شکل ۴۰ نمودارهای مربوط به آلومینیوم بدون تقویت‌کننده همراه با درصد‌های مختلف تقویت‌کننده در دمای یکسان و نرخ کرنش‌های متفاوت (که همگی توسط روش اکستروژن تولیدشده‌اند) ارائه شده است. همان‌طور که بیان شد در این دما، تبلور مجدد به راحتی اتفاق می‌افتد و عامل کنترل‌کننده برای افزایش یا کاهش در مساحت زیر نمودار چقرمگی‌ها، درصد فاز تقویت‌کننده است و با افزایش این درصد، افزایش در سطح منحنی‌های سیلان رخ داده است. نکته

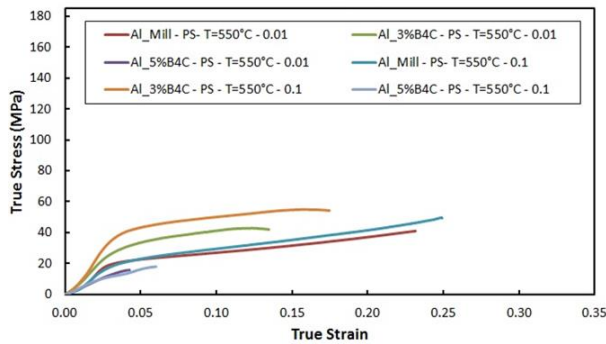
تقویت‌کننده، سطوح نمودار به حالت پایین‌تری منتقل شده‌اند. وجود ذرات تقویت‌کننده باعث ریزدانه شدن آلیاژ گردید. به دلیل اندازه کوچک دانه‌های اولیه در نمونه‌ها برای رشد دانه در دماهای بالا جهت کاهش انرژی سطحی اشتیاق بالایی وجود دارد. در واقع با افزایش فاز تقویت‌کننده و به تبع آن ریزدانه‌گی بیشتر در نمونه‌ها، فرآیند تبلور مجدد راحت‌تر صورت گرفته و با توجه به زمان کافی که در نرخ کرنش پایین به نمونه داده شده است، سطوح نمودارهای سیلان کاهش داشته است. در نرخ کرنش ۰/۱، نیز موارد گفته‌شده اتفاق افتاده است ولی با توجه به زمان کمی که نمونه در اختیار داشته است، فرآیند تبلور مجدد فرصت کافی برای انجام نداشته و افزایش فاز تقویت‌کننده و قفل شدن نابعایی‌ها باعث افزایش در سطح منحنی‌های تنش سیلان شده است [۲۹ و ۳۰].



شکل ۳۶: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد ساخته‌شده به روش اکستروژن

در شکل ۳۷ نمودارهای مربوط به آلومینیوم بدون تقویت‌کننده همراه با نمونه‌های با درصد‌های مختلف تقویت‌کننده در دمای یکسان و نرخ کرنش‌های متفاوت که همگی توسط روش پرس-زینتر تولیدشده‌اند، مورد مقایسه قرار گرفته است. در این نمودارها در کرنش-های متفاوت مکانیزم غالب، سخت شدن به واسطه‌ی افزایش دانسیته می‌باشد و با افزایش درصد ذرات تقویت‌کننده، سطوح نمودار افزایش داشته‌اند [۲۹].

در شکل ۳۸ نمودارهای مربوط به آلومینیوم بدون تقویت‌کننده همراه با درصد‌های مختلف تقویت‌کننده در دمای یکسان و نرخ کرنش‌های متفاوت (که همگی توسط روش اکستروژن تولیدشده‌اند) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده شد در این منحنی‌ها، در نرخ کرنش یکسان، کاهش سطوح نمودار با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده اتفاق افتاده است. همان‌طور که گفته شد وجود ذرات تقویت‌کننده باعث ریزدانه شدن آلیاژ گردید که این امر با توجه به مطالب ذکر شده سرعت فرآیند تبلور مجدد را افزایش داد و نتیجه‌ی آن کاهش در سطح



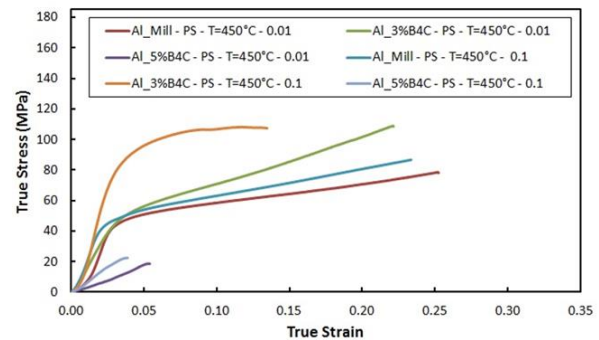
شکل ۳۸: نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد ساخته شده به روش پرس-زینتر

۴- نتیجه گیری

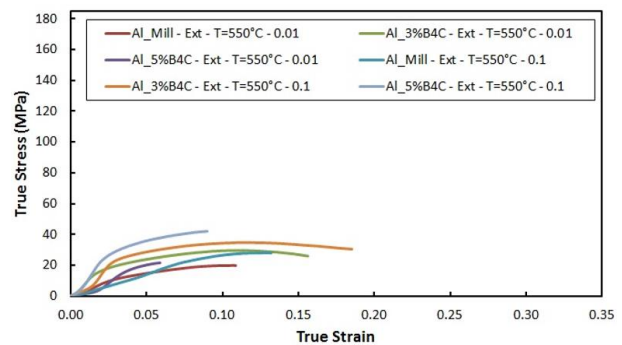
در این پژوهش نانو کامپوزیت زمینه آلیاژ Al5083 تقویت شده با ذرات نانومتری B₄C توسط روش آلیاژسازی مکانیکی تولید شد. دو روش تولید زینتر پودر نانو کامپوزیت به همراه پرس گرم و اکستروژن داغ پودر جهت تولید ماده چگال موردا استفاده قرار گرفت. در هر دو موارد رفتار فشرده پذیری پودرهای نانو کامپوزیت مطالعه شد. ریزساختار ماده چگال نهایی در دمای محیط بررسی شد و رفتار تغییر شکل گرم نمونه ها و مکانیزم های تغییر فرم در دمای بالا در نانو کامپوزیت Al5083-B₄C با آلیاژ نانو ساختار Al5083 مقایسه گردید. نمونه های تغییر فرم داده نیز در انتها مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفتند. اهم نتایج به دست آمده عبارتند از:

- مکانیزم های جوش سرد و شکست ذرات پودر در حین آسیا مکانیکی در حضور تقویت کننده B₄C تسریع شده و زمان مورد نیاز برای آسیا پودر در حضور ذرات تقویت کننده کاهش یافت. می توان نتیجه گرفت که با افزایش سینتیک ریز شدن اندازه دانه ها، میزان کرنش ایجاد شده در شبکه نیز افزایش یافته است.
- کامپوزیت های Al-B₄C تولید شده از طریق آلیاژسازی مکانیکی و پرس-زینتر به طور معناداری خواص ترمومکانیکی بهتری نسبت به آلومینیوم خالص دارند. این بهبود خواص به دلیل توزیع یکنواخت و همگن نانو ذرات B₄C در ماتریس آلومینیوم است.
- تنش سیلان بالاتری برای نانو کامپوزیت های Al5083-B₄C نسبت به آلیاژهای نانو ساختار Al5083 در دماهای بالای تغییر شکل به دست آمد که بیانگر اثر مؤثر ذرات نانومتری B₄C در

قابل توجه در نمودار پایین تر بودن سطح منحنی نمودار ۵ درصد B₄C نسبت به نمودار ۳ درصد B₄C است که احتمال می رود، ناشی از اثر همزمان دما و زمان و در نتیجه میزان بیشتر تبلور مجدد بوده باشد [۳۰].



شکل ۳۹: نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد ساخته شده به روش پرس-زینتر



شکل ۴۰: نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد ساخته شده به روش اکستروژن

شکل ۴۱ نمودارهای مربوط به آلومینیوم بدون تقویت کننده و همراه با درصد های مختلف تقویت کننده در دمای یکسان و نرخ کرنش های متفاوت که همگی توسط روش پرس-زینتر تولید شده اند را نشان می دهد. در این منحنی ها نیز در نرخ کرنش یکسان، با افزایش درصد فاز تقویت کننده، افزایش را در مساحت زیر نمودار چقرمگی های تنش سیلان شاهد هستیم. با توجه به نمودار، فرآیندهای کار سختی بر کار نرمی غلبه کرده اند که پیش بینی می شود علت این امر نیز سخت شدن ناشی از افزایش دانسیته بوده باشد [۲۹].

- Engineering: A, Vol. 740, pp. 1-11, DOI: 10.1016/j.msea.2018.06.052, 2018.
- [5] Kumar, R., et al., "Improvement of Thermomechanical Properties of Al5083/SiC Nanocomposites via Isostatic Pressing," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 855, pp. 157-165, DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.162817, 2021.
- [6] Wang, X., et al., "Effect of Extrusion Ratio on the Mechanical Properties of Al2024/SiC Composites," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 791, pp. 139-146, DOI: 10.1016/j.msea.2020.139130, 2020.
- [7] Suryanarayana, C., Al-Aqeeli, N., "Mechanically alloyed nanocomposites," *Progress in Materials Science*, Vol. 58, pp. 383-502, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2012.10.001, 2023.
- [8] Suresh, S., Vasudevan, M., "Effect of B4C Reinforcement on the Mechanical Properties of Al Composites," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 43, pp. 2345-2352, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.345, 2022.
- [9] Kumar, S., Balaji, A., "Characterization of Al/B4C Composites Synthesized by Mechanical Alloying," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 878, pp. 160512, DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.160512, 2023.
- [10] Sahoo, S.K., Mishra, S.C., "Investigation of Al-B4C Composites for High Temperature Applications," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, pp. 6734-6741, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.030, 2024.
- [11] Zhu, Y., Hu, C., "Thermomechanical and Microstructural Properties of Al-B4C Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 187, pp. 107878, DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107878, 2024.
- [12] Zhao, H., Chen, X., "Microstructural and Wear Properties of Al-B4C Composites," *Materials & Design*, Vol. 196, pp. 109057, DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109057, 2023.
- [13] Sahoo, S.K., Mishra, S.C., "Investigation of Al-B4C Composites for High Temperature Applications," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, pp. 6734-6741, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.030, 2024.
- کفل کردن نابجایی‌ها و افزایش تنش سیلان در حین تغییر شکل داغ است.
- نمونه‌های تولید شده به روش اکستروژن به‌طور مداوم تنش جریان کمتری نسبت به نمونه‌های تولید شده به روش پرس-زینتر نشان داد. این امر به دلیل چگالی بالاتر و همگنی بیشتر نمونه‌های اکستروژن و تخلخل کمتر آنها است.
 - افزایش کسری حجم تقویت‌کننده B₄C باعث کاهش سطوح تنش جریان در هر دو نوع نمونه‌های Al-3% B₄C و Al-5% B₄C شد. این کاهش ناشی از شرایط مناسب برای آغاز ترک به دلیل عدم پیوستگی در محل تماس بین ذرات تقویت‌کننده B₄C و ماتریس نرم Al است.
 - با استناد به آنالیز میکروسکوپی الکترونی روبشی و همچنین میکروسکوپی نوری می‌توان دریافت ذرات تقویت‌کننده دارای پخش شونده‌گی بهتری در روش ساخت با اکستروژن نسبت به حالت پرس-زینتر هستند.
 - وجود ذرات تقویت‌کننده تأثیر مثبتی بر مکانیزم‌های بازکریستالی‌سازی دارد و موجب ریزساختار دانه‌ای بهتر شد. این امر به بهبود مهاجرت مرز دانه‌ها و تسهیل حرکت شکستگی‌ها در دماهای بالا منجر شد.
 - با قرار گرفتن آلیاژ Al5083 در دمای بالا در حین اکستروژن و سپس سرد شدن در دمای محیط فاز غیرقابل عملیات حرارت پذیر Al₆(Fe,Mn) ایجاد شد.
- ۵- منابع**
- [1] Maratian, M., Jalali, M., "Metal Matrix Composites," *University Jihad, Isfahan University of Technology*, 2008.
- [2] Chawla, K.K., "Fibrous Materials," *Cambridge University Press, Cambridge*, 1998.
- [3] Rosso, M., "Ceramic and Metal Matrix Composite: Routes and Properties," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, pp. 364-375, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.01.019, 2006.
- [4] Chen, L., et al., "Hot Pressing Effects on the Microstructure and Cohesion of Al5083/B4C Nanocomposites," *Materials Science and*

- [23] R. S. et al., "Analysis of the flow behavior of aluminum during hot deformation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 195, pp. 101-106, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.067, 2007.
- [24] A.R. et al., "Influence of temperature on flow stress of Al alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 488, pp. 412-417, DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.06.047, 2009.
- [25] M. T. et al., "Hot working of aluminum alloys: Influence of processing parameters," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 537, pp. 172-177, DOI: 10.1016/j.msea.2012.02.028, 2012.
- [26] S. C. et al., "Deformation characteristics of aluminum alloys during hot pressing," *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, Vol. 22, pp. 183-190, DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.02.007, 2013.
- [27] Chen, Y. et al., "Effects of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Aluminum Composites," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, No. 28, pp. 7947-7953, DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.04.017, 2011.
- [28] Kumar, A. et al., "The Influence of B₄C on Mechanical Properties of Aluminum Composites During Extrusion," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 500, No. 1-2, pp. 43-48, DOI: 10.1016/j.msea.2009.10.024, 2010.
- [29] Donato, J.B., "The Role of Density and Pore Structure in Mechanical Properties of Metal Matrix Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 42, No. 3, pp. 267-284, DOI: 10.1177/0021998307081554, 2008.
- [30] Heimann, R.B. et al., "Effects of Reinforcement on the Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composites," *Composite Structures*, Vol. 92, No. 4, pp. 979-988, DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.07.005, 2010.
- and Technology, Vol. 9, pp. 6734-6741, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.030, 2020.
- [14] Hajjari, M., Divandari, A., Mirhabibi, R., "The Study of Electroless Coating of Nickel on Carbon Fibers," *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 1, pp. 43-48, 2004.
- [15] Kainer, K.A., "Basics of Metal Matrix Composites," John Wiley & Sons, 2006.
- [16] Mazahery, A., Shabani, M.O., "Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 22, No. 4, pp. 2072-2079, DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61358-7, 2012.
- [17] De Cicco, M.T., Delfino, S., Vergani, L., "Fatigue behavior of hybrid MMCs reinforced with ceramic particulates and metal fibers," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 480, pp. 161-171, DOI: 10.1016/j.msea.2007.07.029, 2008.
- [18] Huang, Y., Ma, T., Wu, X., "Microstructural Changes in Aluminum Composites During Hot Extrusion," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 503, pp. 77-83, DOI: 10.1016/j.msea.2008.11.020, 2009.
- [19] Schaffer, G.B., Parker, B.H., "The Influence of Milling Conditions on the Properties of B₄C Reinforced Aluminum Composites," *Powder Metallurgy*, Vol. 53, No. 3, pp. 271-277, DOI: 10.1179/003258910X12654211502955, 2010.
- [20] Prakash, L., Mukherjee, R., "Hot Extrusion Effects on Microstructure of Aluminum Alloys with B₄C Particles," *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, pp. 2523-2535, DOI: 10.1177/0021998307080772, 2009.
- [21] Mazahery, A., Abdizadeh, H., "Formation of Al₆(Mn,Fe) Phases in Al₅₀₈₃-B₄C Composites Produced by Extrusion," *Materials Characterization*, Vol. 62, pp. 503-507, DOI: 10.1016/j.matchar.2011.04.008, 2011.
- [22] D. et al., "Effect of temperature on the flow stress of aluminum alloys," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 387, pp. 1-10, DOI: 10.1016/j.msea.2004.09.016, 2004.



Feasibility Study of Natural Ventilation Potential of Residential Buildings for Different Climates in Iran

Vahid Rezaee*¹, Mojtaba Masounezhad², Arash Tahvili³

1. Instructor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.
3. Instructor, Department of Textile Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

Abstract

Natural ventilation is one of the most important passive strategies to reduce building energy use, provide thermal comfort, and improve indoor air quality. It is one of the key solutions for sustainability in the building industry. On the other hand, natural ventilation is potentially dependent on climatic conditions and varies considerably from one region to another. In this study, the feasibility of passive cooling and natural ventilation has been assessed for various cities in Iran. Based on Köppen-Geiger climate classification, the Iran climate is segmented to nine climates. The impact of climatic conditions on natural ventilation of buildings was assessed using the Köppen-Geiger method and several selected cities in these climates using Climate Consultant software using the ASHRAE 55 standard method. By importing the climate parameter file of the selected cities into the Climate Consultant software, output results including comfort conditions, natural ventilation, and other results were obtained for 9 climates of Iran. The results showed that the climate of Abadan city with 673 hours provides the most natural ventilation, and the climates of Rasht and Anzali cities with less than 10 hours provide the least comfort using natural ventilation. Also, the cities of Yazd and Sabzevar have the highest potential with 25.8 percent and 22.5 percent per year, respectively, and the cities of Anzali and Meshginshahr have the lowest potential for using evaporative cooling systems (water coolers) with 0.1 and 0.8 percent, respectively.

Keywords

Iran's Climate Conditions
Climate Consultant Software
Köppen-Geiger Climatology
Comfort Conditions
Evaporative Cooling

Received: 09.26.2024

Revised: 12.07.2024

Accepted: 12.31.2024

*Corresponding Author

Vahid Rezaee

Email

Vrezaee@nus.ac.ir

1- Introduction

The building sectors collectively account for 30% of the world's total final energy consumption and 27% of total energy sector emissions [1-3]. An important factor in this impact is the operation of buildings, which includes energy consumption for lighting, heating, cooling, and ventilation [4-6]. Unlike contemporary structures that rely on mechanical systems and non-renewable energy sources for these functions, vernacular architecture exhibits bioclimatic and passive design features. As a vital strategy for bioclimatic design, natural ventilation plays an important role in regulating the indoor environment of vernacular architecture.

The potential for natural ventilation can be assessed at three main scales: climate, site, and

building. On a climatic scale, it depends on climatic parameters such as temperature and humidity in a particular location. The first step in a natural ventilation strategy in buildings is to identify the availability and usability of natural ventilation in the climate, as this strategy is highly dependent on local climatic characteristics and varies significantly from region to region. Ventilation is the natural movement of air inside a building using various strategies, which must be carefully designed to ensure a healthy living environment. Proper ventilation is associated with improved health, increased air quality, higher levels of environmental satisfaction, and by providing fresh air and removing carbon dioxide, reduces exposure to a wide range of air pollutants, odors, and chemicals.



The main goal of this research is to assess the feasibility of natural ventilation potential for the climatic conditions of Iranian cities according to the Köppen-Geiger method. In studying the climatic conditions, three parameters of temperature, humidity, and wind were conducted for 9 climates of Iran according to the Köppen method for different cities using Climate Consultant software. This software uses the ASHRAE 55 standard model using the PMV method. Using the PMV (Predicted Poll Mean Value) mathematical model, the combined effects of temperature quantities, mean radiant temperature, wind speed, clothing thermal resistance, and humidity levels were considered.

2. Research Methods

The work flow is that weather files for each region in EPW format are imported to software, and we can extract these formats on sites like Energy Plus for Iran cities and other parts of the world weather conditions. By importing the climate files of the selected cities in the climate consulting software, climate charts is drawing and their analyzing is done using the Climate Consultant software. In the weather consulting software, we have used the ASHRAE 55 standard and the PMV model. In this standard, thermal comfort is defined based on dry bulb temperature, clothing surface, metabolic activity, air velocity, humidity, and average radiant temperature. The area where most people are comfortable is calculated using the PMV (predicted mean vote) model. Regarding the climatic classification of different parts of the world, various methods have been proposed, among which the method of the Austrian scientist Köppen has been favored. Köppen has introduced different types of climates in the world based on the growth of plants. Basically, in many regions of the world, climate is defined by latitude and altitude. Most of Iran is located in a temperate region with latitude between 25- and 40- degrees north latitude. Iran has a high plateau with a majority of its territory rising beyond 475 meters above sea level. Based on Köppen-Geiger climate classification, BWh, BSk, Csa and BSh are important climatic groups of Iran, each part covers a large part of the country and other climatic

groups comprise a very small part of the country area (Figure 1).

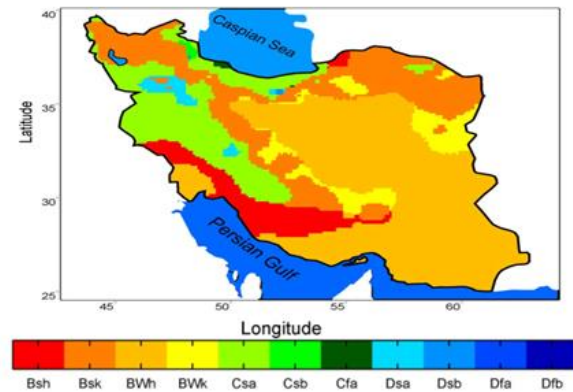


Figure 1: Köppen – Geiger climate classification of Iran

3. Results

According to Table 1, moving from the north of Iran to the center and south, the potential for using natural ventilation is greater according to the software results. Abadan has the highest ventilation potential with 673 hours of ventilation per year, followed by Qom with 625 hours of ventilation per year and Tehran with 570 hours of ventilation per year. Northern and coastal cities on the Caspian Sea have the least potential and ventilation hours Rasht city has the lowest ventilation potential with 5 hours of ventilation per year, followed by Ramsar with 10 hours of ventilation per year and Garmsar with 11 hours of ventilation per year. In general, it can be stated that central and southern cities have greater potential for using natural ventilation, according to the defined conditions.

Table 1: Natural ventilation results for different cities

City	Ventilation hours	City	Ventilation hours
Abali	118	Rasht	5
Astara	3	Ilam	444
Khoramabad	341	Ardabil	59
Sabzevar	590	Anzali	11
Kerman	435	Tabriz	290
Hamedan	275	Mashhad	377
Yasuj	256	Hamdan - Nojeh	225
Abadan	673	Yazd	425
Ahvaz	511	Sanandaj	338
Tehran	570	Bandar Abbas	263
Qom	625	Birjand	466

4. Conclusion

In this research, the passive design of buildings with near-zero energy consumption was studied for 9 of the 31 climates identified by Köppen-Geiger for Iran, which include BWh, BSk, BSh, BWk and CSa, CSb, CFa, DSa, DSb. By importing climate data in EPW format into Climate Consultant software and using the ASHRAE55 standard and the PMV model in the climate consulting software, it was used. The output results of the cities, including temperature, relative humidity, and wind speed, as well as the results of comfort conditions and natural ventilation, were examined with various figures and tables.

5- References

- [1] Yadegari, M., An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm, *The European Physical Journal Plus*, (2021), Vol. 136, No. 10, pp. 10-19,.
- [2] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis., A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, (2020),.
- [3] Haghightajoo, H., M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis., Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel, *The European Physical Journal Plus*, (2022), Vol. 137, No. 9, pp. 1042,.
- [4] Yadegari, M. and M. Ghassemi, Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, 2022. 23(1): p. 122-146.
- [5] Raziei, T. Köppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th century. *Journal of the Earth and Space Physics* (2017). , 43(2), 419-439.
- [6] Rezaee, Vahid, and Arash Houshmand. Feasibility study of Maisotsenko indirect evaporative air cooling cycle in Iran. *GeoScience Engineering* 61.2 (2015): 23.



امکان‌سنجی پتانسیل تهویه طبیعی ساختمان‌های مسکونی برای اقلیم‌های مختلف ایران

وحید رضائی^{۱*}، مجتبی معصوم نژاد^۲، آرش تحویلی^۳

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

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

۳- مربی، گروه نساجی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

تهویه طبیعی از مهم‌ترین استراتژی‌های غیرفعال کاهش مصرف انرژی ساختمان، ایجاد آسایش حرارتی و بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان است و از راه‌حل‌های کلیدی برای دستیابی به پایداری در صنعت ساختمان می‌باشد. از طرف دیگر، پتانسیل تهویه طبیعی به شدت وابسته به شرایط آب‌وهوایی است و به‌طور قابل توجهی از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. در این مقاله امکان‌سنجی سرمایه‌ش غیرفعال و تهویه طبیعی برای شهرهای مختلف ایران انجام شده است. شهرهای ایران با روش اقلیم‌شناسی کوپن - گایگر به ۹ اقلیم تقسیم می‌شوند. تأثیر شرایط اقلیمی برای تهویه طبیعی ساختمان‌ها با استفاده از روش کوپن - گایگر و چند شهر منتخب در این اقلیم‌ها توسط نرم‌افزار کلاسیک کانسالتنت با روش استاندارد 55 ASHRAE انجام شد. با وارد کردن فایل پارامترهای آب‌وهوایی شهرهای منتخب در نرم‌افزار کلاسیک کانسالتنت نتایج خروجی شامل شرایط آسایش، تهویه طبیعی و دیگر نتایج برای ۹ اقلیم ایران به دست آمد. نتایج نشان داد که اقلیم شهرآبادان با ۶۷۳ ساعت بیشترین تهویه طبیعی و اقلیم شهرهای رشت و انزلی با مقدار زیر ۱۰ ساعت کمترین مقدار آسایش را با استفاده از تهویه طبیعی تأمین می‌کنند. همچنین شهرهای یزد و سبزوار به ترتیب با ۲۵.۸ درصد و ۲۲.۵ درصد در سال بیشترین پتانسیل و شهرهای انزلی و مشکین‌شهر به ترتیب با ۰.۱ و ۰.۸ درصد کمترین پتانسیل استفاده از سیستم سرمایه‌ش تبخیری (کولر آبی) را دارند.

کلمات کلیدی

شرایط آب‌وهوایی ایران
نرم‌افزار کلاسیک کانسالتنت
روش اقلیم‌شناسی کوپن - گایگر
شرایط آسایش
سرمایش تبخیری

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

*نویسنده مسئول

وحید رضائی

ایمیل

Yahidrezaee.136698@gmail.com

۱- مقدمه

مانند خشت یا آجر گلی برای سازگاری با محیط خود هستند. چنین مثال‌هایی نشان می‌دهد که چگونه معماری بومی را می‌توان به‌گونه‌ای طراحی کرد که با اقلیم و منابع محیطی آن‌ها کار کند نه اینکه به‌شدت بر وسایل مصنوعی برای کنترل محیط داخلی تکیه کند [۸،۹]. در زمینه بحران انرژی فعلی و تغییرات آب‌وهوایی، طراحی زیست اقلیم و غیرفعال که در معماری بومی تجسم‌یافته است به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان منابع ارزشمند برای ایجاد یک جامعه پایدار شناخته می‌شود. به‌عنوان یک استراتژی حیاتی برای طراحی زیست اقلیم، تهویه طبیعی نقش مهمی در تنظیم محیط داخلی معماری بومی ایفا می‌کند [۱۵-۱۸]. با در نظر گرفتن عواملی مانند چیدمان ساختمان، دهانه‌ها و اجزاء، معماری بومی به‌طور مؤثر از تفاوت دما و اختلاف فشار هوا برای هدایت تهویه طبیعی، تسهیل گردش و تعویض هوا استفاده می‌کند.

بخش‌های ساختمانی مجموعاً ۳۰ درصد از کل مصرف انرژی نهایی جهان و ۲۷ درصد از کل انتشارات بخش انرژی را تشکیل می‌دهند [۱-۳]. عامل مهم در این تأثیر، عملیات ساختمان‌ها است که شامل مصرف انرژی برای روشنایی، گرمایش، سرمایش و تهویه می‌شود [۴-۶]. برخلاف سازه‌های معاصر که برای این عملکردها به سیستم‌های مکانیکی و منابع انرژی تجدیدناپذیر متکی هستند، معماری بومی ویژگی‌های طراحی زیست‌اقلیمی و غیرفعال را به نمایش می‌گذارد. به‌عنوان مثال، معماری سنتی در آب‌وهوای گرمسیری اغلب دارای سازه‌های مرتفع، برآمدگی‌های گسترده، دهانه‌های متعدد و الوارهای با وزن سبک و بومی برای مقابله با شرایط گرم و مرطوب است. برعکس، خانه‌های بومی در مناطق کویری معمولاً دارای دیوارهای ضخیم برای عایق، پنجره‌های کوچک، حیاط‌های سایه‌دار و استفاده از مصالح بومی



صفوی و اقبالی [۱۰] برای بهبود تهویه طبیعی و آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک موارد تغییر فاز دهنده را مورد بررسی و انتخاب قرار دادند.

شریف‌زاده و همکاران [۱۱]، میرالهی و همکاران [۱۵]، کسمایی و ورمقانی [۱۶]، انتظاری و همکاران [۱۷]، با نرم‌افزار کلایمنت کانسالتنت شرایط آسایش و تهویه طبیعی برای اقلیم‌ها و شهرهای مختلف ایران را مورد بررسی قرار دادند.

استفانو شیواون^۲ و همکاران [۱۸]، یک برنامه وب جدید را برای تجسم و محاسبه آسایش حرارتی بر اساس استاندارد ASHRAE 55 ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳ ارائه دادند. در مقایسه با نرم‌افزارهای موجود، این برنامه وب، رایگان و چند پلتفرمی است و یک نمایش دقیق بصری و بسیار تعاملی از شرایط آسایش ارائه می‌دهد.

ژانگ و همکاران [۱۹]، پاسخ‌های انسان به محیط‌های حرارتی در ساختمان‌های با تهویه طبیعی در منطقه گرم و مرطوب چین به‌طور سیستماتیک را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند.

پتانسیل تهویه طبیعی را می‌توان در سه مقیاس اصلی از جمله اقلیم، سایت و ساختمان ارزیابی کرد. شکل ۱ این طبقه‌بندی را نشان می‌دهد. در مقیاس آب‌وهوایی به پارامترهای اقلیمی مانند دما و رطوبت هوا در یک مکان خاص بستگی دارد. اولین گام در استراتژی تهویه طبیعی در ساختمان‌ها، شناسایی در دسترس بودن و قابلیت استفاده از تهویه طبیعی در اقلیم است؛ زیرا این استراتژی به‌شدت به ویژگی‌های آب‌وهوایی محلی بستگی داشته و به‌طور قابل‌توجهی از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. تهویه، حرکت طبیعی هوا در داخل ساختمان با استفاده از استراتژی‌های مختلف است که باید به‌دقت طراحی شود تا محیطی سالم برای زندگی را تضمین کند. تهویه مناسب با بهبود سلامت، افزایش کیفیت هوا، سطح بالاتر رضایت از محیط همراه بوده و با تأمین هوای تازه و حذف دی‌اکسید کربن موجب کاهش قرار گرفتن در طیف وسیعی از آلاینده‌های هوا و بو و مواد شیمیایی می‌شود.

هدف اصلی این پژوهش، امکان‌سنجی پتانسیل تهویه طبیعی برای شرایط اقلیمی شهرهای ایران برحسب روش کوپن - گایگر^۳ می‌باشد. در بررسی شرایط اقلیمی سه پارامتر دما، رطوبت و باد برای اقلیم ایران برحسب روش کوپن برای شهرهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار کلایمنت کانسالتنت^۴ انجام شد. در این

پتانسیل تهویه طبیعی برای ارزیابی امکان اطمینان از کیفیت هوای داخلی قابل‌قبول و آسایش حرارتی به‌طور طبیعی تعریف می‌شود. با تعیین محیط داخلی و خارجی، پتانسیل تهویه طبیعی می‌تواند تحت تأثیر اقلیم محلی، فرم شهری و ویژگی‌های ساختمان (هندسی و حرارتی) قرار گیرد.

علاوه بر این، دستگاه‌های تهویه مطبوع معمولی از مبردهای ساخته‌شده از ترکیبات کلر استفاده می‌کنند که متأسفانه در تخریب لایه اوزن و گرم شدن زمین نقش دارند. قابل‌ذکر است که تولید گازهای گلخانه‌ای توسط انسان به‌ویژه دی‌اکسید کربن در حال تغییر دادن اقلیم جهانی است [۷]. آمارها نشان می‌دهد که نزدیک به ۵۰ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای توسعه‌یافته از مصرف انرژی در ساختمان‌ها ناشی می‌شود؛ بنابراین، بدیهی است که سیستم‌های تهویه خوب و کارآمد برای کاهش و کنترل مصرف انرژی و همچنین کاهش قابل‌توجه در انتشار دی‌اکسید کربن مورد نیاز هستند.

استفاده از سیستم تهویه طبیعی یا غیرفعال می‌تواند یک‌راه جایگزین برای حفظ خنکی یک‌خانه یا کاهش بار تهویه مطبوع باشد. یک سیستم خنک‌کننده غیرفعال از روش‌های غیر مکانیکی برای حفظ دمای مناسب داخلی استفاده می‌کند. نبوغ معماری‌های باستانی نشان داده است که چگونه استفاده منطقی از تکنیک‌های غیرفعال سنتی، همراه با طراحی هوشمندانه، در داشتن آسایش مطلوب تابستانی بدون نیاز به دنبال کردن سیستم‌های خنک‌کننده مکانیکی نقش داشته است. اخیراً تمایل زیادی به این سیستم‌ها به‌خصوص به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی وجود دارد.

پژوهش‌های بسیار زیادی در حوزه تهویه طبیعی و آسایش ساکنان انجام شده است. مینایی و معلمی [۸] بررسی آسایش حرارتی با مدل تهویه تطبیقی استاندارد ASHRAE 55 با نرم‌افزار انرژی پلاس برای ۶ شهر مختلف ایران را انجام دادند. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد برای شهر تبریز اقلیم سرد و ضعیف‌ترین عملکرد برای شهر بندرعباس با اقلیم گرم و مرطوب می‌باشد.

صادقی و همکاران [۹] عملکرد حرارتی بادگیر برای ایجاد تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک را بررسی کردند. شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار انسیس فلونت نشان داد که بهره‌گیری از بادگیر منجر به کاهش دما تا ۹ درجه سلسیوس می‌شود.

³ Köppen-Geiger climate

⁴ Climate Consultant Software (CCS)

¹ American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers

² Stefano Schiavon

جداگانه وارد نرم‌افزار شده و بعد از استخراج نتایج تحلیل و مقایسه شهرها انجام شد.

جدول ۱: ویژگی‌های جغرافیایی شهرهای منتخب برای آنالیز [۲۰]

شهر	اقلیم	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی شمالی	ارتفاع m
		شرقی	غربی		
یزد	BWh	۵۴.۲۸	۳۱.۸۸	۱۲۳۷	
خرم‌آباد	CSa	۴۸.۲۸	۳۳.۴۳	۱۱۸۴	
مشهد	Bsk	۵۹.۵۷	۳۶.۲۷	۱۱۲۸	
سبزوار	BSh	۵۷.۶۶	۳۶.۲۱	۹۴۱	
انزلی	CFa	۴۹.۴۶	۳۷.۴۶	-۲۶	
کرمان	BWk	۵۶.۹۶	۳۰.۲۵	۱۷۵۴	
مشکین‌شهر	CSb	۴۷.۱	۳۸.۲۳	۱۸۳۰	
همدان - نوزه	DSa	۴۸.۶۸	۳۵.۲	۱۶۸۰	
آبعلی	DSb	۵۱.۹۶	۳۵.۷۶	۲۰۵۷	

نرم‌افزار از مدل استاندارد ASHRAE55 به روش PMV^1 استفاده شده است. با استفاده از مدل ریاضی PMV (شاخص متوسط نظرسنجی پیش‌بینی‌شده) اثرات ترکیبی کمیت‌های درجه حرارت، میانگین درجه حرارت تابشی، سرعت باد، مقاومت حرارتی لباس و سطوح رطوبت مدنظر قرار داده شد.

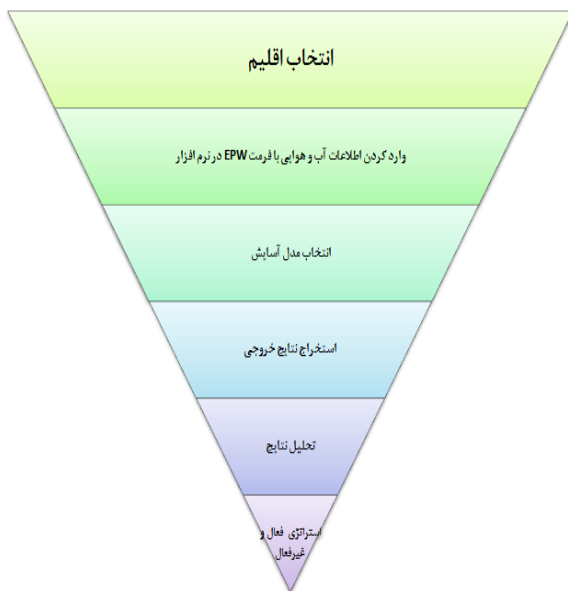


شکل ۱: مقیاس‌های ارزیابی پتانسیل تهویه طبیعی

۲- مواد و روش‌ها

نحوه کار بدین صورت می‌باشد که در هر منطقه فایل‌های آب‌وهوایی با فرمت EPW^2 داده شده است که این فرمت‌ها را می‌توانیم در سایت‌هایی همانند انرژی پلاس برای شرایط آب‌وهوایی شهرهای ایران و دیگر نقاط جهان استخراج کنیم. با وارد کردن فایل‌های آب‌وهوایی شهرهای منتخب در نرم‌افزار مشاوره آب‌وهوایی نمودارهای اقلیمی رسم و تحلیل آن با استفاده از نرم‌افزار کلاسیک کانسالنت انجام شد. در نرم‌افزار مشاوره آب‌وهوایی از استاندارد ASHRAE55 و مدل PMV استفاده شد. در این استاندارد آسایش حرارتی بر اساس دمای حباب خشک، سطح لباس، فعالیت متابولیک، سرعت هوا، رطوبت و میانگین دمای تابشی است. در جدول ۱ و ۲ ویژگی ایستگاه‌های هواشناسی شهرهای منتخب برای اقلیم کوپن - گایگر برای انجام آنالیز ارائه شد.

در شکل ۲ فلوجارت مراحل انجام تحقیق نشان داده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که ابتدا فایل آب‌وهوایی هر شهر - ایستگاه به‌طور



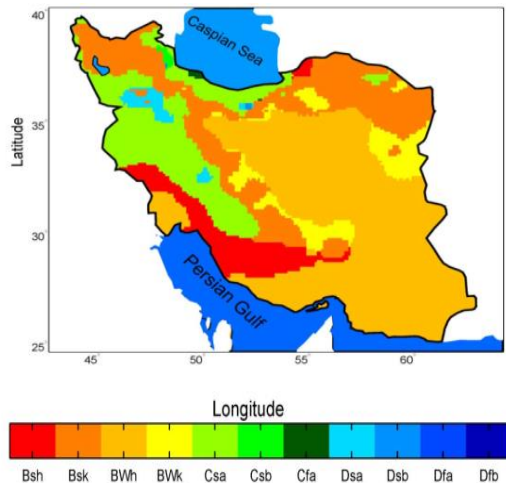
شکل ۲: فلوجارت مراحل انجام تحقیق

² Energy Plus Ewather

¹ predicted mean vote (PMV)

ارتفاعشان از سطح دریا کمتر از ۴۷۵ متر است، درصد بسیار کمی از سطح کل کشور را تشکیل می‌دهد [۱۶].

بررسی‌های اخیر انجام شده بین سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که از ۳۱ گروه اقلیمی شناسایی شده توسط کوپن-گایگر، ایران ۹ گروه از آن‌ها را در برمی‌گیرد (شکل ۳). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن - گایگر، اقلیم‌های بیابانی خشک و بسیار گرم (BWh)^۱، نیمه بیابانی خشک و سرد (BSk)^۲، نیمه بیابانی خشک و بسیار گرم (BSh)^۳ و معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (CSa)^۴ از گروه‌های مهم اقلیمی ایران هستند که هرکدام قسمت بزرگی از مساحت کشور را در برمی‌گیرند و سایر گروه‌های اقلیمی شامل بیابانی خشک و سرد (BWk)^۵، معتدل با تابستان‌های خشک و گرم (CSb)^۶، اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (DSa)^۷، اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم (DSb)^۸ و معتدل پرباران با تابستان‌های گرم (Cfa)^۹ بخش بسیار کوچکی از مساحت کشور را تشکیل می‌دهند [۲۰] (شکل ۳).



شکل ۳: طبقه‌بندی اقلیم کوپن - گایگر در ایران

۲-۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

ایران در جنوب غربی آسیا واقع شده و با کشورهای ترکمنستان، افغانستان، پاکستان، عراق، ترکیه، ارمنستان و آذربایجان مرز مشترک دارد. مساحت ایران تقریباً ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومترمربع است و بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی قرار دارد [۲۰]. یکی از

جدول ۲: ویژگی‌های دمایی شهرهای منتخب برای آنالیز [۲۰]

شهر	میانگین دمای خشک زمستانی (°C)	میانگین رطوبت نسبی زمستان (%)	میانگین دمای خشک تابستانی (°C)	میانگین رطوبت نسبی تابستان (%)
یزد	۱۰	۴۰	۲۷	۱۸
خرم‌آباد	۶.۵	۶۵.۵	۲۲.۵	۳۱.۶
مشهد	۷.۳۳	۶۰.۶۷	۲۲.۶۷	۳۲
سبزوار	۹	۵۳.۸	۲۵.۵	۲۷.۸
انزلی	۹.۸	۸۵.۳۳	۲۲.۵	۸۱
کرمان	۸.۶	۴۵.۳۳	۲۳.۱۶	۲۱.۳۳
مشکین‌شهر	۶.۵	۷۰	۱۳	۶۴
همدان - نوژه	-۴	۶۳	۳.۳۳	۳۶.۶
آبعلی	۲	۵۸.۶۶	۱۷.۶۶	۳۵

۲-۱- شرایط اقلیمی ایران برحسب کوپن - گایگر

وضعیت غالب آب‌وهوای یک منطقه که در یک دوره درازمدت وجود داشته و تابعی از پارامترهای هواشناسی نظیر دما، بارندگی، رطوبت، تشعشع، باد و غیره می‌باشد را اقلیم آن منطقه می‌نامند [۱۵]. اقلیم تا آنجا که به آسایش انسان مربوط می‌شود، نتیجه تأثیر متقابل عناصری چون تابش آفتاب، دما و رطوبت هوا، وزش باد و میزان بارندگی است. در مورد تقسیم‌بندی اقلیمی نقاط مختلف جهان، روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده که یکی از آن‌ها روش کوپن دانشمند اتریشی مورد توجه قرار گرفته است. اصولاً در بسیاری از مناطق جهان، اقلیم به‌وسیله عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا مشخص می‌شود. ایران با قرار گرفتن بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی، در منطقه گرم قرار دارد و از نظر ارتفاع نیز، فلات مرتفعی است که مجموع سطوحی از آن که

^۶ Warm-summer Mediterranean climate

^۷ Mediterranean-influenced hot-summer humid continental climate

^۸ Mediterranean-influenced warm-summer humid continental climate

^۹ Humid subtropical climate

^۱ Hot desert climate

^۲ Cold semi-arid climate

^۳ Hot semi-arid climate

^۴ Hot-summer Mediterranean climate

^۵ Cold desert climate

آب‌وهوای خشک و بسیار گرم BWh: در این آب‌وهوا، آسمان صاف و فشار بالا منجر به شرایط گرم و خشک با نور شدید خورشید می‌شود. میانگین دمای هوا در ماه‌های گرم اغلب بین ۲۹ تا ۳۵ درجه سلسیوس و در ظهر بین ۴۳ تا ۴۶ درجه سلسیوس متغیر است [۱۶]. شهرهای سیستان و بلوچستان، یزد، هرمزگان، قسمت‌هایی از استان سمنان، اصفهان، قم، اهواز، قسمت‌هایی از استان خراسان جنوبی، قسمت‌هایی از استان فارس و غیره در منطقه BWh بیابان خشک و بسیار گرم قرار می‌گیرند [۲۰]. ایستگاه یزد به‌عنوان معرف و نماینده اقلیم BWh در این تحقیق نظر گرفته شده است.

آب‌وهوای بیابانی خشک و سرد BWk: تابستان‌ها در آب‌وهوای سرد کویری (BWk) معمولاً گرم (در برخی موارد خشک) هستند، باین‌حال، معمولاً به‌اندازه تابستان در آب‌وهوای BWh گرم نیستند. آب‌وهوای سرد بیابانی (BWk)، برخلاف آب‌وهوای BWh معمولاً دارای زمستان‌های سرد و خشک است. میانگین دمای سالانه آن کمتر از ۱۸ درجه سلسیوس است. ایستگاه کرمان به‌عنوان نماینده اقلیم (BWk) در نظر گرفته شده است.

آب‌وهوای نیمه بیابانی خشک و بسیار گرم BSh: این آب‌وهوا معمولاً دارای تابستان‌های معتدل تا خنک و گاهی زمستان‌های بسیار گرم با بارش کم یا بدون بارش هستند. این اقلیم به شهرهای یاسوج، سبزوار و دامنه جنوبی زاگرس در استان خوزستان، فارس و بوشهر و قسمت کوچکی از استان گلستان در شمال شرق ایران محدود می‌شود در این منطقه BSh قرار می‌گیرند که تابستان‌های بسیار گرمی دارند. در این اقلیم استفاده از تهویه شبانه، جرم حرارتی بالا و سرمایش تبخیری مناسب است. برای گرمایش این اقلیم جذب حرارت داخل و جلوگیری از اتلاف آن به همراه بهره‌گیری از گرمایش خورشیدی غیرفعال توصیه می‌شود. ایستگاه سبزوار به‌عنوان معرف و نماینده اقلیم BSh در نظر گرفته شده است.

آب‌وهوای نیمه بیابانی خشک و سرد BSk: آب‌وهوای BSk معمولاً دارای تابستان‌های گرم تا گرم خشک است، اگرچه تابستان‌های آن‌ها معمولاً به‌اندازه آب‌وهوای BSh گرم نیست. شهرهای خراسان رضوی و شمالی، آذربایجان شرقی و غربی در منطقه BSk قرار می‌گیرند. ایستگاه مشهد به‌عنوان معرف و نماینده اقلیم BSk در نظر گرفته شده است.

آب‌وهوای معتدل Temperate گروه C: سردترین ماه در این نوع آب‌وهوا دارای دمای متوسط بین ۰ درجه سلسیوس تا ۱۸ درجه سلسیوس است و حداقل یک ماه دارای دمای متوسط بالای ۱۰ درجه

عوامل محیطی مهم که بر زندگی افراد تأثیر می‌گذارد، آب‌وهوا است. یک الگوی آب‌وهوایی خاص، دما، بارندگی، مقدار باران، رطوبت و تهویه همه به‌عنوان آب‌وهوا نامیده می‌شود. از سوی دیگر، طبقه‌بندی آب‌وهوا برای یک رویکرد ایده‌آل در طراحی ساختمان با نگرانی‌های اقلیمی بسیار مهم است و ارتباط نزدیکی با حجم داده‌های مربوط به تحولات اقلیمی دارد. هدف اصلی یک ساختمان فراهم کردن محیطی امن و راحت برای ساکنین آن است. برای ایجاد یک منطقه اقلیمی واحد و متمایز، عوامل اقلیمی که از روش خاصی برای دفع گرما از بدن انسان پشتیبانی می‌کنند و نیاز به استفاده از کیفیت‌های تخصصی خاص در طراحی ساختمان دارند، باهم گروه‌بندی می‌شوند. بیشتر ایران در منطقه معتدل با عرض جغرافیایی بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی واقع شده است. ایران دارای فلات مرتفعی است که بیشتر قلمرو آن از سطح دریا ۴۷۵ متر بالاتر است. اگرچه ایران بین دو حوضه آبی قابل توجه (دریای خزر و خلیج فارس) قرار گرفته است، اما اثرات این حوضه‌ها به دلیل رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس و موقعیت جغرافیایی آن‌ها تنها در مجاورت آن‌ها احساس می‌شود. به همین دلیل، این حوضه‌های آبی عظیم به‌ندرت تأثیری در کنترل دمای داخلی کشور دارند. ایران از نظر وسعت کشوری پهناور است که باعث ایجاد آب‌وهوای متنوعی شده است که طیف وسیعی از دماها از نیمه گرمسیری تا نیمه قطبی را در برمی‌گیرد. در فصل زمستان سیستم‌های پرفشار از نواحی غربی و جنوبی ایران عبور می‌کنند. از سوی دیگر، سیستم‌های کم‌فشار بر روی آب‌های گرم مانند اقیانوس هند، خلیج فارس و دریای خزر توسعه می‌یابند.

۲-۳- ویژگی‌های اقلیم کوپن - گایگر

هر منطقه آب‌وهوایی دارای ویژگی‌های متمایزی است که منعکس‌کننده شرایط خاص منطقه است. این موارد شامل مقدار بارندگی سالانه، میانگین سرعت باد و میانگین دمای ماهانه است. هر یک از این ویژگی‌ها در رابطه با یک شهر خاص به‌عنوان نماینده منطقه اقلیمی در ایران بررسی خواهد شد.

گروه B آب‌وهوای خشک Arid: اقلیم بیابانی یا خشک، یک زیرگروه آب‌وهوای خشک است که در آن تبخیر بیشتر از میزان بارندگی است. آب‌وهوای بیابانی اغلب دارای سطوح لخت، صخره‌ای یا شنی است که خشک می‌باشد و آب باران زیادی را در خود نگه نمی‌دارد، بنابراین مقدار کمی از بار آن که می‌بارد خیلی زود تبخیر می‌شود. آب‌وهوای خشک دارای برخی تغییرات و ریز اقلیم‌ها به‌صورت زیر است [۱۶]:

تابستان به‌طور کلی پایدارتر از هوای زمستان است. آب‌وهوای قاره‌ای دو ریز اقلیم به‌صورت زیر دارد:

- آب‌وهوای اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم Dsa;
- آب‌وهوای اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم Dsb;

سردترین ماه در این دو اقلیم زیر ۰ درجه سلسیوس یا ۳ درجه سلسیوس، گرم‌ترین میانگین ماه بالای ۲۲ درجه سلسیوس و حداقل چهار ماه میانگین دما بالای ۱۰ درجه سلسیوس است. تفاوت بین آب‌وهوای Dsa و Dsb در این است که Dsb در مقایسه با Dsa تابستان‌های نسبتاً خنک‌تری با بارش بیشتری دارد. شهرکرد و تالش در اقلیم Dsb قرار دارند. ایستگاه همدان - نوزه معرف آب‌وهوای اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم Dsa و ایستگاه ابعلی معرف آب‌وهوای قاره‌ای مرطوب و گرم تابستانی تحت تأثیر مدیترانه Dsb می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

در مطالعه حاضر ۹ نوع اقلیم ایران برحسب روش کوپن - گایگر موردتوجه قرار گرفتند که این اقلیم‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

۱- اقلیم BWH شامل شهرهای سیستان و بلوچستان، یزد، هرمزگان، قسمت‌هایی از استان سمنان، اصفهان، قم، اهواز، قسمت‌هایی از استان خراسان جنوبی، قسمت‌هایی از استان فارس و غیره می‌باشد که ایستگاه یزد را معرف اقلیم BWH در نظر گرفته شده است.

۲- اقلیم BSk شهرهای خراسان رضوی و شمالی، آذربایجان شرقی و غربی و غیره می‌باشد که ایستگاه مشهد معرف اقلیم BSk است.

۳- شهرهایی مانند یاسوج، سبزوار و دامنه جنوبی زاگرس در استان خوزستان، فارس و بوشهر و قسمت کوچکی از استان گلستان در شمال شرق ایران در منطقه BSh قرار دارند. ایستگاه سبزوار معرف اقلیم BSh در نظر گرفته شده است.

۴- شهر کرمان نماینده اقلیم Bwk می‌باشد.

۵- اقلیم sfa شامل شهرهای رشت، آستارا، رامسر و انزلی است که ایستگاه انزلی معرف و نماینده اقلیم sfa می‌باشد.

۶- اقلیم sca شامل شهرهای گرگان، ساری، کردستان، بخش‌هایی از آذربایجان شرقی، ارومیه و پیرانشهر، خرم‌آباد، ایلام، کرمانشاه، مرکزی، چهارمحال بختیاری به‌جز شهرکرد و همدان می‌باشد که ایستگاه خرم‌آباد معرف و نماینده اقلیم sca در نظر گرفته شد.

۷- استان اردبیل و مشکین شهر نماینده اقلیم scb می‌باشد.

سلسیوس است. آب‌وهوای معتدل گروه C زیر اقلیم‌هایی به‌صورت زیر دارد:

آب‌وهوای معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم Csa. این زیرگروه از آب‌وهوای مدیترانه‌ای (Csa) رایج‌ترین شکل آب‌وهوای مدیترانه‌ای است؛ بنابراین، آن را به‌عنوان "آب‌وهوای معمولی مدیترانه‌ای" نیز می‌شناسند. مناطقی با این نوع آب‌وهوای مدیترانه‌ای دمای متوسط ماهانه بیش از ۲۲ درجه سلسیوس را در گرم‌ترین ماه و میانگین بین ۱۸ تا ۳ درجه سلسیوس یا در موارد خاص بین ۱۸ تا ۰ درجه در سردترین ماه مشاهده می‌کنند. شهرهای گرگان، ساری، قسمت‌هایی از استان کردستان، بخش‌هایی از آذربایجان شرقی، ارومیه و پیرانشهر، خرم‌آباد، ایلام، کرمانشاه، مرکزی، چهارمحال بختیاری به‌جز شهرکرد و همدان در اقلیم Csa قرار می‌گیرند و شهر خرم‌آباد به‌عنوان نماینده اقلیم Csa در این پژوهش موردبررسی قرار گرفت.

آب‌وهوای معتدل با تابستان‌های خشک و گرم Csb. این نوع از آب‌وهوای مدیترانه‌ای (Csb) که گاهی اوقات «اقلیم مدیترانه‌ای خنک تابستانی» نیز نامیده می‌شود، کمتر رایج است و تابستان‌های گرم و خشک دارد. گرم‌ترین ماه آن به‌طور متوسط دمای بالاتر از ۲۲ درجه سلسیوس ندارد و سردترین ماه آن معمولاً دارای میانگین دمایی بین ۱۸ تا ۳ درجه سلسیوس یا در برخی موارد بین ۱۸ تا ۰ درجه سلسیوس است. معمولاً، متوسط دما باید برای حداقل چهار ماه بالاتر از ۱۰ درجه سلسیوس باشد. استان اردبیل و مشکین شهر نماینده اقلیم Csb در این تحقیق در نظر گرفته شده است.

آب‌وهوای معتدل پرباران با تابستان‌های گرم Cfa. منطقه آب‌وهوایی که با تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های سرد تا معتدل مشخص می‌شود، به‌عنوان آب‌وهوای نیمه گرمسیری مرطوب شناخته می‌شود. در این آب‌وهوا، میانگین دمای ماهانه از ۰ تا ۱۸ درجه سلسیوس در سردترین ماه تا حداقل ۲۲ درجه سلسیوس در گرم‌ترین ماه متغیر است. شهرهای رشت، انزلی، آستارا و رامسر در اقلیم Cfa قرار می‌گیرند و شهر انزلی به‌عنوان نماینده اقلیم Cfa در این پژوهش موردبررسی قرار گرفت.

آب‌وهوای قاره‌ای Continental گروه D: آب‌وهوای قاره‌ای اغلب تغییرات سالانه قابل‌توجهی در دما دارند (تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد). بارش در نواحی قاره‌ای معمولاً در مقادیر متوسط و عمدتاً در ماه‌های گرم‌تر رخ می‌دهد. برف معمولاً بیش از یک ماه زمین را می‌پوشاند و درصدی از بارندگی سالانه را تشکیل می‌دهد. در مناطق قاره‌ای، تابستان‌ها می‌تواند طوفانی و اغلب گرم باشد، اگرچه آب‌وهوای

۵ ساعت تهویه در سال کمترین پتانسیل تهویه را داشته، سپس به ترتیب رامسر با ۱۰ ساعت تهویه در سال، گرمسار ۱۱ ساعت تهویه در سال، کمترین پتانسیل تهویه را دارند. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود شهرهای مرکزی و جنوبی طبق شرایط تعریف‌شده از پتانسیل بیشتری برای استفاده از تهویه طبیعی برخوردارند.

جدول ۳: نتایج تهویه طبیعی برای شهرهای مختلف

شهر	تعداد ساعت تهویه	شهر	تعداد ساعت تهویه
آبعلی	۱۱۸	اردبیل	۵۹
آستارا	۳	انزلی	۱۱
ایلام	۴۴۴	تبریز	۲۹۰
خرم‌آباد	۳۴۱	رامسر	۱۰
رشت	۵	زاهدان	۵۵۴
زنجان	۲۶۱	ساری	۷۷
سبزوار	۵۹۰	شهرکرد	۳۱۰
کرمان	۴۳۵	مشهد	۳۷۷
همدان	۲۷۵	همدان - نوژه	۲۲۵
یاسوج	۲۵۶	یزد	۴۲۵
آبادان	۶۷۳	سنندج	۳۳۸
اهواز	۵۱۱	اراک	۳۱۰
تهران	۵۷۰	اصفهان	۳۳۰
قم	۶۲۵	رفسنجان	۵۴۳
شیراز	۳۷۸	بندرعباس	۲۶۳
گرگان	۱۶۱	بیرجند	۴۶۶
بجنورد	۵۴۹	بوشهر	۷۸
ارومیه	۲۶۱	قزوین	۲۶۰
کرمانشاه	۳۳۳	گرمسار	۱۱

نتایج اقلیم‌ها: شکل ۷ نتایج شرایط آسایش، سرمایه‌ش تبخیری و تهویه طبیعی اقلیم‌های ۹ گانه شهرهای منتخب را نشان می‌دهد.

۸- اقلیم dsa شامل شهرکرد و تالش می‌باشند. ایستگاه همدان- نوژه نماینده اقلیم dsa در نظر گرفته شده است.

۹- ایستگاه آبعلی نماینده اقلیم dsb می‌باشد.

نتایج دمای هوا: پارامترهای میانگین دمای خشک زمستانی و تابستانی؛ میانگین رطوبت نسبی زمستان و تابستان این شهرها در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۴ چارت ۳ بعدی میانگین دمای هوا برای شهرهای منتخب در اقلیم‌های ۹ گانه می‌باشد. بررسی شکل ۴ نمودار دما شهرهای منتخب در ۹ اقلیم ایران نشان می‌دهد که در حدود ۶۰ درصد اوقات سال دما بین ۰ تا ۲۱ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد و نیاز به راهکارهای غیرفعال و فعال برای گرمایش دارد. در این اقلیم‌ها حدود ۲۰ درصد اوقات سال دما بین ۲۱ تا ۲۷ درجه سلسیوس و تقریباً بین ۱۰ تا ۱۵ درصد اوقات سال دما بین ۲۷ تا ۳۸ درجه سلسیوس و تقریباً ۵ درصد اوقات سال دما بالاتر از ۳۸ درجه سلسیوس می‌باشد.

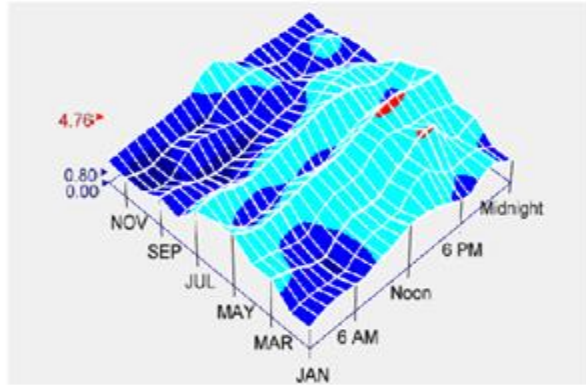
نتایج رطوبت نسبی: شکل ۵ چارت ۳ بعدی میانگین رطوبت نسبی برای شهرهای منتخب در اقلیم‌های ۹ گانه می‌باشد. بررسی شکل ۵ نمودار رطوبت نسبی شهرهای منتخب در اقلیم‌های ۹ گانه ایران نشان می‌دهد که در حدود ۳۴ درصد اوقات سال رطوبت نسبی بین ۲۰ تا ۴۰ درصد قرار می‌گیرد که این میزان رطوبت کم در فصول گرم سال بوده و شرایط نامناسبی را فراهم می‌کند. در این اقلیم‌ها حدود ۴۰ درصد اوقات سال رطوبت نسبی بین ۴۰ تا ۶۰ درصد و تقریباً ۲۶ درصد اوقات سال رطوبت نسبی بین ۶۰ تا ۸۰ درصد می‌باشد که این مقدار رطوبت بالا بیشتر موارد در فصول سرد و قبل از طلوع خورشید اتفاق می‌افتد.

نتایج سرعت باد: شکل ۶ چارت ۳ بعدی میانگین سرعت باد برای شهرهای منتخب در اقلیم‌های ۹ گانه می‌باشد. هرکدام از رنگ‌ها در شکل ۶ نشان‌دهنده بازه سرعت باد در ماه‌های مختلف می‌باشد. برای نمونه رنگ قرمز برای سرعت باد ۵ تا ۹ متر بر ثانیه برای اقلیم‌های مختلف می‌باشد. بیشتر اقلیم‌ها در محدوده رنگ آبی و سرعت بین ۲ تا ۵ متر بر ثانیه قرار دارند.

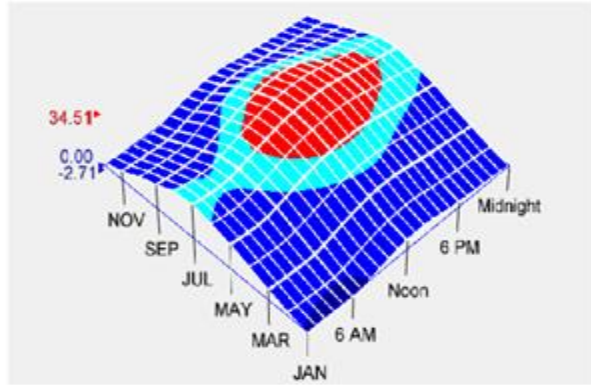
طبق جدول ۳ با حرکت از شمال ایران به سمت مرکز و جنوب، پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی طبق نتایج نرم‌افزار بیشتر است. آبادان با ۶۷۳ ساعت تهویه در سال بیشترین پتانسیل تهویه را داشته، سپس به ترتیب قم با ۶۲۵ ساعت تهویه در سال، تهران ۵۷۰ ساعت تهویه در سال، بیشترین پتانسیل تهویه را دارند. شهرهای شمالی و ساحلی دریای خزر کمترین پتانسیل و ساعات تهویه را دارند. رشت با

مشکین شهر کمترین پتانسیل استفاده از سرمایه‌ش تبخیری را دارند. همچنین بیشترین پتانسیل تهویه طبیعی در شهرهای یزد، کرمان و سبزوار مشاهده شده است.

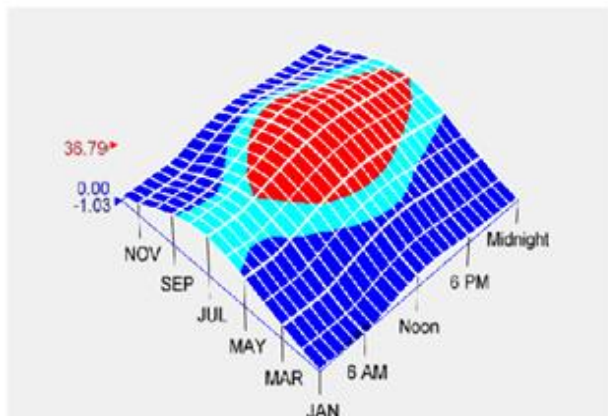
شکل ۷ نتایج ۹ اقلیم نشان می‌دهد که شهرهای یزد، سبزوار و خرم‌آباد بیشترین پتانسیل استفاده از سیستم سرمایه‌ش تبخیری را دارند. همچنین شهرهای شمالی مانند رشت، انزلی، آستارا، رامسر و



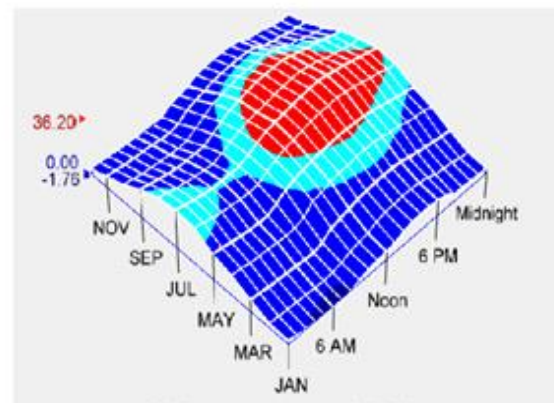
الف. یزد



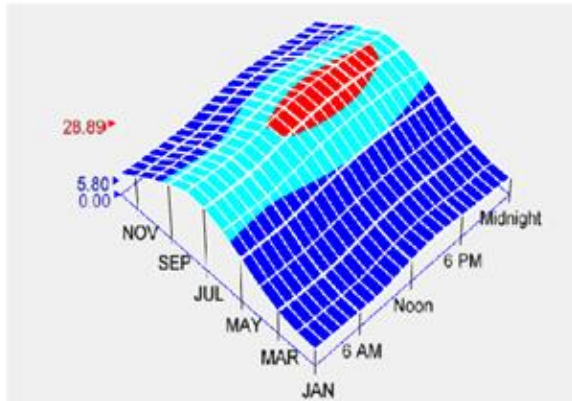
ب. مشهد



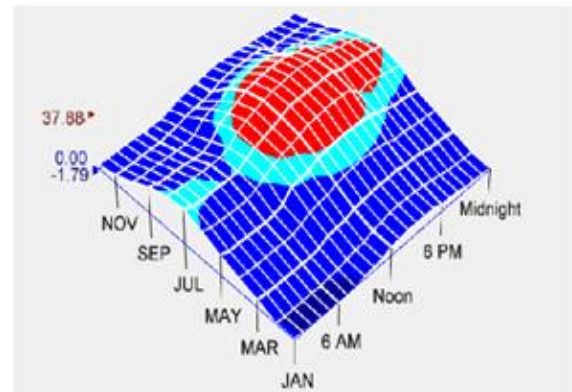
پ. سبزوار



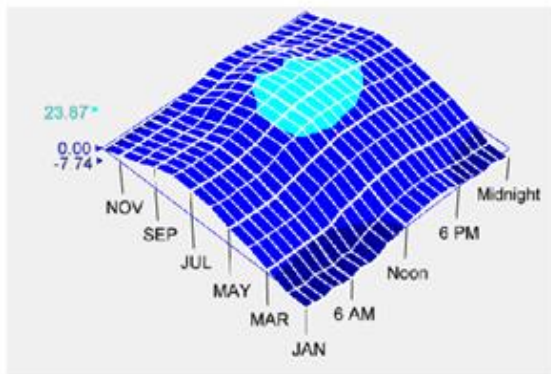
ت. کرمان



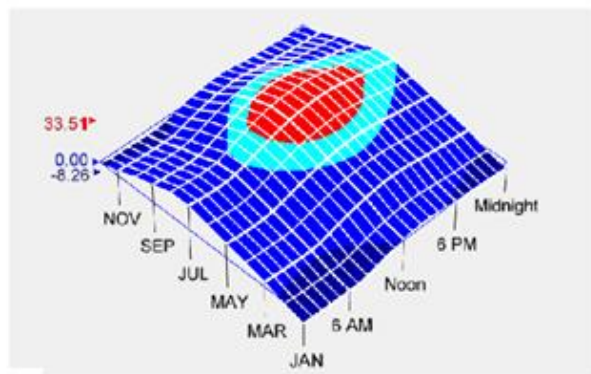
ث. بندر انزلی



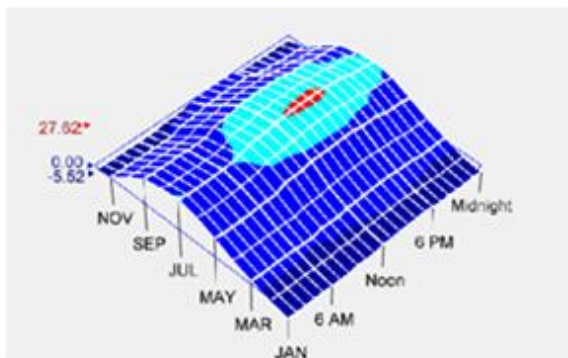
ج. خرم‌آباد



چ. اردبیل



ح. همدان - نوژه

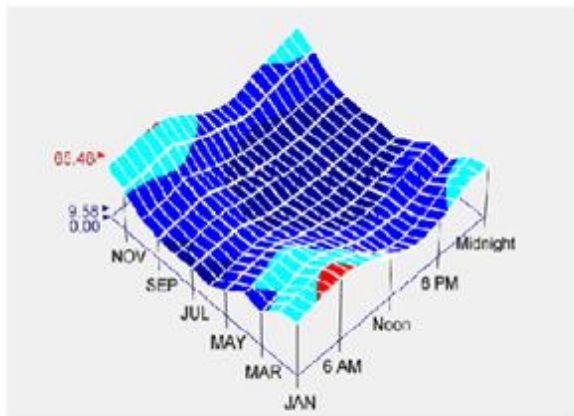


خ. آبعلی

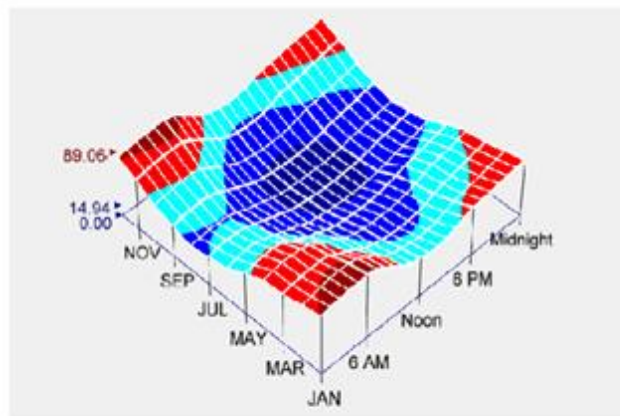


د. راهنما: دمای حباب خشک بر حسب درجه سلسیوس

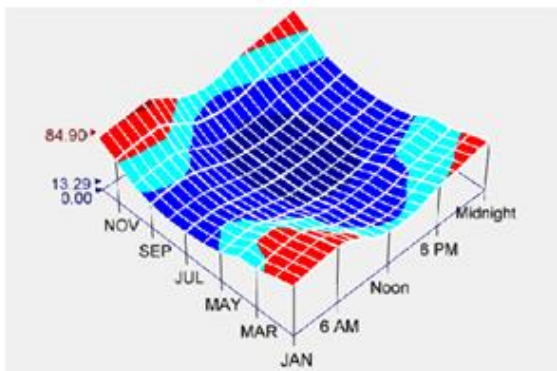
شکل ۴: چارت ۳ بعدی میانگین دمای هوای خشک برای شهرهای منتخب در اقلیم‌های ۹ گانه (الف) یزد (ب) مشهد، (پ) سبزوار، (ت) کرمان، (ث) بندر انزلی، (ج) خرم‌آباد، (چ) اردبیل، (ح) همدان - نوژه، (خ) آبعلی، (د) راهنما



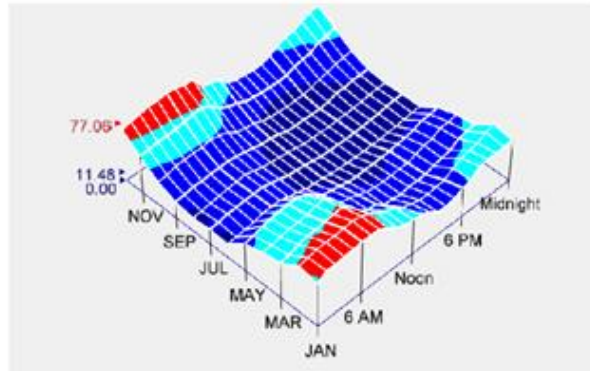
الف. یزد



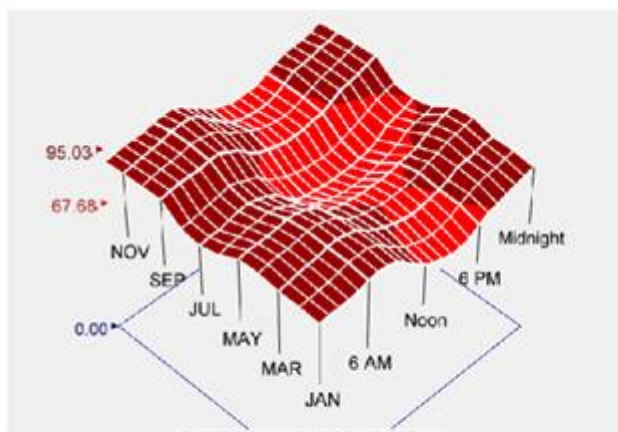
ب. مشهد



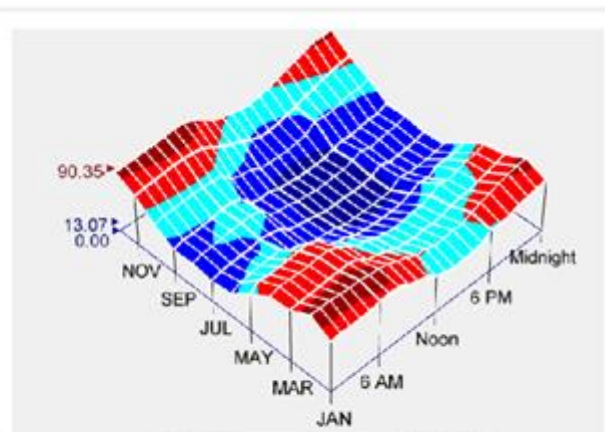
پ. سبزوار



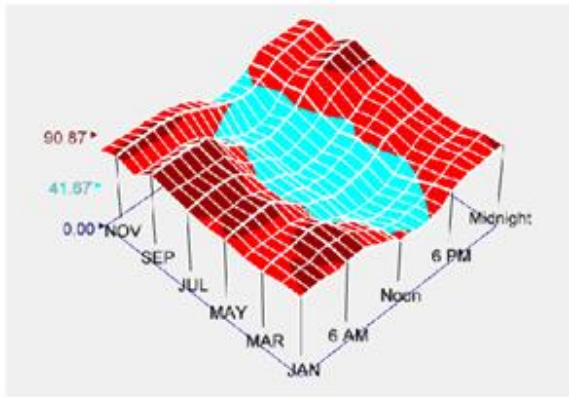
ت. کرمان



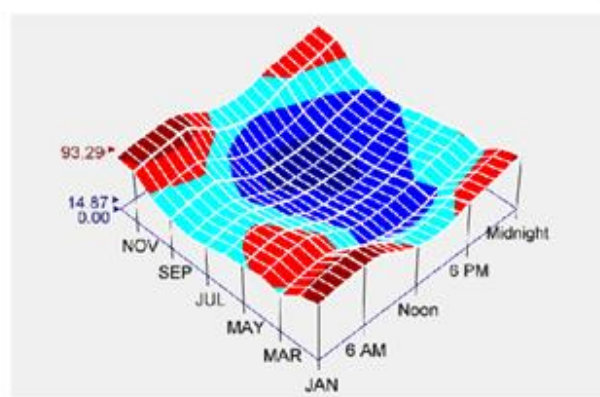
ث. بندر انزلی



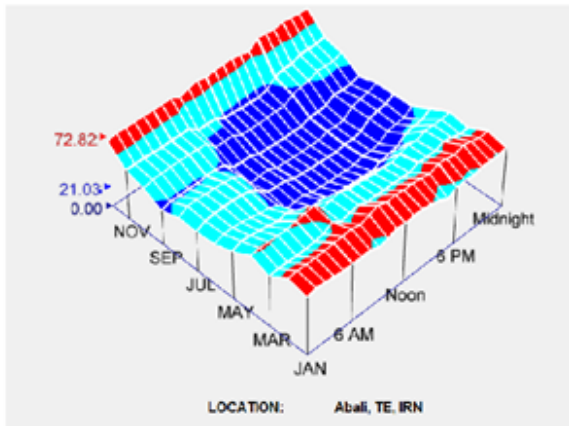
ج. خرم آباد



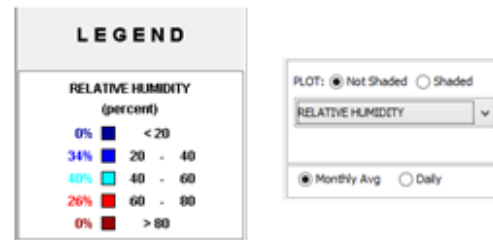
ج. اردبیل



ح. همدان - نوژه

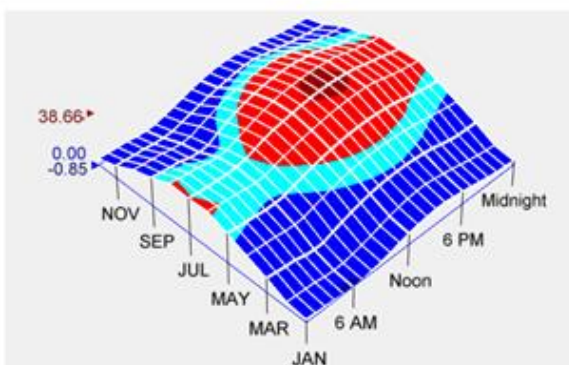


خ. آبعلی

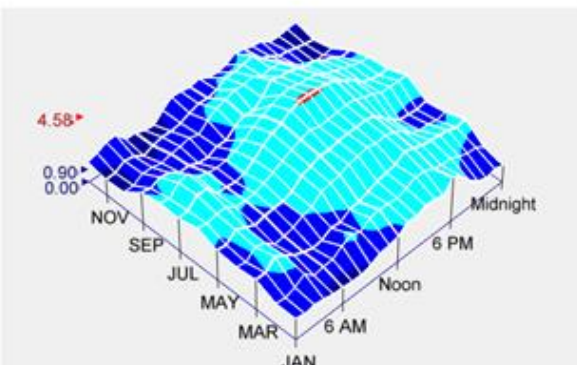


د. راهنما نمودارها: رطوبت نسبی شهرها برحسب درصد

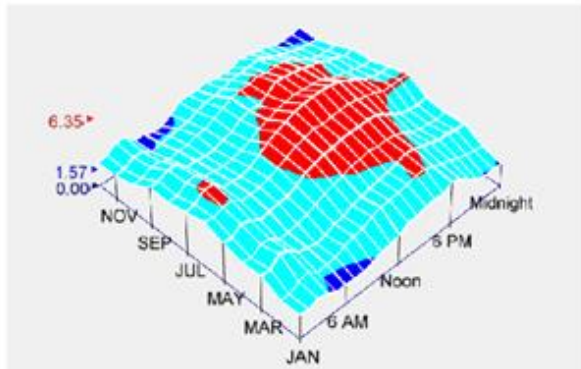
شکل ۵: چارت ۳ بعدی میانگین رطوبت نسبی برای شهرهای منتخب در اقلیم‌های ۹ گانه: (الف) یزد (ب) مشهد، (پ) سبزوار، (ت) کرمان، (ث) بندر انزلی، (ج) خرم‌آباد، (چ) اردبیل، (ح) همدان - نوژه، (خ) آبعلی، (د) راهنما رطوبت نسبی



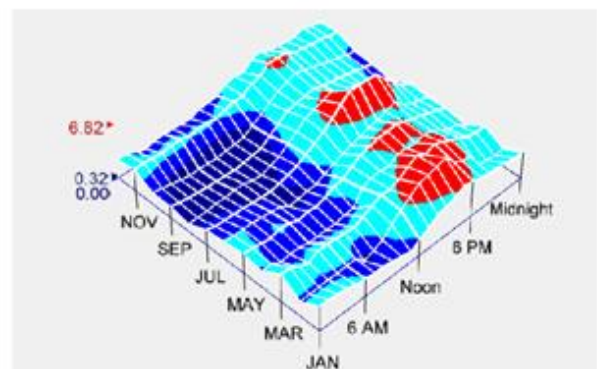
الف. یزد



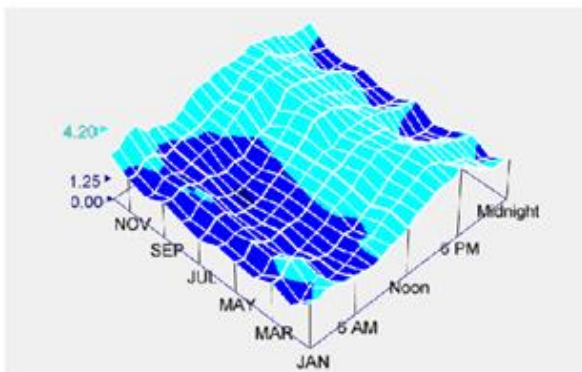
ب. مشهد



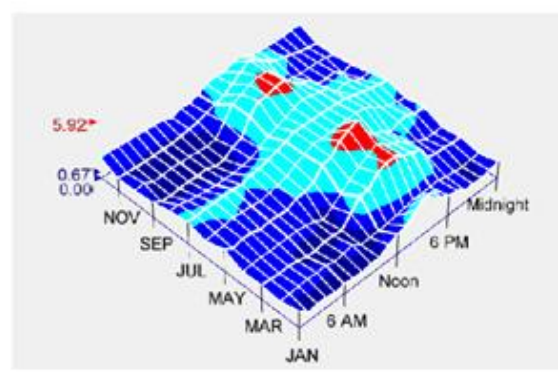
پ. سبزوار



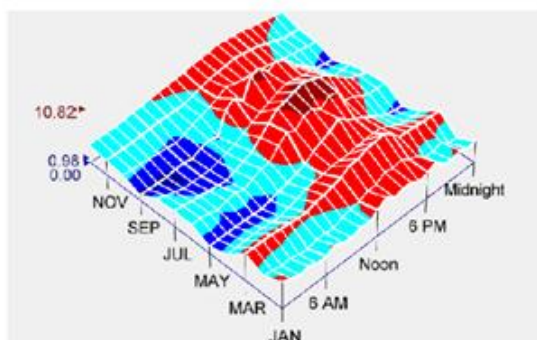
ت. گرمان



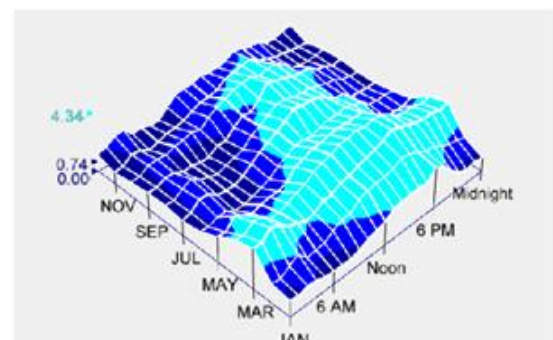
ث. بندر انزلی



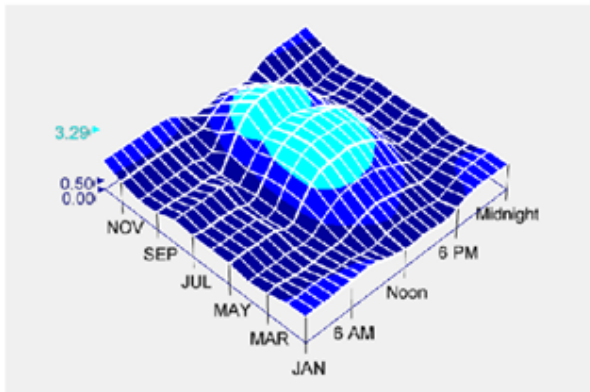
ج. خرم آباد



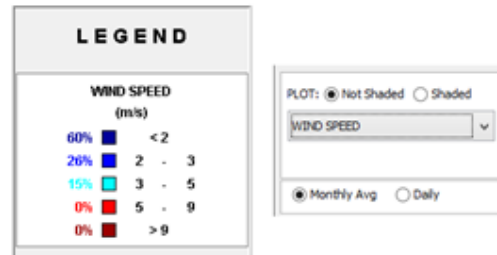
چ. اردبیل



ح. همدان - نوزه



خ. ابعلی

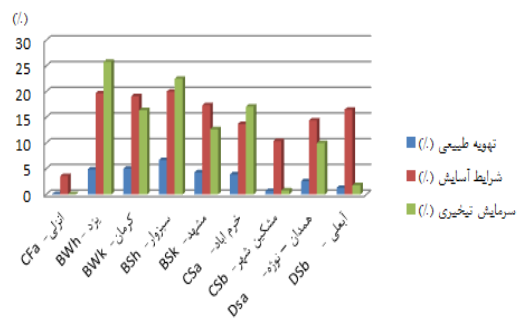


د. راهنما: سرعت باد

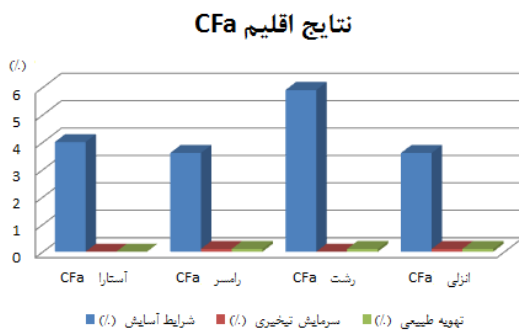
شکل ۶: چارت ۳ بعدی میانگین سرعت باد برای شهرهای منتخب در اقلیم‌های ۹ گانه: (الف) یزد (ب) مشهد، (پ) سبزوار، (ت) کرمان، (ث) بندر انزلی، (ج) خرم‌آباد، (چ) اردبیل، (ح) همدان - نوزه، (خ) ابعلی، (د) راهنما سرعت باد

هرچند نیاز به تجهیزات رطوبت زنی انفرادی نیز در بعضی از شهرهای این اقلیم مشاهده شد.

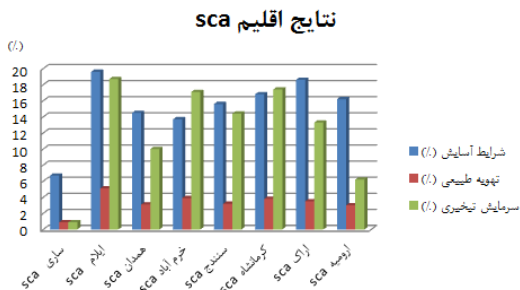
نتایج اقلیم‌ها



شکل ۷: نتایج شرایط آسایش، سرمایه‌ش تبخیری و تهویه طبیعی اقلیم‌های ۹ گانه شهرهای منتخب



شکل ۸: نتایج اقلیم CFa

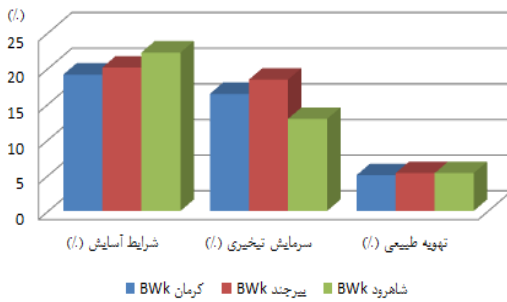


شکل ۹: نتایج اقلیم Sca

اقلیم غالب در کشور ایران اقلیم بیابانی BW و نیمه بیابانی BS است و اقلیم معتدل به بخشی از زاگرس و دامنه‌های شمالی

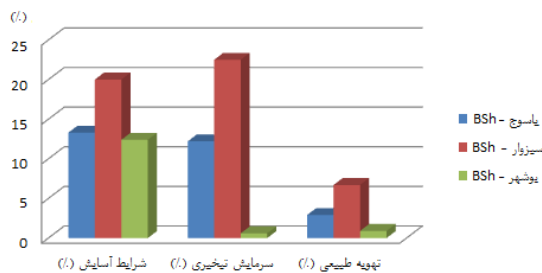
نتایج اقلیم CFa شکل ۸ نشان می‌دهد که سرمایه‌ش تبخیری و تهویه طبیعی در این اقلیم کاربردی ندارد و باید از سیستم فعال و مکانیکی پربرازده استفاده نماییم. شرایط آسایش در این اقلیم در حدود ۵ درصد می‌باشد.

ایستگاه خرم‌آباد معرف اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم SCa است که بخش زیادی از زاگرس، البرز و ناحیه خزری را در برمی‌گیرد. شهرهای ساری، ایلام، همدان، سنندج، کرمانشاه، اراک و ارومیه در این اقلیم قرار دارند و شکل ۹ نتایج آن را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در اقلیم SCa به‌طور طبیعی تهویه طبیعی و شرایط آسایش به ترتیب در حدود ۵ درصد و حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد ایام سال فراهم است و در این اقلیم می‌توانیم از سیستم سرمایه‌ش تبخیری به‌جز شهر ساری در بقیه شهرها تا حدودی استفاده شود



شکل ۱۲: نتایج اقلیم BwK

ایستگاه سبزوار معرف اقلیم نیمه بیابانی گرم BSh است. شکل ۱۳ نتایج شهرها در این اقلیم را نشان می‌دهد. با کمک استراتژی غیرفعال شرایط آسایش از ۱۰ درصد تقریباً به ۵۰ درصد می‌رسد. همچنین شهر بوشهر به دلیل شرجی بودن نیاز به سیستم سرمایش و رطوبت‌گیری دارد و از کولرآبی استفاده نمی‌شود. همچنین شهرهای یاسوج و سبزوار زمستان‌های سردتری نسبت به بوشهر دارند و باید سیستم فعال گرمایش و رطوبت زنی استفاده شود.

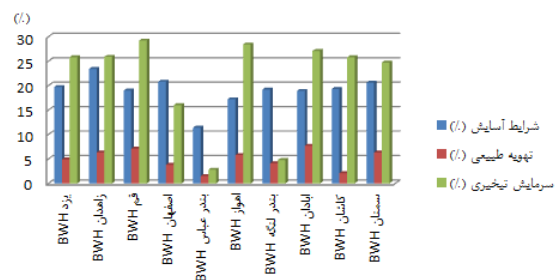


شکل ۱۳: نتایج اقلیم BSh

در شکل ۱۴ و ۱۵ نتایج مقایسه‌ای پارامترهای مختلف شرایط آسایش، سرمایش تبخیری، تهویه طبیعی و بادهای مزاحم، در اقلیم‌های ۹ گانه نشان داده شده است.

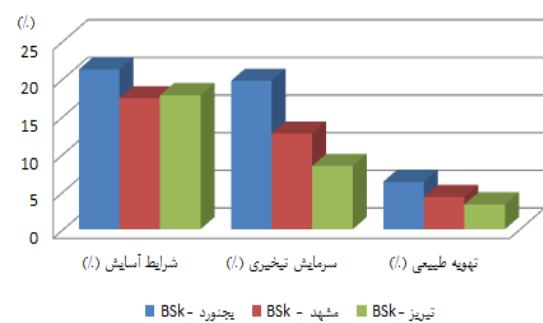
اعتبارسنجی داده‌های به‌دست‌آمده با نتایج مرجع [۸]، [۱۶] و [۱۷] به‌طور کامل تصدیق می‌شود. نمودارها و شکل‌های به‌دست‌آمده با مرجع شماره [۱۷] که استراتژی‌های طراحی معماری شهر یزد (اقلیم Bwh) را بررسی کرده است، هماهنگی کامل دارد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده و ارائه‌شده در جدول ۳ با نتایج مرجع [۱۶] عوامل مؤثر بر کاهش مصرف انرژی ساختمان در شهر تهران که در جدول ۴ ارائه گردیده است کاملاً تصدیق می‌شود.

البرز محدود می‌شود. ایستگاه یزد نماینده اقلیم بیابانی گرم BWh است. شهرهای زاهدان، قم، اصفهان، بندرعباس، اهواز، بندرلنگه، آبادان، کاشان و غیره در اقلیم BWh قرار دارند. نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در این اقلیم شرایط آسایش در ۲۰ درصد اوقات سال فراهم است. در این اقلیم تهویه طبیعی در حدود ۵ درصد اوقات سال می‌تواند استفاده شود. همچنین سرمایش تبخیری مستقیم و غیرمستقیم در این اقلیم می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند؛ اما شهرهای بندرعباس و بندرلنگه به دلیل شرجی بودن و رطوبت بالا استفاده از کولرآبی توصیه نمی‌شود و حتماً باید از سیستم‌های سرمایش و رطوبت زنی همانند کولرگازی استفاده شود.



شکل ۱۰: نتایج اقلیم BWh

ایستگاه مشهد معرف اقلیم نیمه بیابانی سرد BSk و ایستگاه کرمان از اقلیم بیابانی سرد BwK برخوردار هستند. شکل ۱۱ و ۱۲ نتایج شهرهای این دو اقلیم را نشان می‌دهد. در اقلیم نیمه بیابانی سرد BSk شرایط آسایش در حدود ۲۰ درصد ایام سال برقرار می‌باشد. در اقلیم بیابانی سرد BwK تهویه طبیعی در حدود ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۱۱: نتایج اقلیم BSk

جدول ۴: نتایج شهر تهران برای اعتبارسنجی تحقیق [۱۶].

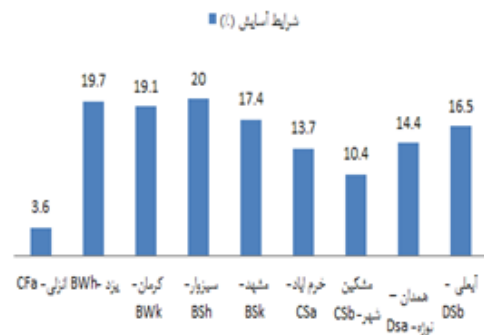
مرجع	سرمایش تبخیری (درصد)	تهویه طبیعی (درصد)	شرایط آسایش (درصد)	شهر
[۱۶]	۲۸.۲	۵.۹	۱۲.۴	تهران

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق طراحی غیرفعال ساختمان‌های با مصرف انرژی نزدیک به صفر برای ۹ اقلیم از ۳۱ اقلیم شناسایی شده کوپن - گایگر برای کشور ایران را که شامل اقلیم‌های، BWh، BSk، BSh، BWk و CSa، CSb، CFa، DSb، DSa می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفت. با وارد کردن داده‌های آب‌وهوایی با فرمت EPW در نرم‌افزار کلاسیمنت کانسالتنت و استفاده از استاندارد ASHRAE55 و مدل PMV در نرم‌افزار مشاوره آب‌وهوایی استفاده شد. نتایج خروجی شهرها شامل دما، رطوبت نسبی و سرعت باد و همچنین نتایج شرایط آسایش و تهویه طبیعی با شکل‌ها و جداول مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج ۹ اقلیم عبارت‌اند از:

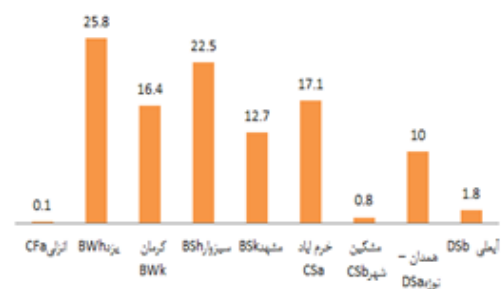
۱- در اقلیم بیابانی و گرم BWh که ایستگاه یزد به‌عنوان معرف و نماینده در نظر گرفته شده است. ویژگی این نوع اقلیم نشان می‌دهد که مقدار بارش ماه‌های مختلف سال بسیار ناچیز و این ایستگاه دارای یک فصل طولانی خشک است که با دمای بسیار بالای هوا در تمام ماه‌های سال همراه است. نتایج در این اقلیم نشان داد که در ۴.۹ درصد اوقات سال یعنی ۴۲۵ ساعت از ۸۷۶۰ ساعت سال با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار دارد. در ماه‌های گرم سال با سیستم سرمایش تبخیری ۲۵.۸ درصد یا ۲۲۶۳ ساعت به شرایط آسایش می‌رسد.

۲- ایستگاه خرم‌آباد معرف اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم CSa است که بخش زیادی از زاگرس، البرز و ناحیه خزری را در برمی‌گیرد. این اقلیم اگرچه از یک دوره خشک تابستانه برخوردار است ولی در اغلب ماه‌های سال بارش تقریباً خوبی دریافت می‌کند و تابستان‌های آن نیز خنک است. نتایج در این اقلیم نشان داد که در ۳.۹ درصد اوقات سال یعنی ۳۴۱ ساعت از ۸۷۶۰ ساعت سال با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار دارد. در ماه‌های گرم سال با سیستم سرمایش تبخیری ۱۷ درصد به شرایط آسایش می‌رسد.



الف. شرایط آسایش

ب. سرمایش تبخیری (%)



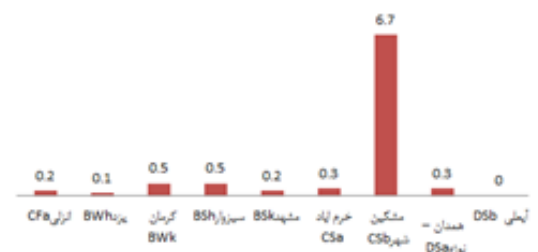
ب. سرمایش تبخیری

شکل ۱۴: نتایج مقایسه‌ای پارامترهای اقلیم‌های ۹ گانه ایران (الف) شرایط آسایش (ب) سرمایش تبخیری



الف. تهویه طبیعی

ب. بادهای مزاحم (%)



ب. بادهای مزاحم

شکل ۱۵: نتایج مقایسه‌ای پارامترهای اقلیم‌های ۹ گانه ایران (الف) تهویه طبیعی (ب) بادهای مزاحم

بارش بیشتری نیز برخوردار است نشان می‌دهد که در ۱۱۸ ساعت با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار می‌گیرد. در ماه‌های گرم سال ۱.۸ درصد یا ۱۶۰ ساعت با سرمایش تبخیری در شرایط آسایش قرار خواهد گرفت.

۵- منابع

- [1] Yadegari, M. An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm, *The European Physical Journal Plus*, (2021), Vol. 136, No. 10, pp. 10-19,
- [2] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis. A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, (2020),
- [3] Haghghatjoo, H. M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis. Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel, *The European Physical Journal Plus*, (2022), Vol. 137, No. 9, pp. 1042,
- [4] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis. Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers, *The European Physical Journal Plus*, (2021), Vol. 136, pp. 1-19,
- [5] Yadegari, M. 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, *The European Physical Journal Plus*, (2020), Vol. 135, No.7, pp. 548,
- [6] Yadegari, M. and A.B. Khoshnevis. Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems, *The European Physical Journal Plus*, (2020), Vol. 135, No. 6, pp. 534,
- [7] Yadegari, M. and M. Ghassemi, Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber. *Iranian Journal of*

۳- نتایج اقلیم نیمه بیابانی سرد BSk یا ایستگاه مشهد نشان داد نتایج در این اقلیم نشان داد که در ۴.۳ درصد اوقات سال یعنی ۳۷۷ ساعت از ۸۷۶۰ ساعت سال با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار دارد. در ماه‌های گرم سال با سیستم سرمایش تبخیری ۱۲.۷ درصد به شرایط آسایش می‌رسد.

۴- نتایج اقلیم نیمه بیابانی گرم BSh ایستگاه سبزوار نشان داد که ۶.۷ درصد اوقات سال یعنی ۵۹۰ ساعت با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار می‌گیرد. در ماه‌های گرم سال ۲۲.۵ درصد یا ۱۹۷۰ ساعت با سرمایش تبخیری در شرایط آسایش قرار می‌گیرد.

۵- ایستگاه انزلی معرف اقلیم معتدل پرباران با تابستان‌های گرم و بدون فصل خشک CFa است. نتایج ایستگاه انزلی و اقلیم CFa که فقط در نوار ساحلی دریای خزر دیده می‌شود نشان داد که در ۰.۱ درصد اوقات سال یعنی ۱۱ ساعت از ۸۷۶۰ ساعت سال با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار دارد. همچنین استفاده از کولر آبی یا سرمایش تبخیری به دلیل شرجی بودن این اقلیم کاربردی ندارد.

۶- در اقلیم بیابانی سرد BSk ایستگاه کرمان ۵ درصد اوقات سال یعنی ۴۳۵ ساعت با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار می‌گیرد. در ماه‌های گرم سال ۱۹.۴ درصد یا ۱۷۰۰ ساعت با سرمایش تبخیری در شرایط آسایش قرار می‌گیرد.

۷- اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و گرم CSb ایستگاه مشکین‌شهر نشان داد که ۵۹ ساعت در سال با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار می‌گیرد و در ماه‌های گرم سال ۰.۵ درصد یا ۴۸ ساعت با سرمایش تبخیری در شرایط آسایش قرار می‌گیرد. همچنین وزش بادهای مزاحم در این اقلیم با ۷ درصد بیشترین ناراحتی را برای ساکنین نسبت به اقلیم‌های دیگر به وجود می‌آورد.

۸- ایستگاه همدان - نوژه معرف اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم DSa است که در زمستان بسیار سرد است ولی تابستان‌های بسیار گرمی دارد. نتایج نشان داد که در ۲.۶ درصد اوقات سال یعنی ۲۲۵ ساعت با استراتژی‌های تهویه طبیعی در شرایط آسایش قرار می‌گیرد و در ماه‌های گرم سال ۱۰ درصد یا ۸۸۰ ساعت با سرمایش تبخیری در شرایط آسایش قرار می‌گیرد.

۹- نتایج اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم DSb ایستگاه ابعلی که در مقایسه با اقلیم DSa تابستان‌های خنک‌تری دارد و از

- of 22th District of Tehran. Iranian Journal of Energy, (2021). 24(1), 67-100. (in Persian)
- [17] Entezari, A, mayvaneh, F. khazaeenejad, F. (2020). Sun, Wind and Light (Design Strategies in Consistent Architecture with Climate) Case Study: Yazd City. jgs, 20(56), 223-240. (in Persian)
- [18] Schiavon, S; H. Tyler; Piccioli, Alberto. Web application for thermal comfort visualization and calculation according to ASHRAE Standard 55. In: Building Simulation. Tsinghua University Press, 2014. p. 321-334.
- [19] ZHANG, Yufeng, et al. Thermal comfort in naturally ventilated buildings in hot-humid area of China. Building and Environment, 2010, 45.11: 2562-2570.
- [20] Razi, T. Köppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th century. Journal of the Earth and Space Physics (2017)., 43(2), 419-439.
- [21] Ghiai, M. M. Arjmand, J. T. Mohammadi, O. Ahmadi, M. H. & Assad, M. E. H. Investigation and modeling of energy consumption of tall office buildings in Iran's hot-arid and cold climate conditions. International Journal of Low-Carbon Technologies, (2021). 16(1), 21-34.
- [22] Aram, K. Taherkhani, R. & Šimelytė, A. Multistage optimization toward a nearly net zero energy building due to climate change. Energies, (2022). 15(3), 983.
- [23] Haghgoo Fakhr, M. Rahimi Ariaei, A. & Jahangiri, M. Techno-Econo-Enviro Assessment of Photovoltaic-Thermal (PV-T) System for Residential Use in Iran Based on Köppen Climate Classification. International Journal of Energy Research, (2023). (1), 6657485.
- [24] Chang, H. Hou, Y. Lee, I. Liu, T. & Acharya, T. D, Feasibility study and passive design of nearly zero energy building on rural houses in Xi'an, China. Buildings, . (2022). 12(3), 341.
- [25] Arif, S. Taweekun, J. Ali, H. M. Yanjun, D. A. I. & Ahmed, A. Feasibility study and economic analysis of grid connected solar powered net zero energy building (NZEB) of shopping mall for two different climates of Pakistan and Thailand. Case Mechanical Engineering Transactions of the ISME, 2022. 23(1): p. 122-146.
- [8] Minaei, A. and Moallemi Khiavi, N, Thermal Comfort Evaluation for Naturally Ventilated Building Applying an Adaptive Model in Different Cities of Iran. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2023). 54(11), 2663-2680. (in Persian)
- [9] Sadeghi, N. Gorji Mahlabani, Y. & Nazif, H. R, Numerical investigation on thermal performance of a wind catcher for natural ventilation in hot and dry climate. Journal of Renewable and New Energy,. (2021). 8(1), 33-40. (in Persian)
- [10] Neshat Safavi, S. H. & Eghbali, S. R, Investigation of Phase Change Materials Selection in Passive Cooling to Improve Natural Ventilation and Thermal Comfort. Journal of Renewable and New Energy, (2021). 8(2), 1-10. (in Persian)
- [11] Amaripadath, D. Rahif, R. Zuo, W. Velickovic, M. Voglaire, C. & Attia, S. Climate change sensitive sizing and design for nearly zero-energy office building systems in Brussels. Energy and Buildings, (2023). 286, 112971.
- [12] Wilberforce, T. Olabi, A. G. Sayed, E. T. Elsaid, K. Maghrabie, H. M. & Abdelkareem, M. A. A review on zero energy buildings—Pros and cons. Energy and Built Environment, (2023). 4(1), 25-38.
- [13] Taherahmadi, J. Noorollahi, Y. & Panahi, M. Toward comprehensive zero energy building definitions: a literature review and recommendations. International Journal of Sustainable Energy, (2021). 40(2), 120-148.
- [14] Sarir, P. & Sharifzadeh, M. Application of passive and active scenarios to a residential building in a dry and hot climate to achieve a positive energy building (PEB). Heliyon, (2024). 10(10).
- [15] Mirlohi, S. M. Sadeghzadeh, M. Kumar, R. & Ghassemieh, M. Implementation of a zero-energy building scheme for a hot and dry climate region in Iran (a Case Study, Yazd). Renewable energy research and applications, (2020). 1(1), 65-74.
- [16] Varmaghani, H. & Kasmaei, A. Factors Affecting Energy Conservation in High-rise Buildings Case

-
- [28] Vahidifar, S. Nabavi, S. H. Zakeri, M. Naserian, M. M. & Heydarian, A. Numerical and Experimental study of a new building cooling system based on compression refrigeration cycle. *Science and Technology in Mechanical Engineering*, (2023). 1(1), 126-137. (in Persian)
- [29] Akbari, S. A. H. & Javanshir, Y. Energy and exergy analysis of the organic Rankine cycle used for recovering waste heat from the cement industry... *Science and Technology in Mechanical Engineering*, (2023). 2(1), 7-25
- Studies in Thermal Engineering, (2021). 26, 101049.
- [26] Climate Data for Cities Worldwide. <https://en.climate-data.org>
- [27] Khalili, M. Climatic Design of a Residential Villa and Finding Suitable Solar Heating Technology to Meet Thermal Needs in the Cold Climate of Iran. *Journal of Solar Energy Research*, (2021). vol. 6(4), pp 865-882.



Thermodynamic, Economic and Optimization Analysis of a New Geothermal Energy-Based Multiple Generation System for Hot Water, Cooling, Power and Liquid Hydrogen Production

Ali Eyvazi^{*1}, Mehran Ameri², Mohammad Shafiey Dehaj³, Hadi Ghaebi⁴

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

4. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardebil, Iran.

Abstract

In this study, a new geothermal energy-based multiple generation system is investigated. This system consists of a modified organic Rankine cycle, a single-effect absorption chiller, and a hydrogen liquefaction cycle that produces power, heat, cold, and liquid hydrogen. In the proposed system, by using geothermal energy as the primary energy source required for liquid hydrogen production, environmental pollution is minimized. The hydrogen gas produced by the electrolyzer in the proposed system is pre-cooled by an absorption heat transformer, and the power consumption of the hydrogen liquefaction cycle is reduced. In the present study, the effect of changes in important performance parameters on the system performance is evaluated. In addition, the optimal performance of the system is investigated using a two-objective genetic algorithm, and the optimal point of the system is obtained using the TOPSIS decision criterion. A complete thermodynamic analysis is performed in the present study, and the results show that an energy efficiency of 42% and an exergy efficiency of 51% are obtained for the proposed system. The economic evaluation conducted in the present study using updated cost functions shows that the total cost of the multiple generation system is \$16.37/GJ, which demonstrates the high economic justification of the proposed system.

Keywords

Geothermal Energy
Hydrogen Cloud Liquefaction Cycle
Multiple Production System
Optimization
Modified Organic Rankine Cycle

Received: 11.22.2024

Revised: 12.31.2024

Accepted: 01.08.2025

*Corresponding Author

Ali Eyvazi

Email

alievvazi1996@gmail.com

1- Introduction

Energy is a fundamental need for continued economic development, the provision of goods and services, and the comfort of human life. Some experts believe that another energy crisis is about to unfold. This crisis will not only be related to energy supply, but will also involve a complex combination of environmental problems that, in addition to affecting the quality of modern social life today, will jeopardize the economic development of the world. Increasing energy efficiency has brought many benefits to humanity. Investment in energy efficiency and fuel flexibility has led to greater attention to achieving sustainable energy. Fossil

energy sources have had many negative effects on the environment, including increasing global temperatures, greenhouse effects, and temperature inversions, and have caused the destruction of the ozone layer and the spread of many environmental pollutants. These problems can be solved by using clean fuel technology from renewable sources. Hydrogen, as a suitable alternative to fossil fuels, is capable of providing sustainable energy sources in the long term and is highly compatible with environmental standards. Hydrogen is the most abundant element in the world and the tenth most abundant element in the Earth's crust. Hydrogen, as



the lightest known element, has the highest energy per unit weight compared to other fuels. Hydrogen is one of the main elements that make up the Earth and plays an important role in life. Today, hydrogen is used as a feedstock in various industries. The possibility of another energy crisis and concerns about the depletion of fossil fuels, environmental imperatives, increasing energy consumption and population growth, problems caused by migration and uncontrolled urbanization are the driving forces that intensify attention to renewable sources and the hydrogen energy system. There are challenges in using hydrogen in its gaseous state that require its liquefaction for practical applications. Various methods for liquefaction of hydrogen have been proposed and widely studied. The most important advantages of using hydrogen fuel are the non-polluting product of the hydrogen combustion reaction, the higher amount of heat generated by combustion per unit weight, the economy due to the variable amount of mixing with air for combustion, the possibility of removing leaked hydrogen in a closed environment, the non-toxicity and the cheapness compared to other fuels. Liquid hydrogen is an environmentally friendly energy source. Storing liquid hydrogen in tanks is a simple process. It is important to remember that some energy is required to convert hydrogen into a liquid state. Rockets in the space program mainly use liquid hydrogen as a fuel source. It should be noted that hydrogen is primarily found in its gaseous state, but is stored and transported in liquid form for ease of use. Consequently, there is a high need for investment and technological advancement for clean hydrogen production based on renewable geothermal resources, and it has attracted the attention of many researchers.

2. Methodology

In this study, a complete thermodynamic and economic modeling of a multiple production system is introduced. EES software, which includes functions related to thermodynamic properties, is used for modeling. The thermodynamic equations are solved in steady state and simultaneously. In the economic analysis section, all prices and cost rates are updated to justify the proposed system well.

Then, a parametric analysis is performed to evaluate the effect of changes in functional parameters on the main system performance. Also, a two-objective genetic algorithm has been performed to achieve optimal performance on the system under study, in such a way that exergy efficiency and cost rate are the objective functions in the optimization algorithm. TOPSIS decision criterion has been used to determine the optimal point of the system. TOPSIS method is one of the multi-criteria decision-making methods that ranks alternatives. TOPSIS is a technique for ordering priority through similarity to the ideal solution and indicates the value of proximity to the ideal solution positively. This study shows the optimal combination of process parameters using the shortest distance from the ideal solution.

3. Results

The proposed system utilizes geothermal energy to provide primary energy through an innovative approach and is developed by modifying the organic Rankine cycle, resulting in a new system. This system has been simulated using EES software based on specific design criteria. In the thermodynamic analysis of the geothermal source, water acts as the working fluid. The findings from the thermodynamic evaluation show that the output power of the studied system is 1425 kW. The energy efficiency and exergy efficiency of the system are measured to be 42% and 51%, respectively. The findings indicate that significant exergy loss occurs in the modified Rankine unit and in the electrolyzer unit. It is worth noting that among the system components, the modified Rankine cycle turbine and electrolysis have the highest exergy destruction, while the pumps have the lowest exergy destruction among the system components. Calculations show that the total exergy destruction for the system is 56140 kW. The total system cost rate is \$37.16/GJ, indicating the significant economic efficiency of the proposed system. The levelized cost of electricity (LCOE) and the cost of hydrogen (LCOH) with values of 19.8 cents/kWh and \$24.39/kg are critical factors in the economic evaluation of the system.

4. Conclusion

This study evaluates a novel multi-generation system that utilizes geothermal energy to produce electricity, heat, cold, and liquid hydrogen. The proposed system consists of a geothermal unit, an innovative modified organic Rankine cycle that integrates an internal heat exchanger and a steam heat exchanger generator, a single-effect absorption chiller, a proton exchange membrane electrolysis, and a hydrogen liquefaction cycle. The system under consideration has been subjected to an analysis focused on energy, exergy, and economic factors. The hydrogen gas produced by electrolysis is converted to liquid form during the cloud liquefaction cycle, increasing its storage and transportation efficiency. By pre-cooling the hydrogen gas in the absorption chiller, the energy consumed in the liquefaction cycle is reduced, and immersing it in two heat exchangers with a liquid nitrogen bath reduces the temperature difference in the heat exchanger, thereby reducing exergy loss and improving the efficiency of the proposed system. The electrolysis and modified Rankine cycle turbine show the highest exergy destruction compared to other system components, which can be significantly reduced by increasing the inlet temperature for the proposed system. In addition, a parametric analysis was performed to evaluate the system performance under different conditions. This research aims to optimize the configuration of the system components for maximum efficiency under ideal conditions and also to increase the thermodynamic performance of the system. The analyzed system shows satisfactory performance and by achieving an energy efficiency of 42% and an exergy efficiency of 51%, it represents the optimal configuration of a geothermal energy-based multiple generation system. In this study, an economic evaluation has been performed to develop a system characterized by high economic efficiency. The findings show that achieving the desired economic efficiency for the entire system involves a cost of \$16.37 per GJ. The effect of six decision variables on the system performance was investigated, including the turbine isentropic efficiency, turbine 1 outlet pressure, steam heat

exchanger generator outlet temperature, and turbine 1 outlet temperature. The dual-objective optimization significantly increases the exergy efficiency of the system, using the TOPSIS decision criterion, the optimal operating point is identified, and a system with an optimal cost rate is presented to improve the economic justification of employing the proposed cogeneration system.

5- References

- [1] Mahdavi N, Ghaebi H, Minaei A. Proposal and multi-aspect assessment of a novel solar-based trigeneration system; investigation of zeotropic mixture's utilization. *Appl Therm Eng* 2022;206:118110.
- [2] Azizi S, Shakibi H, Shokri A, Chitsaz A, Yari M. Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Appl Energy* 2023;332.
- [3] Saberi, Mohammad Reza, Kandaharion, Amir Mohammad, Naqashzadeh, Ehsan. Investigating the reliability of diesel, biodiesel and hydrogen fuels in diesel engines with the approach of sustainable development analysis. *Science and Technology in Mechanical Engineering*, 1402; 2(1): 101-113. (in Persian)
- [4] O. Bamisile, et al., Thermo-enviro-exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel geothermal-solar-wind micro-multi-energy system for cleaner energy production, *Process Saf. Environ. Prot.* 170 (2023) 157–175.
- [5] F. Yilmaz, et al., Proposed and assessment of a sustainable multigeneration plant combined with a transcritical CO₂ cycle operated by flash-binary geothermal energy, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (60) (2023) 22818–22833.
- [6] Liu X, Hu G, Zeng Z. Performance characterization and multi-objective optimization of integrating a biomass-fueled brayton cycle, a kalina cycle, and an organic rankine cycle with a claude hydrogen liquefaction cycle. *Energy* 2023;263.



تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه‌سازی سیستم تولید چندانگانه جدید مبتنی بر انرژی

زمین‌گرمایی برای تولید آب گرم، سرمایش، توان و هیدروژن مایع

علی عیوضی^{۱*}، مهران عامری^۲، محمد شفيعی دهج^۳، هادی غائبی^۴

۱- دانشجو دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

کلمات کلیدی

انرژی زمین‌گرمایی
چرخه مایع سازی هیدروژن کلود
سیستم تولید چندانگانه
بهینه‌سازی
چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده

در این مطالعه یک سیستم تولید چندانگانه جدید مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی مورد بررسی قرار گرفته است. این سیستم شامل یک چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده، یک چیلر جذبی تک اثره و یک چرخه مایع سازی هیدروژن است که توان، حرارت، سرما و هیدروژن مایع را تولید می‌کند. در سیستم پیشنهادی با به‌کارگیری انرژی زمین‌گرمایی به‌عنوان منبع تأمین انرژی اولیه مورد نیاز برای تولید هیدروژن مایع باعث می‌شود که آلایندگی زیست‌محیطی به کمترین مقدار خود برسد. گاز هیدروژن تولید شده با الکترو لایزر در سیستم پیشنهادی توسط ترنسفورمر گرمای جذبی پیش‌سرمایش شده و توان مصرفی چرخه مایع سازی هیدروژن کاهش. در مطالعه حاضر تأثیر تغییرات پارامترهای عملکردی مهم روی کارکرد سیستم ارزیابی شده است. به علاوه عملکرد بهینه سیستم با استفاده از الگوریتم دو هدفه ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از معیار تصمیم‌گیری تاپسیس نقطه بهینه سیستم به دست می‌آید. تحلیل ترمودینامیکی کاملی در مطالعه حاضر صورت می‌گیرد و نتایج حاصل نشان می‌دهد که بازده انرژی ۴۲ درصد و بازده انرژی ۵۱ درصد برای سیستم پیشنهادی به دست می‌آید. ارزیابی اقتصادی صورت‌گرفته در مطالعه حاضر با استفاده از توابع هزینه به‌روز نشان می‌دهد که هزینه کل سیستم تولید چندانگانه ۲۷/۱۶ دلار بر گیگا ژول به‌دست می‌آید که توجیه اقتصادی بالای سیستم پیشنهادی را بیان می‌کند.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

* نویسنده مسئول

علی عیوضی

ایمیل

alieyvazi1996@gmail.com

مقدمه

فسیلی اثرات منفی زیادی از جمله افزایش دمای زمین، اثرات گلخانه‌ای و وارونگی دما بر محیط‌زیست داشته‌اند و باعث تخریب لایه اوزون و گسترش بسیاری از آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود [۲]. با استفاده از فناوری سوخت‌های پاک از منابع تجدید پذیر می‌توان این مشکلات را حل کرد. هیدروژن به‌عنوان جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی در بلندمدت قادر به تأمین پایدار منابع انرژی بوده و سازگاری بالایی با معیارهای زیست‌محیطی دارد [۳]. هیدروژن فراوان‌ترین عنصر جهان و دهمین عنصر فراوان در پوسته زمین می‌باشد. هیدروژن به‌عنوان سبک‌ترین عنصر شناخته‌شده در مقایسه با سایر سوخت‌ها

انرژی نیاز اساسی برای استمرار توسعه اقتصادی، تدارک و تأمین وسایل رفاه و آسایش زندگی بشری است. بنابر اعتقاد برخی از صاحب‌نظران بحران انرژی دیگری در شرف گسترش است. این بحران نه تنها مربوط به تأمین انرژی بلکه شامل ترکیب پیچیده‌ای از مشکلات زیست‌محیطی خواهد بود که علاوه بر اثرگذاری بر کیفیت زندگی اجتماعی مدرن امروز، توسعه اقتصادی جهان را دچار مخاطره خواهد کرد. افزایش بهره‌وری انرژی مزایای زیادی برای انسان به همراه داشته است. سرمایه‌گذاری در بهره‌وری انرژی و انعطاف‌پذیری سوخت منجر به توجه بیشتر به دستیابی به انرژی پایدار شده است [۱]. منابع انرژی



بررسی کردند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها شامل ۱۰ توربین بادی است و به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقیاس توربین‌های بادی شاهد بهبودهایی در مصرف انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن هستند. آن‌ها گزارش دادند که میزان مصرف انرژی و مصرف انرژی باد به ترتیب به ۱۱/۱۹ درصد و ۹۹/۱۳ درصد می‌رسد. تیمز و همکاران [۱۰] به ارزیابی سیستم انرژی با استفاده از پانل‌های فتوولتائیک با ترکیب ذخیره انرژی زیرزمینی پرداختند. سیستم پیشنهادی آن‌ها دارای یک نیروگاه فتوولتائیک ۱۲۱ مگاوات بر ثانیه و جایگزین‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی بوده و ظرفیت تولید انرژی الکتریکی به میزان ۵۱ گیگاوات ساعت در سال، گرمایش با ۲۳/۸ گیگاوات ساعت در سال و سرمایه‌اش با ۱/۱ گیگاوات ساعت در سال را دارد.

کیخاه و همکاران [۱۱] بهینه‌سازی و ارزیابی کارایی یک سیستم تولید چندگانه بر اساس زمین‌گرایی به همراه چرخه‌های رانکین آلی و تبخیر فشار مضاعف با مخلوط‌های ژئوتروپیک را انجام دادند. آن‌ها گزارش دادند که توربین بخار بیشترین تخریب انرژی را با ۹۹۱ کیلووات نشان داد، درحالی‌که شیر انبساط با تخریب انرژی ۱۱۴ کیلووات دنبال می‌شود. علاوه بر این، کندانسورها نقش قابل توجهی در تخریب انرژی داشته‌اند به صورتی که تقریباً ۲۱/۹۸ درصد از کل تخریب انرژی به آن‌ها نسبت داده شده‌است. علی‌رحمی و همکاران [۱۲] سیستمی را معرفی کردند که از منابع زمین‌گرایی برای تولید هیدروژن و الکتریسیته استفاده می‌کند. آن‌ها دریافتند که تبخیرکننده و اجزای الکترولیز غشای تبادل پروتون بیشترین میزان تخریب انرژی را دارا هستند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها ۴۶۹۶ مگاوات در ساعت برق تولید می‌کند که انرژی مورد نیاز سالانه ۱۶۰ خانواده را فراهم می‌کند. بامیسیل و همکاران [۱۳] با تحلیلی از اهداف چندگانه یک سیستم ترکیبی زمین‌گرایی-خورشیدی-بادی را بهینه کردند. آن‌ها مقادیر راندمان انرژی ۴۸/۶۱ درصد و بازده انرژی ۸۸/۳۱ درصد را برای سیستم مورد مطالعه دست یافتند که پس از بهینه‌سازی بازده انرژی و انرژی آن به ترتیب به ۵۱/۷۶ درصد و ۹۵/۰۸ درصد حاصل شد.

کاپیان و همکاران [۱۴] یک سیستم پمپ حرارتی خورشیدی/زمین‌گرایی را از جنبه انرژی و اقتصادی برای فراهم کردن ظرفیت گرمایشی و سرمایه‌سازی سازه‌های مسکونی ارزیابی کردند. آن‌ها گزارش دادند که یک پنل خورشیدی با مساحت ۳۵ مترمربع، با کسر خورشیدی ۳۱ درصد، می‌تواند با نرخ تورم بالای ۲۴ درصد، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. کائو و همکاران [۱۵] برای برآورد نیازهای برق جامعه یک سیستم خورشیدی-زمین‌گرایی را پیشنهاد

بیشترین میزان انرژی را در واحد وزن دارد. هیدروژن یکی از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده زمین بوده و نقش مهمی در زندگی دارد. امروزه از هیدروژن به‌عنوان خوراک در صنایع گوناگون استفاده می‌شود [۴]. احتمال وقوع یک بحران انرژی دیگر و نگرانی‌های ناشی از پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی، ضرورت‌های زیست‌محیطی، افزایش روزافزون مصرف انرژی و رشد جمعیت، مشکلات ناشی از مهاجرت و رشد بی‌رویه شهرنشینی نیروهای محرکه‌ای هستند که توجه به منابع تجدید پذیر و سیستم انرژی هیدروژنی را شدت می‌بخشد [۵]. برای استفاده از هیدروژن در حالت گازی چالش‌هایی وجود دارد که نیاز به مایع‌سازی آن برای کاربردهای عملی دارد. روش‌های مختلفی برای مایع‌سازی هیدروژن پیشنهاد شده و به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین مزایای استفاده از سوخت هیدروژن عدم آلاینده‌گی محصول حاصل از واکنش سوختن هیدروژن، میزان حرارت تولیدشده بالاتر در اثر احتراق در واحد وزن، اقتصادی بودن به دلیل میزان اختلاط آن با هوا جهت احتراق در گستره قابل‌تغییر، امکان خارج کردن هیدروژن نشت یافته در محیط بسته، غیر سمی بودن و ارزان بودن نسبت به سایر سوخت‌ها می‌باشد. هیدروژن مایع یک منبع انرژی سازگار با محیط‌زیست می‌باشد. ذخیره‌سازی هیدروژن مایع در مخازن یک فرآیند ساده است. لازم به یادآوری است که به مقداری انرژی برای تبدیل هیدروژن به حالت مایع نیاز است. موشک‌ها در برنامه فضایی عمدتاً از هیدروژن مایع به‌عنوان منبع سوخت استفاده می‌کنند. باید در نظر داشت که هیدروژن در درجه اول در حالت گازی خود یافت می‌شود، اما برای سهولت در به‌کارگیری به‌صورت مایع ذخیره و حمل می‌شود. در نتیجه، ضرورت بالایی برای سرمایه‌گذاری و پیشرفت فناوری برای تولید هیدروژن پاک مبتنی بر منابع تجدید پذیر زمین‌گرایی وجود دارد و مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۶و۷].

چن و همکاران [۸] سیستم جدیدی را معرفی کردند که انرژی باد را با ترکیبی از توربین‌های بادی و یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی دی‌اکسید کربن فشرده ادغام می‌کند. انرژی‌های تجدید پذیر ماهیت متناوبی دارند و با جفت شدن آن‌ها با سیستم‌های ذخیره انرژی به کارایی و توجیه اقتصادی مطلوبی می‌توان دست یافت. در طی بهینه‌سازی صورت گرفته روی سیستم پیشنهادی، بازده انرژی و هزینه واحد محصولات به ترتیب ۳۱/۱۲۱ درصد و ۳۱/۴۱ دلار به ازای هر گیگاژول به دست می‌آید. زو و همکاران [۹] یک سیستم انرژی با به‌کارگیری انرژی باد ترکیبی با ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن را

خالص، استخراج می‌شود. به دلیل توانایی استفاده کامل از اختلاف دمای بین منبع و چاه حرارتی، این سیکل در پردازش حرارتی صنعتی، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی خورشیدی و استفاده از گرمای آب نیروگاه‌های توانی بسیار کاربرد دارد. آن‌ها گزارش دادند که ظرفیت خالص تولید برق سیستم ارزیابی شده حدود ۲۹۸ کیلووات می‌باشد. علاوه بر این، در این نیروگاه ظرفیت سرمایه‌گذاری و گرمایش به ترتیب ۱۱۶۹ کیلوژول و ۱۷۸۳ کیلوژول است. سیستم‌های چندگانه تولید انرژی در سال‌های اخیر به‌عنوان راه‌حلی قوی برای جلوگیری از اتلاف انرژی معرفی شده‌اند. هدف از این تحقیق کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و درعین حال افزایش عملکرد سیستم می‌باشد. این تحقیق یک سیستم نوآورانه را معرفی می‌کند که واحدهای چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده، یک منبع انرژی زمین‌گرمایی، یک الکترولیز PEM، یک سیستم پیش‌خنک‌کننده جذبی و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن را ترکیب می‌کند. ترکیب جدیدی در چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده با استفاده از مبدل داخلی و ژنراتور مبدل حرارتی بخار معرفی شده‌است و سیال عامل ژئوتروپیک در این چرخه استفاده شده‌است که عملکرد ترمودینامیکی مطلوبی را نشان می‌دهد. ژئوتروپیک مخلوطی از سه نوع مبرد با درصدهای مختلف است که ساختار آن شبیه نیست چرا که بعد از اختلاط در صد تشکیل‌دهنده عناصر آن در حالت مایع با درصد عناصر در حالت گاز متفاوت است. این مبردها در زمان تغییر فاز دادن فشار و دمای ثابتی ندارند.

نوآوری این تحقیق بر این اساس است که با بازیابی حرارت اتلافی در چرخه رانکین آلی توان موردنیاز برای تولید هیدروژن در الکترولیز فراهم شده و به‌منظور کاهش مصرف انرژی در سیکل مایع‌سازی، از سیکل پیش‌خنک‌کننده جذبی استفاده شده‌است و دو پیش‌خنک‌کننده حمام نیتروژن مایع با سیکل مایع‌سازی ادغام‌شده‌اند تا بازدهی سیستم را افزایش دهد. این مطالعه شامل بهینه‌سازی دو هدفه برای شناسایی بهترین و بهینه‌ترین شرایط عملکرد برای سیستم است. این تحقیق شامل یک تحلیل اقتصادی برای ارزیابی بهای تمام‌شده واحدها و اجزای سیستم برای ارائه سیستمی با توجیه اقتصادی بالا می‌باشد. این مطالعه به دنبال ایجاد یک راه‌حل انرژی پایدار از طریق توسعه و بهینه‌سازی یک سیستم جدید زمین‌گرمایی است.

۲- توصیف سیستم

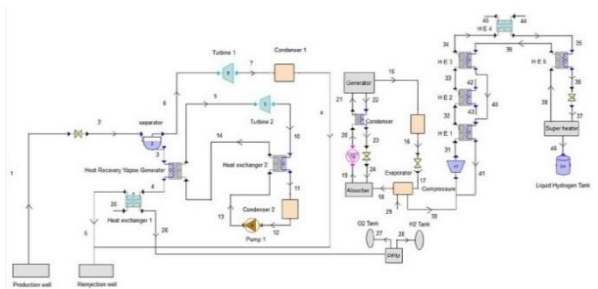
شکل ۱ شماتیک سیستم زمین‌گرمایی بررسی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. این سیستم پیشنهادی دارای یک الکترولیز، یک واحد

کردند. سیستم طراحی شده امکان فروش برق اضافی را به شبکه فراهم می‌کند و هزینه‌های جاری سیستم با این امر جبران می‌شود. گولر و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی و خورشیدی با مدل‌های مختلفی از کلکتورهای سهموی و صفحه تخت را مطالعه کردند. آن‌ها با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به همراه تابش خورشیدی، ظرفیت گرمایی موردنیاز برای ساختمان‌ها را فراهم کردند. ژانگ و همکاران [۱۷] با ترکیب زغال‌سنگ و انرژی زمین‌گرمایی یک سیستم تولید برق ارائه کردند. تجزیه و تحلیل سیستم پیشنهادی آن‌ها پتانسیل افزایش بازده ترمودینامیکی نیروگاه زمین‌گرمایی توسط مهار بخار دمای متوسط از توربین بخار و پیش‌گرم کردن چرخه رانکین آلی با استفاده از بخار خروجی را نشان داد.

تکانات و همکاران [۱۸] یک سیستم چند نسلی را معرفی کردند که با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی به‌عنوان منبع انرژی اولیه امکان تولید برق و هیدروژن را فراهم می‌کند. این سیستم عملکرد مؤثری را نشان داد و بازده انرژی و اگزرژی را به ترتیب ۵۱/۵۳ و ۵۹/۱۷ درصد به دست آورد. خوش‌منش و همکاران [۱۹] یک سیستم خورشیدی-زمین‌گرمایی را باهدف تولید برق، هیدروژن و آب شیرین پیشنهاد دادند. یافته‌های آن‌ها معیارهای عملکرد قابل‌توجهی از جمله بازده انرژی ۲۳/۸۷ درصد، بازده اگزرژی ۲۸/۲۱ درصد، هزینه سالانه ۰/۱۴۴ دلار در ساعت، و تأثیر زیست‌محیطی ۰/۰۲۴ دلار در هر کیلووات ساعت برای سیستم خورشیدی-ژئوترمال را نشان داد. آساره و همکاران [۲۰] تولید هیدروژن و تولید برق از طریق پیل سوختی را با ادغام یک چرخه رانکین آلی دوگانه با یک چیلر جذبی با انرژی زمین‌گرمایی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کل نرخ تخریب اگزرژی سیستم زمین‌گرمایی پیشنهادی ۱۸۴۰/۷ کیلووات ساعت بود و هزینه کل سیستم بالغ بر ۵۱/۷۳ دلار در ساعت به دست می‌آید.

یلماز و همکاران [۲۱] مدلی برای یک نیروگاه زمین‌گرمایی ادغام‌شده با تولید هیدروژن معرفی کردند. مطالعه آن‌ها یک چرخه تولید چندگانه با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی را تجزیه و تحلیل کرد که شامل یک چرخه کالینا، یک چرخه رانکین آلی، یک ژنراتور ترموالکتریک، یک سیستم تبرید جذبی دو اثره، یک خشک‌کن، یک آبگرم کن خانگی و نمک‌زدایی چند اثره است. چرخه کالینا از محلولی با دو سیال با ماهای جوش متفاوت برای سیال کاری استفاده می‌کند. از آنجایی که این محلول در محدوده بزرگ‌تری از دما می‌جوشد، در مقایسه با چرخه رانکین، گرمای بیشتری از منبع نسبت به سیال کاری

الکترولیز را به هیدروژن مایع تبدیل می‌کند. در این سیستم زمین‌گرمایی پیشرفته، با استفاده از چرخه رانکین آلی الکتریسیته تولید می‌شود و به وسیله الکترولیز غشای تبادل پروتون گاز هیدروژن تولید می‌شود. استفاده از سیال زئوتروپیک به دلیل کارایی بالا، دوام اقتصادی و حداقل تأثیرات زیست‌محیطی در چرخه رانکین اصلاح‌شده، باعث بهبود کارایی سیستم و پایداری زیست‌محیطی می‌شود.



شکل ۱: شماتیک سیستم پیشنهادی

۳- روش‌شناسی

در این مطالعه یک مدل‌سازی کامل ترمودینامیکی و اقتصادی از سیستم تولید چندگانه معرفی شده است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار EES که شامل توابع مربوط به خواص ترمودینامیکی بوده استفاده می‌شود. معادلات ترمودینامیکی در حالت ثابت و به‌طور هم‌زمان حل می‌شوند. در قسمت تحلیل اقتصادی تمامی قیمت‌ها و نرخ‌های هزینه را به‌روز اعمال نموده تا توجیه سیستم پیشنهادی به‌خوبی انجام شود. سپس یک تحلیل پارامتری برای ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای کارکردی در عملکرد اصلی سیستم انجام می‌شود. همچنین، الگوریتم دو هدفه ژنتیک برای دستیابی به عملکرد بهینه روی سیستم مورد بررسی انجام شده است به صورتی که بازده انرژی و نرخ هزینه توابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی هستند.

معیار تصمیم‌گیری تاپسیس برای تعیین نقطه بهینه سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. روش تاپسیس یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که به رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌پردازد. تاپسیس تکنیکی برای اولویت سفارش از طریق شباهت به راه‌حل ایده‌آل است و ارزش نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل مثبت را نشان می‌دهد. این مطالعه ترکیب بهینه پارامترهای فرآیند را با استفاده از کوتاه‌ترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل نشان می‌دهد.

مفروضات زیر برای مدل‌سازی سیستم ارزیابی شده در نظر گرفته می‌شوند [۲۲]:

- شرایط حالت پایدار برای تمام اجزای سیستم در نظر گرفته شده است.

زمین‌گرمایی، یک چرخه رانکین جدید، یک چرخه پیش‌خنک‌کننده جذبی و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن است. برای بهبود کارایی چرخه رانکین، با استفاده از مبدل حرارتی داخلی و ژنراتور مبدل حرارتی بخار ترکیب جدیدی ارائه شده است. آب گرم با عبور از شیر انبساط به‌عنوان سیال زمین‌گرمایی وارد جداکننده می‌شود. قسمت بخار به سمت توربین ۱ هدایت می‌شود، در حالی که بخش مایع وارد مبدل حرارتی می‌شود. در این چرخه، یک سیال کاری با نقطه جوش کم، بخار موردنیاز برای توربین ۲ را در اواپراتور تولید می‌کند. مخلوط داغ بخار و آب که از توربین ۱ خارج می‌شود در چگالنده ۱ خنک می‌شود و سپس همراه با آب آزاد شده از مبدل حرارتی به چاه زمین‌گرمایی بازگردانده می‌شود. سیال کاری پس از خنک شدن در چگالنده ۲، وارد توربین ۲ شده سپس توسط پمپ به گردش در می‌آید و با سیال زمین‌گرمایی تبادل حرارتی می‌کند. یک مبدل داخلی در چرخه رانکین آلی گنجانده شده است که با انتقال بخشی از گرمای خروجی از توربین ۲ به سیال خروجی از پمپ، اتلاف حرارت را در کندانسور ۲ به حداقل می‌رساند. گاز هیدروژن تولیدشده از طریق الکترولیز با استفاده از یک چیلر جذبی تک‌اثره از پیش‌خنک می‌شود که منجر به کاهش مصرف انرژی برای مایع‌سازی هیدروژن می‌شود. پس از آن، گاز هیدروژن وارد کمپرسور چرخه کلود می‌شود که در مطالعه حاضر جهت مایع‌سازی هیدروژن این چرخه به‌کاررفته است. چرخه کلود به‌عنوان پایه همه نیروگاه‌های بزرگ مایع‌سازی هیدروژن در سراسر جهان شناخته می‌شود. در این روش، هیدروژن گازی از طریق چندین مبدل حرارتی خنک می‌شود. سپس گاز پرفشار به دو جریان جداگانه تقسیم می‌شود. در مبدل حرارتی ۱، گاز هیدروژن با استفاده از بخار سردی که از جداکننده باز می‌گردد، از قبل خنک می‌شود، در حالی که هیدروژن باقی‌مانده توسط بخار نیتروژن در مبدل حرارتی ۲ خنک می‌شود. هیدروژن در حمام نیتروژن مایع غوطه‌ور می‌شود. هیدروژن هنگام عبور از مبدل حرارتی خنک می‌شود. سپس جداکننده مایع را از بخار جدا می‌کند و امکان ذخیره هیدروژن مایع در منبع فراهم می‌شود. واحد زمین‌گرمایی به‌عنوان منبع انرژی اولیه برای سیستم عمل می‌کند و انرژی حرارتی را از زیر سطح زمین استخراج می‌کند. علاوه بر این، ژنراتور مبدل حرارتی با بازیابی انرژی، بازده کلی چرخه رانکین اصلاح‌شده را افزایش می‌دهد. در این فرآیند، الکترولیز غشای تبادل پروتون با الکترولیز آب، گاز هیدروژن و اکسیژن تولید می‌کند. الکتریسیته موردنیاز برای الکترولیز آب از چرخه رانکین آلی تأمین می‌شود. چرخه کلود گاز هیدروژن تولیدشده از طریق

جدول ۱: داده‌های اولیه ترمودینامیکی مورد استفاده برای مدل سازی

مقدار	پارامتر
۱/۲	دبی جرمی سیال زمین گرمایی (kg/s)
۱۰۰	فشار چاه تولید زمین گرمایی (kPa)
۱۶۲	دمای چاه تولید زمین گرمایی (c)
۶۹	دمای چاه تزریق مجدد زمین گرمایی (c)
۳۰	فشار چاه تزریق مجدد زمین گرمایی (kPa)
۰/۸	راندمان ایزنتروپیک توربین (%)
۰/۸۵	راندمان ایزنتروپیک پمپ (%)
۰/۸	نرخ جریان جرمی توربین ۱ (kg/s)
۸۰	دمای ورودی الکترولایزر (c)
۱۰۰	فشار ورودی الکترولایزر (kPa)

معادله نابودی انرژی	اجزای سیستم
$\dot{E}_{18} + \dot{E}_{24} - \dot{E}_{19} - Q_{abs, LiBr}$	جاذب سیکل خنک کننده جذبی
$\dot{E}_{21} - \dot{E}_{15} - \dot{E}_{22} + Q_{Gen, LiBr}$	ژنراتور سیکل جذبی
$\dot{E}_{15} - \dot{E}_{16} - Q_{Cond, LiBr}$	کندانسور سیکل جذبی
$\dot{E}_{17} - \dot{E}_{18} + Q_{Evap, LiBr}$	اوپراتور سیکل جذبی
$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{23} - \dot{E}_{22} - \dot{E}_{20}$	مبدل حرارتی بخار جذبی
$\dot{E}_7 - \dot{E}_8 + Q_{Cond, ORC1}$	کندانسور سیکل رانکین ۱
$\dot{E}_{13} - \dot{E}_{12} + W_{Pump, ORC}$	پمپ سیکل رانکین
$\dot{E}_6 - \dot{E}_7 - W_{Turb, ORC1}$	توربین سیکل رانکین ۱
$\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12} + Q_{Cond, ORC2}$	کندانسور سیکل رانکین ۲
$\dot{E}_{10} - \dot{E}_9 - W_{Turb, ORC2}$	توربین سیکل رانکین ۲
$\dot{E}_{27} + \dot{E}_{28} -$	الکترولایزر
$\dot{E}_{26} + W_{Electroliz, PEM}$	
$\dot{E}_5 + \dot{E}_{26} - \dot{E}_4 - \dot{E}_{25}$	مبدل حرارتی ۱
$\dot{E}_{13} + \dot{E}_{10} - \dot{E}_{14} - \dot{E}_{11}$	مبدل حرارتی ۲
$\dot{E}_6 + \dot{E}_{38} - \dot{E}_7 - \dot{E}_{39}$	گرم کن الکترولایزر
$\dot{E}_4 + \dot{E}_9 - \dot{E}_3 - \dot{E}_{14}$	ژنراتور مبدل حرارتی بخار
$W_{Comp rev} - W_{Comp act}$	کمپرسور چرخه کلود
$\dot{E}_{31} + \dot{E}_{40} - \dot{E}_{41} - \dot{E}_{32}$	مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود
$\dot{E}_{33} + \dot{E}_{43} - \dot{E}_{42} - \dot{E}_{32}$	مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود
$\dot{E}_{40} + \dot{E}_{34} - \dot{E}_{33} - \dot{E}_{39}$	مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود
$\dot{E}_{45} + \dot{E}_{35} - \dot{E}_{34} - \dot{E}_{44}$	مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود
$\dot{E}_{35} + \dot{E}_{38} - \dot{E}_{36} - \dot{E}_{39}$	مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود

• دمای سکون ۲۰ درجه سلسیوس و فشار سکون ۱۰۱ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

• اثرات افت فشار و انتقال حرارت در اجزا نادیده گرفته شده است.

• تأثیر انرژی‌های جنبشی و پتانسیل بر عملکرد سیستم نادیده

گرفته می‌شود.

• بازده ایزنتروپیک ثابت برای پمپ‌ها، توربین‌ها و کمپرسورها در

نظر گرفته شده است.

۴- تحلیل ترمودینامیکی سیستم

در ارزیابی ترمودینامیکی سیستم، اجزا به‌عنوان حجم کنترل

مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس مفروضات ترمودینامیکی که قبلاً

بیان شد، توازن جرم و انرژی برای سیستم پیشنهادی با استفاده از

معادلات ارائه شده در زیر انجام می‌شود [۲۴]: اجزای مختلف سیستم

$$\sum m_i = \sum m_e \quad (1)$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad (2)$$

جدول ۱ داده‌های ورودی تحلیل ترمودینامیکی را ارائه می‌دهد.

ضریب عملکرد ترانسفورمر حرارتی جذبی به‌صورت زیر ارائه

می‌شود:

$$COP = \frac{Q_{absorber}}{Q_{generator} + Q_{evaporator}} \quad (3)$$

توان تولیدشده توسط چرخه رانکین اصلاح شده با استفاده از

معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{W}_{ORC} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump} \quad (4)$$

مدل سازی الکترولایزر PEM با استفاده از معادله‌های ارائه شده در

زیر تعیین می‌شود [۲۴ و ۲۵]:

$$\dot{W}_{PEM} = 0.25 \times \dot{W}_{Total} \quad (5)$$

مقدار هیدروژن تولیدشده با استفاده از فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{M}_{H2out} = a_{H2} \times \dot{W}_{PEM}^{b_{H2}} + c_{H2} \quad (6)$$

$$\dot{N}_{H2out} = 3600 \times \dot{M}_{H2out} \quad (7)$$

ضرایب a، b و c به ترتیب مقادیر ۳/۳۸۲، ۰/۹۷ و ۵/۹۲۸ می‌باشد.

بازده انرژی و انرژی و اگزرژی سیستم را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه

کرد:

$$\eta_{energy} = \frac{\dot{W}_{ORC} + \dot{W}_{chiller} + \dot{W}_{clauder} - \dot{W}_{PEM}}{m_1 h_1} \quad (6)$$

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{W}_{ORC} + \dot{W}_{chiller} + \dot{W}_{clauder} - \dot{W}_{PEM} + \dot{E}_{x35} + \dot{E}_{cooling}}{m_1 e_1} \quad (7)$$

جدول ۲ معادلات تخریب انرژی را در اجزای مختلف سیستم

تولید هم‌زمان ارائه می‌دهد.

۵- تحلیل اقتصادی

انرژی و هزینه‌ها در سیستم پیشنهادی، از یک سری روابط که در جدول ۳ آمده است استفاده شده است [۳۱]. ایجاد تعادل بین این روابط برای دستیابی به اهداف تولید انرژی موردنظر و درعین حال کنترل هزینه‌ها ضروری است. به‌کارگیری این روابط عملکرد کلی سیستم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، آن‌ها نقش مهمی در حصول اطمینان از اینکه مدیریت هزینه به‌طور مؤثر موردتوجه قرار می‌گیرد، ایفا می‌کنند.

۶- بهینه‌سازی سیستم با الگوریتم ژنتیک

این مطالعه بر روی یک رویکرد بهینه‌سازی دو هدفه برای شناسایی بهترین شرایط برای عملکرد بهینه سیستم تمرکز دارد. هدف از فرآیند بهینه‌سازی در مطالعه حاضر یافتن کارآمدترین و مقرون به صرفه‌ترین پیکربندی برای اجزای سیستم در شرایط ایدئال است. با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک دو هدفه، همه اجزای سیستم برای ایجاد بهینه‌ترین شرایط برای سیستم ارزیابی می‌شود. در این تحقیق، بهینه‌سازی دو هدفه جهت به حداکثر رساندن بازده انرژی و به حداقل رساندن نرخ هزینه کل هدف‌گذاری شده است تا بهینه‌ترین عملکرد برای سیستم حاصل شود. بعد از فرآیند بهینه‌سازی تعیین نقطه بهینه سیستم با نمودار پارتو نشان داده می‌شود. متغیرهای بهینه‌سازی برای سیستم شامل نسبت فشار کمپرسور و بازده ایزنتروپیک توربین و کمپرسور است.

۷- اعتبارسنجی

سیستم پیشنهادی در این تحقیق آرایش جدیدی از سیستم تولید هم‌زمان را معرفی می‌کند. برای اعتبارسنجی این تحقیق، مطالعه صورت گرفته توسط ارورا و همکاران [۳۲] انجام شد و با نتایج مطالعه انجام‌شده با مطالعه مرجع معرفی‌شده در جدول ۴ مقایسه شد. روش تحلیل این تحقیق به این صورت است که فرآیندهای ذکرشده با استفاده از شرایط و مفروضات اولیه مانند دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال و مقایسه نتایج با کار مرجع معرفی‌شده می‌باشد. نتایج مقایسه تفاوت جزئی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده دقت بالای اعتبارسنجی است.

ترموکونومیک رشته‌ای از مهندسی است که ارزیابی ترمودینامیکی را از طریق تحلیل انرژی با اصول اقتصادی ادغام می‌کند و بینش‌های ارزشمندی را برای دستیابی به عملکرد بهینه سیستم به طراحان ارائه می‌دهد. هدف تحلیل ترموکونومیک در سیستم‌های ترمودینامیکی تعیین هزینه واحد خروجی انرژی با ارزیابی تلفات انرژی در هر جزء از سیستم است. در تحلیل اقتصادی، معادله تعادل هزینه حالت پایدار سیستم با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$\dot{C}_{P,total} = \dot{C}_{F,total} + \dot{Z}_{CI,total} + \dot{Z}_{OM,total} \quad (10)$$

توابع مختلفی برای ارزیابی ترمواقصدی سیستم‌های ترمودینامیکی وجود دارد [۲۶]. در این مطالعه، روابط برای هزینه تولید انرژی (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) برای سیستم به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$LCOE = \frac{AOC}{(W_{total} + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad (11)$$

$$LCOH = \frac{AOC}{((LHV_{H_2} \dot{m}_{H_2}) + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad (12)$$

در این سناریوها، τ نشان‌دهنده ساعات عملیاتی سالانه سیستم است که ۸۰۰۰ ساعت در سال تخمین زده می‌شود. محاسبه هزینه عملیاتی سالانه (AOC) به شرح زیر است:

$$AOC = (TOC \times \phi \times CRF) \quad (13)$$

در این زمینه، کل هزینه‌های عملیاتی (TOC) تمام هزینه‌های عملیاتی را در برمی‌گیرد، درحالی‌که ϕ نشان‌دهنده ضریب تعمیر و نگهداری است که به مقدار ۱/۰۶ است [۲۸]. متغیرهای i و n به ترتیب نشان‌دهنده نرخ بهره و مدت‌زمان بهره‌برداری هستند. ضریب بازگشت سرمایه با پارامتر CRF نشان داده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۹]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (14)$$

نرخ هزینه از طریق عوامل اقتصادی مانند ضریب بازگشت سرمایه و نرخ بهره تعیین می‌شود که امکان ارزیابی دقیق‌تری از هزینه سیستم را فراهم می‌کند. درنهایت، هزینه کلی سیستم با تقسیم هزینه سالانه بر تعداد کل ساعات کار در یک سال محاسبه می‌شود که معمولاً ۷۴۴۶ ساعت در نظر گرفته می‌شود [۳۰].

$$Z_{Total} = (TOC \times \phi \times CRF) / t \quad (15)$$

در این زمینه، 'i' نشان‌دهنده نرخ بهره است، درحالی‌که 'n' نشان‌دهنده دوره عملیاتی سیستم است. برای ایجاد تعادل بین کارایی

جدول ۴: اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی با کار ارورا و همکاران [۳۲]

نتایج مرجع	نتایج به دست آمده	پارامتر
۲۹۴۵/۲۶	۲۹۴۳	گرمای جاذب چرخه جذبی (kw)
۲۵۰۵/۹۱	۲۵۰۶	گرمای کندانسور چرخه جذبی (kw)
۲۳۵۵/۴	۲۳۵۵	گرمای اواپراتور چرخه جذبی (kw)
۰/۷۶۰۹	۰/۷۹	ضریب عملکرد چرخه جذبی (/.)
۷۰/۴۷۸	۷۰/۱۶	نابودی انرژی جاذب چرخه جذبی (kw)
۶/۰۶۶	۶/۶۰۶	نابودی انرژی کندانسور (kw)
۸۶/۲۷۵	۸۶/۲۸	نابودی انرژی اواپراتور (kw)

جدول ۳: توابع هزینه اجزای مختلف سیستم

تایع هزینه	اجزای سیستم
$z = 17500 \times \left(\frac{A_{Gen}}{100}\right)^{0.6}$	ژنراتور سیکل خنک کننده جذبی
$z = 8000 \times \left(\frac{A_{Cond}}{100}\right)^{0.6}$	کندانسور سیکل خنک کننده جذبی
$z = 16000 \times \left(\frac{A_{Absorb}}{100}\right)^{0.6}$	جاذب سیکل خنک کننده جذبی
$z = 16000 \times \left(\frac{A_{Evap}}{100}\right)^{0.6}$	اواپراتور سیکل خنک کننده جذبی
$z = 12000 \times \left(\frac{A_{SHE}}{100}\right)^{0.6}$	مبدل حرارتی بخار سیکل خنک کننده جذبی
$z = 516.62 \times (A_{Cond})^{0.6}$	کندانسور چرخه رانکین آلی
$z = 4750 \times (W_{Turb})^{0.75}$	توربین چرخه رانکین آلی
$z = 200 \times (W_{Pump})^{0.65}$	پمپ سیکل رانکین آلی
$z = 130 \times \left(\frac{A_{heat\ exchanger}}{0.093}\right)^{0.78}$	مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی ۱
$z = 4122 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.6}$	مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی ۲
$z = 7900 \times (W_{Comp})^{0.62}$	کمپرسور سیکل رانکین ارگانیک
$z = 8500 + 409 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.8}$	مبدل حرارتی سیکل کلود
$Z = 1000 \times (W_{elec})$	چرخه الکترولیز PEM

۸- نتایج و بحث

سیستم پیشنهادی از انرژی زمین گرمایی برای تأمین انرژی اولیه از طریق یک رویکرد نوآورانه استفاده می کند و با اصلاح چرخه رانکین آلی توسعه می یابد که منجر به یک سیستم جدید می شود. این سیستم با استفاده از نرم افزار EES بر اساس معیارهای طراحی خاص شبیه سازی شده است. یافته های حاصل از تحلیل ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج تحلیل ترمودینامیکی

مقدار	پارامتر
۴۲	بازده انرژی سیستم (/.)
۵۱	بازده انرژی سیستم (/.)
۴/۸۸	نرخ تولید هیدروژن (kg/hr)
۴۷۵/۱	توان خروجی چرخه الکترولیز (kw)
۱۳/۷۷	توان خروجی چرخه مایع سازی (kw)
۱۴۲۵	توان خروجی کل (kw)

سیستم پیشنهادی تحت یک تحلیل اقتصادی قرار گرفت تا کارایی اقتصادی بالای خود را از طریق توابع هزینه به روز نشان دهد. جدول ۷ نتایج نرخ‌های هزینه برای اجزای مختلف سیستم را نشان می‌دهد.

جدول ۷: نتایج نرخ هزینه اجزای مختلف سیستم

مقدار	پارامتر
۳۱۹۹۲	جاذب چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)
۱۱۷۸	پمپ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)
۴۰۳۲۷۵	توربین ۱ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)
۱۱۲۹۱	کندانسور چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)
۱۷۴۸۴	ژنراتور چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)
۹۳۲۲	مبدل حرارتی بخار چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)
۱۱۸۵۷۵۵	توربین ۲ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)
۲۱۲۱۳	کندانسور ۱ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)
۵۰۳۸۶۵۴	الکتروولایزر (\$/GJ)
۸۶۹۸	کندانسور ۲ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)
۳۶۱۳۴	اوپراتور چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)
۴۰۱۵۲	کمپرسور چرخه کلود (\$/GJ)
۸۵۴۴	مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود (\$/GJ)
۸۵۴۹	مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود (\$/GJ)
۸۵۲۰	مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود (\$/GJ)
۸۵۱۶	مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود (\$/GJ)
۸۶۰۹	مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود (\$/GJ)

جدول ۸ برخی از نتایج اساسی را برای تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد. نرخ کل هزینه سیستم ۳۷/۱۶ دلار بر گیگا ژول است که نشان‌دهنده کارایی اقتصادی قابل توجه سیستم پیشنهادی است. هزینه تولید برق (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) با مقادیر ۱۹/۸ سنت در هر کیلووات ساعت و ۲۴/۳۹ دلار به ازای هر کیلوگرم، فاکتورهای حیاتی در ارزیابی اقتصادی سیستم هستند.

جدول ۸: نتایج ارزیابی اقتصادی

مقدار	پارامتر
۱۹/۸	هزینه تولید برق (cent/kwh)
۲۴/۳۹	هزینه تولید هیدروژن (\$/kg)
۱۸	دوره بازگشت سرمایه
۳۷/۱۶	هزینه کل سیستم (\$/GJ)

در تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی منبع زمین‌گرمایی، آب به عنوان سیال عامل عمل می‌کند. یافته‌های حاصل از ارزیابی ترمودینامیکی نشان می‌دهد که توان خروجی سیستم مورد مطالعه ۱۴۲۵ کیلووات است. بازده انرژی و بازده انرژی سیستم به ترتیب ۴۲٪ و ۵۱٪ اندازه‌گیری شده است. یافته‌ها حاکی از این است که اتلاف انرژی قابل توجهی در واحد رانکین اصلاح‌شده و در واحد الکتروولایزر رخ می‌دهد. قابل ذکر است که میان اجزای سیستم بیشترین تخریب انرژی را توربین چرخه رانکین اصلاح‌شده و الکتروولایزر و در مقابل، پمپ‌ها کمترین میزان تخریب انرژی را در بین اجزای سیستم دارند. محاسبات نشان می‌دهد تخریب انرژی کل برای سیستم ۵۶۱۴۰ کیلووات حاصل شده است. مقادیر تخریب انرژی برای اجزای مختلف سیستم به تفصیل در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: نتایج نابودی انرژی اجزای مختلف سیستم

مقدار	پارامتر
۴۷۲۹۵	الکتروولایزر (kw)
۸۶/۲۹	اوپراتور چرخه جذب (kw)
۲/۱۹۶	پمپ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw)
۱۲۵۵	توربین ۱ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw)
۱۸۴۹	توربین ۲ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw)
۶/۶۲	کندانسور چرخه جذب (kw)
۲۸۳۱	کندانسور ۱ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw)
۲۵۲	کندانسور ۲ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw)
۴۹/۹۶	ژنراتور چرخه جذب (kw)
۶/۹۳۴	شیر انبساط چرخه جذب (kw)
۶/۳۳	مبدل حرارتی بخار چرخه جذب (kw)
۵/۰۹۴	مبدل حرارتی ۱ (kw)
۶/۳۲۸	مبدل حرارتی ۲ (kw)
۸۴۰/۵	ژنراتور مبدل حرارتی بخار (kw)
۷/۲۷۷	کمپرسور چرخه کلود (kw)
۸۱/۱۶	مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود (kw)
۱۴/۰۷	مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود (kw)
۷۹/۶۷	مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود (kw)
۶/۳۲۸	مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود (kw)
۱۱۷/۴	مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود (kw)
۵۶۱۴۰	کل سیستم (kw)

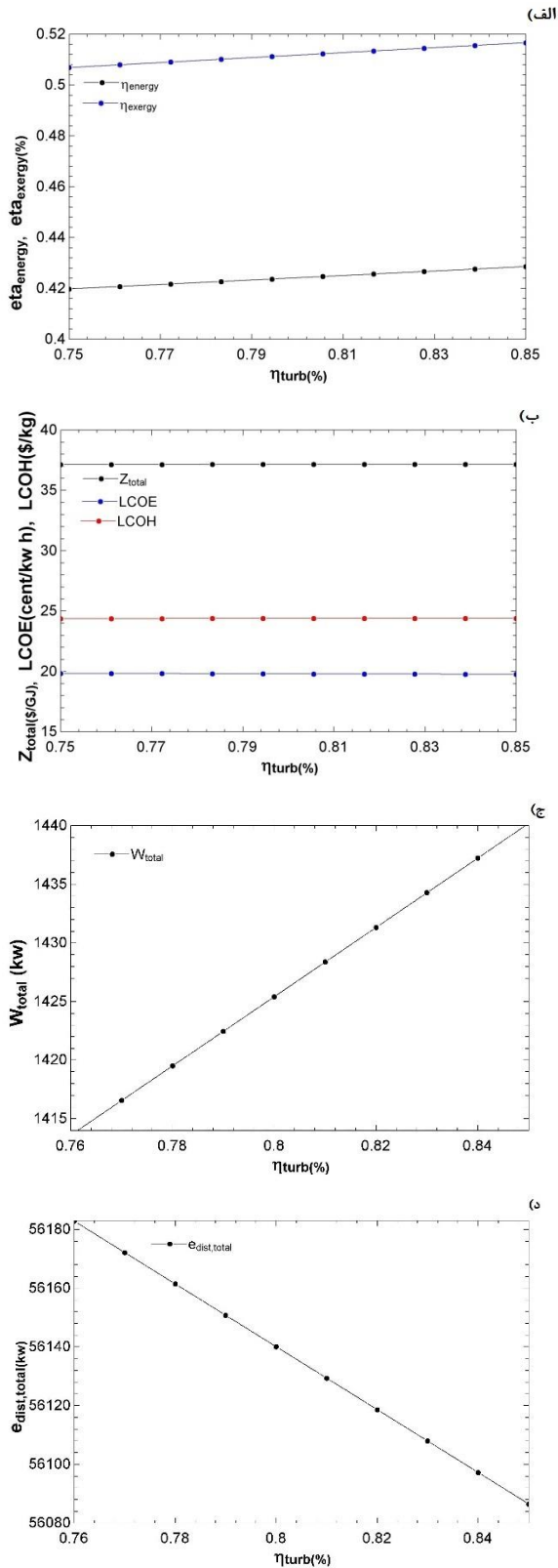
۸-۱- تحلیل پارامتریک

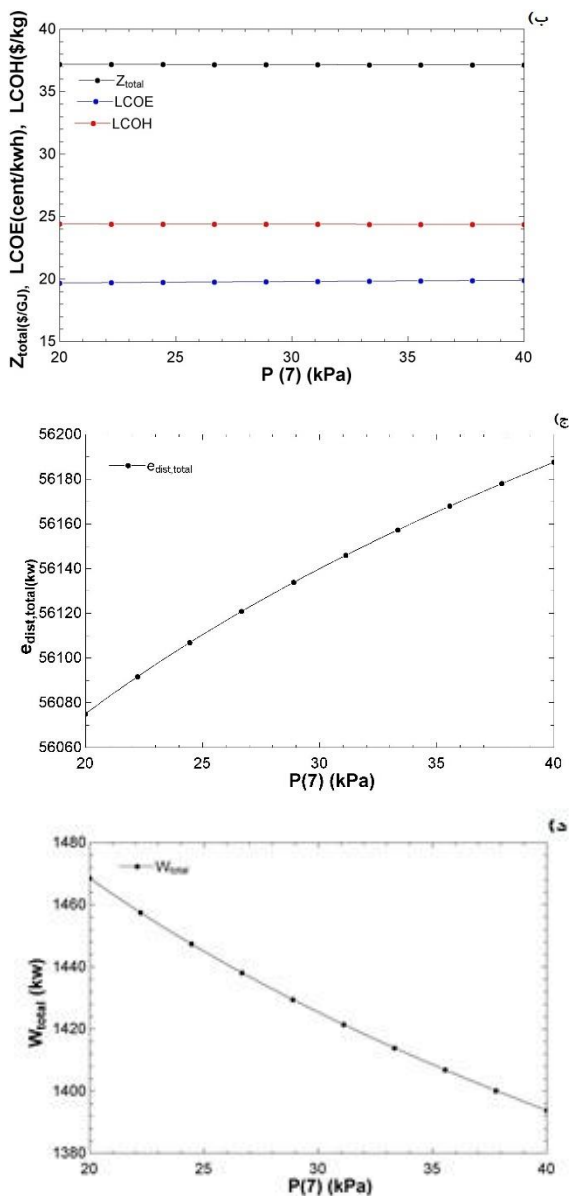
انرژی و انرژی آن را نیز بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، منجر به کاهش تخریب انرژی در سیستم می‌شود و در نتیجه توان خروجی افزایش می‌یابد.

تجزیه و تحلیل پارامتریک یک تکنیک مؤثر برای ارزیابی عملکرد یک سیستم در شرایط مختلف است که درک کاملی از سیستم مورد نظر ارائه می‌دهد. سیستم پیشنهادی بررسی می‌کند که چگونه پارامترهای طراحی کلیدی، از جمله بازده ایزنتروپیک توربین، دما و فشار خروجی توربین اول، و دمای ورودی توربین دوم، بر محصولات خروجی سیستم تأثیر می‌گذارند.

۸-۱-۱- اثر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم

شکل ۲ چگونگی تأثیر تغییرات راندمان توربین بر توان تولیدی سیستم، تخریب کل انرژی، نرخ هزینه و همچنین راندمان انرژی و انرژی را تحلیل می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش بازده توربین از ۰/۷۵ به ۰/۸۵ منجر به افزایش توان خالص کلی سیستم می‌شود. افزایش توان را می‌توان به تأثیر مطلوب بازده توربین بر بازده کار نسبت داد. در این سیستم‌ها، توربین نقش بسزایی در تولید انرژی الکتریکی دارد. از آنجایی که الکترولایزر با استفاده از الکتریسیته تولیدشده توسط توربین کار می‌کند، افزایش تولید توان باعث افزایش عملکرد الکترولایزر می‌شود و در نتیجه تولید هیدروژن در سیستم را افزایش می‌دهد. افزایش راندمان توربین منجر به بهبود راندمان انرژی و انرژی سیستم، در کنار کاهش هزینه تولید برق، هزینه تولید هیدروژن و نرخ هزینه کل سیستم شده است. افزایش انرژی نشان داده شده در این نمودار را می‌توان به همبستگی مستقیم بین بازده انرژی و توان خروجی سیستم نسبت داد. با افزایش کار سیستم، انرژی آن نیز افزایش می‌یابد. افزایش نرخ هزینه را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که هزینه‌های سیستم در کنار قدرت کلی سیستم رشد می‌کنند و تجهیزات بزرگ‌تر و جامع‌تری را ضروری می‌کنند. علاوه بر این، سایر عوامل مؤثر در افزایش نرخ هزینه عبارتند از: افزایش کلی در هزینه‌های تولید، هزینه‌های انرژی و تلفات متحمل شده در طول زمان از کارافتادن سیستم. مهم است که تأکید شود هزینه‌های انجام شده برای هر زیرسیستم ادغام شده در سیستم اصلی، کارایی تولید را کم‌هزینه‌تر کرده است و منجر به افزایش کلی هزینه‌های سیستم می‌شود. انرژی به حداکثر کار قابل استخراج از سیستم اشاره دارد. به عبارت دیگر، کار مفید تولیدشده توسط توربین در این سیستم را نشان می‌دهد. افزایش راندمان توربین به طور مثبت بر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تأثیر می‌گذارد و در عین حال راندمان





شکل ۳: تأثیر تغییرات فشار در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم الف) بازده انرژی و اگزرژی (ب) نرخ هزینه (ج) نابودی اگزرژی (د) توان

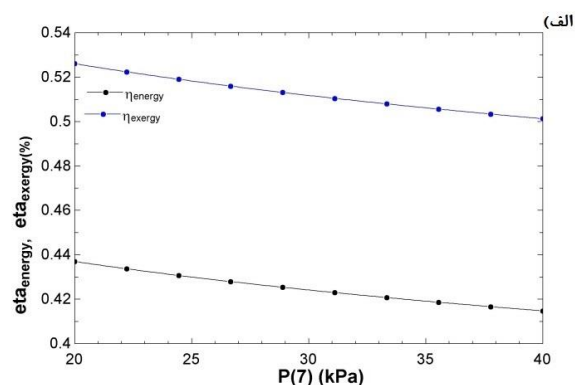
۸-۱-۴ اثر تغییرات دما در خروجی مولد بخار بازیافت حرارتی روی عملکرد سیستم

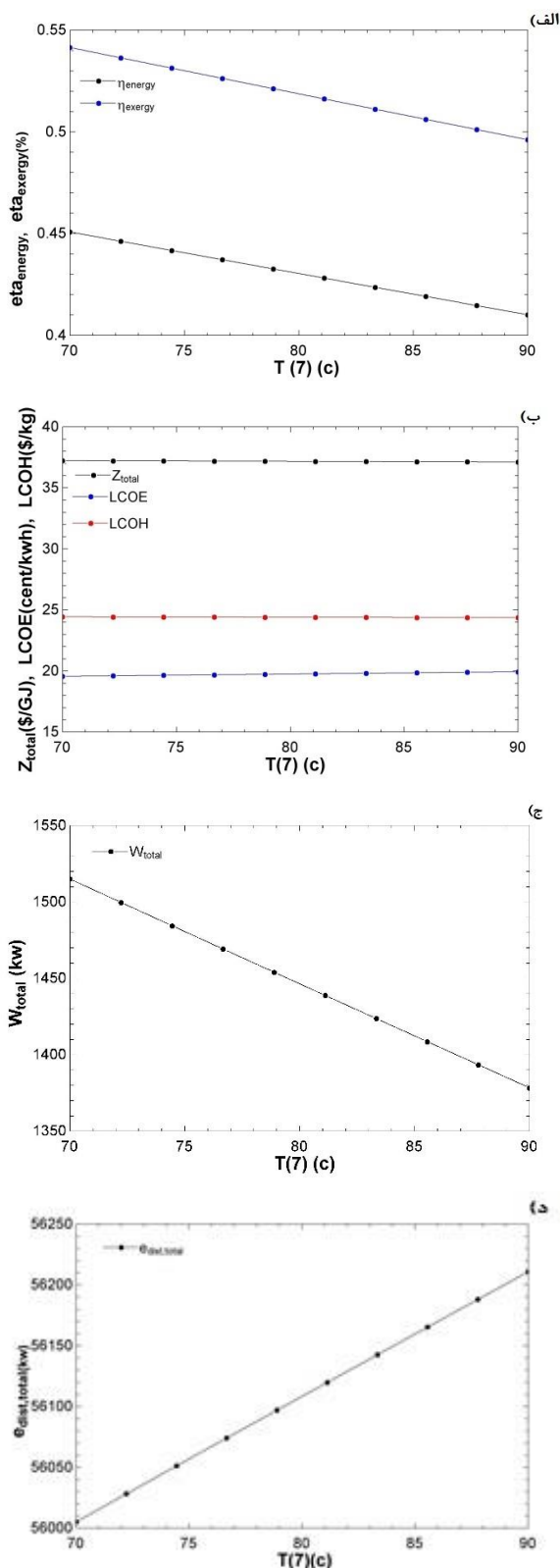
شکل ۵ نشان می‌دهد که چگونه دمای خروجی مولد بخار بازیابی گرما در چرخه اصلاح‌شده رانکین بر تولید توان سیستم، تخریب اگزرژی، نرخ هزینه و بازده انرژی و اگزرژی سیستم تأثیر می‌گذارد. هنگامی که دمای خروجی مبدل حرارتی افزایش می‌یابد، دمای ورودی آن کاهش می‌یابد. کاهش دمای ورودی به مولد بخار بازیابی گرما، انتقال حرارت و انرژی حرارتی ورودی به چرخه رانکین آلی را کاهش می‌دهد، که متعاقباً تخریب اگزرژی را در سیستم کاهش می‌دهد. کاهش انتقال

شکل ۲: تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم الف) بازده انرژی و اگزرژی (ب) نرخ هزینه (ج) توان (د) نابودی اگزرژی ۸-۱-۲ اثر تغییرات فشار در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم شکل ۳ تجزیه و تحلیل می‌کند که چگونه تغییرات در فشار خروجی توربین ۱ بر توان تولید سیستم، تخریب اگزرژی، نرخ هزینه و کارایی انرژی و اگزرژی سیستم تأثیر می‌گذارد. با افزایش فشار خروجی توربین ۱، تخریب اگزرژی در سیستم نیز افزایش می‌یابد که منجر به تلفات بیشتر در توان خروجی می‌شود و بر عملکرد سیستم تأثیر منفی می‌گذارد. از آنجایی که توان خروجی مستقیماً با بازده اگزرژی مرتبط است، افزایش تخریب اگزرژی منجر به کاهش راندمان انرژی و اگزرژی کلی سیستم می‌شود. کاهش توان خروجی سیستم، نیاز به تجهیزات بزرگ و پرهزینه ترمودینامیکی باراندمان بالا را از بین می‌برد و در نتیجه هزینه تولید برق، هزینه تولید هیدروژن و نرخ هزینه کلی سیستم کاهش می‌یابد.

۸-۱-۳ اثر تغییرات دما در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم

شکل ۴ چگونگی تأثیر دمای خروجی توربین ۱ را بر توان خروجی سیستم، میزان تخریب اگزرژی، نرخ هزینه و راندمان انرژی و اگزرژی بررسی می‌کند. با افزایش دمای خروجی توربین ۱ از ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۹۰ درجه سانتی‌گراد، تلفات سیستم و تخریب اگزرژی افزایش می‌یابد. در نتیجه، ظرفیت انجام کار کاهش می‌یابد و منجر به کاهش توان خروجی می‌شود. راندمان اگزرژی مستقیماً با توان خروجی مرتبط است. بنابراین، کاهش توان تولیدی سیستم بر عملکرد ترمودینامیکی آن تأثیر منفی می‌گذارد و منجر به کاهش راندمان انرژی و اگزرژی می‌شود. کاهش ظرفیت تولید منجر به کاهش هزینه تولید برق، کاهش هزینه تولید هیدروژن و نرخ کلی سرمایه‌گذاری در تجهیزات بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه قابلیت اقتصادی سیستم را افزایش می‌دهد.





شکل ۴: تأثیر تغییرات دما در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم (الف) بازده انرژی و (ب) نرخ هزینه (ج) توان (د) نابودی انرژی

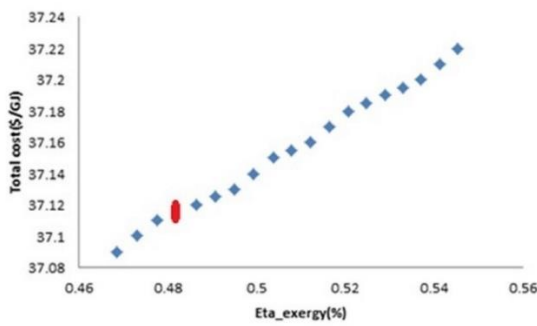
حرارت از مولد بخار بازیابی حرارتی به چرخه رانکین آلی منجر به کاهش توان خروجی توربین سیکل می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش دمای ورودی به سیکل باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود که ارتباط مستقیمی با توان کل سیستم دارد. از آنجایی که الکترولیز برق مورد نیاز خود را از توربین می‌گیرد، تولید هیدروژن مایع با کاهش قدرت توربین کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هر دو راندمان انرژی و نرخ هزینه مستقیماً با توان تولید مرتبط هستند. بنابراین، هنگامی که توان تولید کاهش می‌یابد، بازده انرژی و هزینه‌های یکسان شده تولید برق، تولید هیدروژن و هزینه‌های کل نیز کاهش می‌یابد.

۸-۲- بهینه‌سازی دو هدفه

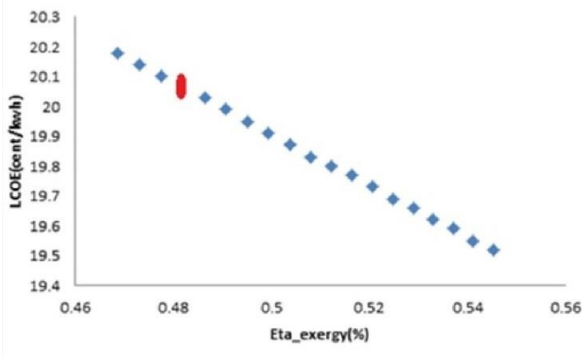
این مطالعه از بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک دوهدفه برای تعیین بهترین مقادیر برای توابع هدف و متغیرهای بهینه‌سازی استفاده می‌کند. هدف یافتن بهینه‌ترین مقادیر برای دو تابع هدف راندمان انرژی و هزینه سیستم است. بهینه‌سازی بر بهبود پارامترهای عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی، به‌ویژه با افزایش کارایی انرژی و کاهش هم‌زمان هزینه‌های سیستم متمرکز است. جدول ۹ نتایج به دست آمده از طریق بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک دوهدفه را بیان می‌کند. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با عملکرد بهینه، سیستم می‌تواند به بازده انرژی ۴۴٪، بازده انرژی ۵۳٪ و نرخ هزینه ۳۷/۰۷ دلار بر گیگا ژول برسد.

جدول ۹: مقادیر بهینه

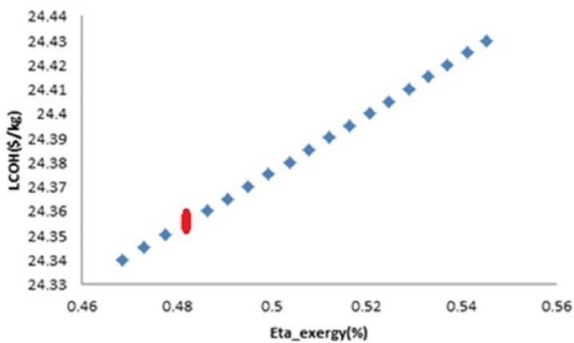
پارامتر	مقدار بهینه
هزینه کل سیستم (\$/GJ)	۳۷/۰۷
بازده انرژی سیستم (%)	۵۳
بازده انرژی سیستم (%)	۴۴
بازده ایزونتروپیک توربین (%)	۷۰
بازده ایزونتروپیک کمپرسور (%)	۸۷
بازده ایزونتروپیک پمپ (%)	۸۲
فشار خروجی توربین ۱ (kPa)	۴۹/۹۵
دمای ورودی توربین ۲ (C)	۱۳۳/۳
هزینه تولید برق (cent/kwh)	۱۹۶۲
هزینه (\$/kg)	۲۴/۴۱



شکل ۶: نمودار پارتو بازده انرژی و هزینه کل

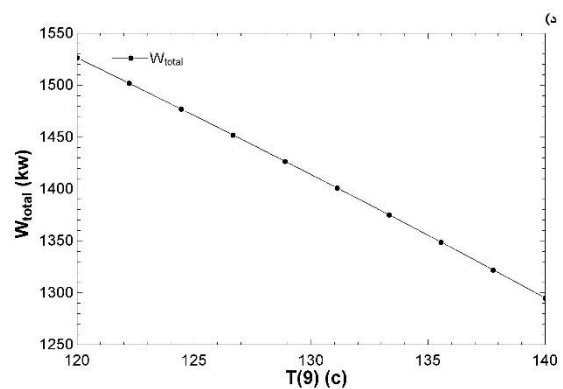
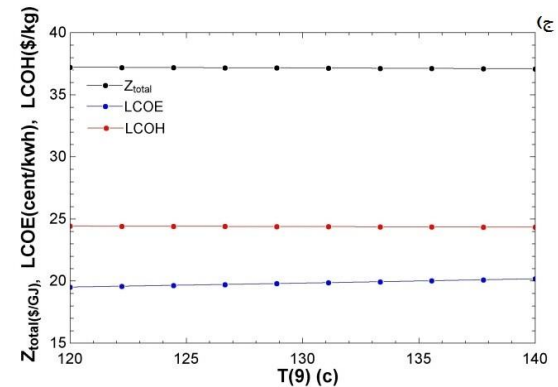
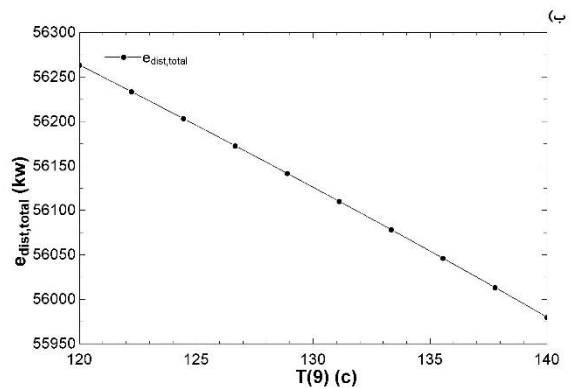
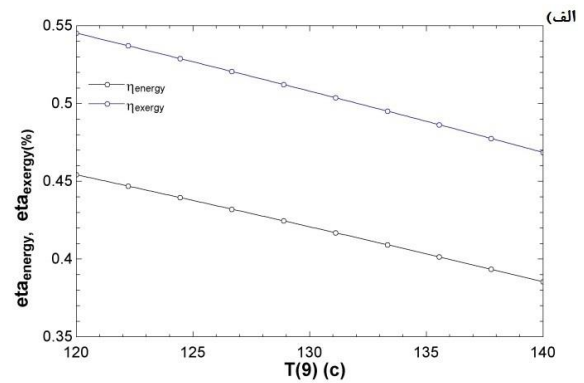


شکل ۷: نمودار پارتو بازده انرژی و هزینه تولید الکتریسیته



شکل ۸: نمودار پارتو بازده انرژی و هزینه تولید هیدروژن

هدف اصلی این سیستم زمین‌گرمایی تولید انرژی پاک و درعین حال کاهش آلودگی محیطی است. علاوه بر این، سه سناریو برای فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند که از نمودار پارتو در چارچوب بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. روش تصمیم‌گیری تاپسیس برای شناسایی مطلوب‌ترین وضعیت برای دستیابی به شرایط عملیاتی بهینه سیستم به کار گرفته شد. تاپسیس یک روش تصمیم‌گیری کاربردی است که با تجزیه و تحلیل، مقایسه و رتبه‌بندی گزینه‌ها برای انتخاب بهترین و مناسب‌ترین گزینه با توجه به معیارهای مسئله، به مشکلات تصمیم‌گیری واقعی می‌پردازد. یافتن یک‌راه‌حل ایده‌آل و یک‌راه‌حل ضد ایده‌آل، که سپس برای تعیین فاصله بین گزینه‌ها و



شکل ۵: تأثیر تغییرات دما در خروجی مولد بخار بازافت حرارتی روی عملکرد سیستم الف) بازده انرژی و انرژی و اگزرژی ب) نابودی انرژی ج) هزینه د) توان

پیکربندی مطلوب سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین گرمایی است. در این مطالعه، یک ارزیابی اقتصادی برای توسعه سیستمی انجام شده است که با کارایی اقتصادی بالا مشخص می شود. یافته ها نشان می دهد که دستیابی به کارایی اقتصادی مطلوب برای کل سیستم هزینه ای معادل ۳۷/۱۶ دلار به ازای هر گیگا ژول را به همراه دارد. تأثیر شش متغیر تصمیم گیری را بر عملکرد سیستم، از جمله بازده ایزنتروپیک توربین، فشار خروجی توربین ۱، دمای خروجی ژنراتور مبدل حرارتی بخار و دمای خروجی توربین ۱ بررسی شد. بهینه سازی دو هدفه به طور قابل توجهی بازده اگزرژی سیستم را افزایش می دهد، با استفاده از معیار تصمیم گیری تاپسیس نقطه عملکرد بهینه شناسایی شده و سیستمی با نرخ هزینه بهینه جهت بهبود توجیه اقتصادی به کارگیری سیستم تولید هم زمان پیشنهادی ارائه می کند.

۱۰- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
Ex	اگزرژی، kJ/kg
h	انتالپی مخصوص، kJ/kg
m	شدت جریان جرمی، kg/s
P	فشار، kPa
Q	آهنگ انتقال گرما، kW
s	انتروپی مخصوص، kJ/kg.K
T	دما، °C
W	آهنگ کار مبادله شده، kW
LCOE	هزینه تولید برق، cent/kwh
LCOH	هزینه تولید هیدروژن، \$/kg
AOC	هزینه عملیاتی سالانه
CRF	ضریب بازگشت سرمایه
TOC	کل هزینه های عملیاتی
علائم یونانی	
η	بازده، %
e	زیر نویس
Ex	خروجی اگزرژی
i	ورودی
Total	کل
Turb	توربین
PEM	الکترولایزر

راه حل ایدئال استفاده می شود، پایه و اساس رویکرد تاپسیس است. سپس این روش گزینه ها را با توجه به نزدیکی آن ها به راه حل ایدئال رتبه بندی می کند. نتایج بهینه سازی برای سیستم پیشنهادی، با در نظر گرفتن سه سناریو مجزا، در شکل های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بازده اگزرژی و نرخ کل هزینه در نظر گرفته شده است. نقطه قرمز به عنوان راه حل بهینه برای سیستم با استفاده از روش تصمیم گیری تاپسیس شناسایی می شود. فرآیند بهینه سازی نشان داده شده در شکل ۷، بازده اگزرژی و هزینه تولید برق را نشان می دهد، در حالی که شکل ۸ بر بازده اگزرژی و هزینه تولید هیدروژن متمرکز است.

۹- نتیجه گیری

این مطالعه یک سیستم تولید چندگانه جدید را ارزیابی می کند که از انرژی زمین گرمایی برای تولید الکتریسته، گرما، سرما و هیدروژن مایع استفاده می کند. سیستم پیشنهادی شامل یک واحد زمین گرمایی، یک چرخه رانکین آلی اصلاح شده ابتکاری است که یک مبدل حرارتی داخلی و یک ژنراتور مبدل حرارتی بخار، یک چیلر جذبی تک اثره، یک الکترولیز غشای تبادل پروتون و یک چرخه مایع سازی هیدروژن را ادغام می کند. سیستم مورد بررسی تحت تجزیه و تحلیل متمرکز بر انرژی، اگزرژی و عوامل اقتصادی قرار گرفته است. گاز هیدروژن تولید شده توسط الکترولیز در طول چرخه مایع سازی کلود به شکل مایع تبدیل می شود و کارایی ذخیره سازی و حمل و نقل آن را افزایش می دهد. با پیش سرد کردن گاز هیدروژن در چیلر جذبی انرژی مصرفی در چرخه مایع سازی کاهش می یابد و غوطه ور کردن آن در دو مبدل حرارتی با حمام نیتروژن مایع باعث کاهش اختلاف دما در مبدل حرارتی شده به صورتی که نابودی اگزرژی کاهش یافته و منجر به بهبود راندمان سیستم پیشنهادی می شود. الکترولیز و توربین چرخه رانکین اصلاح شده بالاترین تخریب اگزرژی را در مقایسه با سایر اجزای سیستم نشان می دهند به صورتی که می توان با افزایش دمای ورودی به آن منجر به کاهش قابل توجه در تخریب اگزرژی برای سیستم پیشنهادی شود. علاوه بر این، یک تحلیل پارامتریک برای ارزیابی عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف انجام شد. این تحقیق باهدف بهینه سازی پیکربندی اجزای سیستم برای حداکثر بازده در شرایط ایدئال و همچنین افزایش عملکرد ترمودینامیکی سیستم تمرکز دارد. سیستم تجزیه و تحلیل شده عملکرد رضایت بخشی را نشان می دهد و با دستیابی به راندمان انرژی ۴۲٪ و راندمان اگزرژی ۵۱٪ نشان دهنده

۱۱- منابع

- [9] Zhao, X., et al. (2023). "Optimization and analysis of an integrated energy system based on wind power utilization and on-site hydrogen refueling station." *International Journal of Hydrogen Energy* 48(57): 21531-21543.
- [10] Temiz, M. and I. Dincer (2022). "Design and analysis of a floating photovoltaic based energy system with underground energy storage options for remote communities." *Journal of Energy Storage* 55: 105733.
- [11] keykhah, A., et al. (2023). "Optimization and performance analysis of a geothermal-based power generation system based on flash-binary and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles using zeotropic mixtures." *Advances in Engineering and Intelligence Systems* 002(03).
- [12] S.M. Alirahmi, et al., Green hydrogen & electricity production via geothermal-driven multi-generation system: thermodynamic modeling and optimization, *Fuel* 308 (2022) 122049.
- [13] O. Bamisile, et al., Thermo-enviro-exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel geothermal-solar-wind micro-multi-energy system for cleaner energy production, *Process Saf. Environ. Prot.* 170 (2023) 157–175.
- [14] S. Kavian, C. Aghanajafi, H.J. Mosleh, A. Nazari, Exergy, economic and environmental evaluation of an optimized hybrid photovoltaic-geothermal heat pump system, *Appl. Energy* 276 (2020). Volume.
- [15] Y. Cao, et al., Development and transient performance analysis of a decentralized grid-connected smart energy system based on hybrid solar-geothermal resources; Techno-economic evaluation, *Sustain. Cities Soc.* 76 (2022) 103425
- [16] O.F. Guler, et al., Performance evaluation of a geothermal and solar-based multigeneration system and comparison with alternative case studies: energy, exergy, and exergoeconomic aspects, *Renew. Energy* 200 (2022) 1517–1532.
- [17] H. Zhang, et al., Thermodynamic performance analysis of an improved coal-fired power generation system coupled with geothermal energy based on organic Rankine cycle, *Renew. Energy* 201 (2022) 273–290.
- [1] Mahdavi N, Ghaebi H, Minaei A. Proposal and multi-aspect assessment of a novel solar-based trigeneration system; investigation of zeotropic mixture's utilization. *Appl Therm Eng* 2022;206:118110.
- [2] Azizi S, Shakibi H, Shokri A, Chitsaz A, Yari M. Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Appl Energy* 2023;332.
- [3] Saberi, Mohammad Reza, Kandaharion, Amir Mohammad, Naqashzadeh, Ehsan. Investigating the reliability of diesel, biodiesel and hydrogen fuels in diesel engines with the approach of sustainable development analysis. *Science and Technology in Mechanical Engineering*, 1402; 2(1): 101-113.(in Persian)
- [4] Maliki, Farhad, Akbari, Zahra, Farzaneh, Ali. An overview of modern methods of hydrogen production and storage and its use as a sustainable energy source. *New and Renewable Energy Journal*, 1400; 8(2): 101-109.
- [5] Karayel GK, Javani N, Dincer I. Effective use of geothermal energy for hydrogen production: a comprehensive application. *Energy* 2022;249:123597.
- [6] Arslan O, Arslan AE. Multi-criteria optimization of a new geothermal driven integrated power and hydrogen production system via a new Index: economic sustainability (EcoSI). *Fuel* 2024;358:130160.
- [7] Awad M, Said A, Saad MH, Farouk A, Mahmoud MM, Alshammari MS, et al. A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application. *Alex Eng J* 2024;87:213–39.
- [8] Chen, Y., et al. (2023). "Exergy-economic analysis and multi-objective optimization of a multigeneration system based on efficient waste heat recovery of combined wind turbine and compressed CO2 energy storage system." *Sustainable Cities and Society* 96: 104714.

- optimizations,” *Energy*, vol. 145, pp. 38–51, 2018.
- [25] Kianfard, H., Khalilarya, S., Jafarmadar S., 2018, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, pp. 339–349.
- [26] G. Tsatsaronis, —Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics, *Energy*, vol. 32, no. 4, pp. 249–253, 2007.
- [27] O.L. Gulder, "Flame temperature estimation of conventional and future jet fuels", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1986; 108(2), 376-380.
- [28] H. Sayyadi, "Multi-objective approach in thermoenviromonic optimization of a benchmark cogeneration system", *Applied Energy*, 2009; 86(6), 867-879.
- [29] Lingbao Wang, Xianbiao Bu, Hanzhi Wang, Zhitong Ma, Weibin Ma, Huashan Li, (2018). Thermo-economic evaluation and optimization of LiBr-H₂O double absorption heat transformer driven by flat plate collector, *Energy Conversion and Management* 162. 66–76.
- [30] Razmi AR, Janbaz M. Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). *Energy Convers Manag* 2019:112320.
- [31] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran; "Thermal Design and Optimization."; New York: Wiley: 1996.
- [32] H. Kianfard, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Convers. Manag.* 177 (2018) 339–349, vol.
- [18] B. Tekkanat, et al., The evaluation of hydrogen production via a geothermal-based multigeneration system with 3E analysis and multi-objective optimization, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (22) (2023) 8002–8021.
- [19] M.H. Khoshgoftar Manesh, et al., Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analysis of an innovative solar-geothermal-gas driven polygeneration system for combined power, hydrogen, hot water, and freshwater production, *Sustain. Energy Technol. Assess.* 51 (2022) 101861.
- [20] A. Bedakhanian, E. Assareh, Exploring an innovative approach to hydrogen generation for fuel cell energy production by integrating a dual organic Rankine system with an absorption chiller powered by geothermal energy, *Energy Nexus* (2023) 100267.
- [21] F. Yilmaz, et al., Proposed and assessment of a sustainable multigeneration plant combined with a transcritical CO₂ cycle operated by flash-binary geothermal energy, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (60) (2023) 22818–22833.
- [22] Liu X, Hu G, Zeng Z. Performance characterization and multi-objective optimization of integrating a biomass-fueled brayton cycle, a kalina cycle, and an organic rankine cycle with a claude hydrogen liquefaction cycle. *Energy* 2023;263.
- [23] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40(40):14021e30.
- [24] Boyaghchi F. A., M. Chavoshi, and V. Sabeti, “Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact



Finding the Optimal Position of the Distance Measuring Device with the Aim of Reducing Risk and Uncertainty in the Aircraft Landing Phase

Masoud Moradi Rad^{*1}, Amir Reza Kosari², Mohammad Ali Amiri Atashgah²

1. Ph.D. Student, Department of Aerospace Engineering, University of Tehran Kish International Campus, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Aerospace Engineering, Faculty of New Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Under non-ideal weather conditions, distance measuring equipment (DME) must be optimally positioned to reduce landing errors. In this context, interval type-2 fuzzy logic is used as an efficient method for determining the optimal position of the DME. With this method, factors such as weather conditions, flight path, and other related variables are evaluated fuzzily to determine the optimal position of the DME. When unequal distances from the normal landing strip exist for each of the DMEs, it is necessary to identify the most suitable location for the secondary DME. To this end, the system is designed dynamically so that after identifying the assumed centerline based on the initial placement of each DME, the optimal location for the secondary DME is ultimately determined. These conditions only apply if both DMEs have unequal distances. The results show that the use of the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm has a significant impact on improving aircraft landing conditions. With this algorithm, the reduction in the impact of turbulence has increased from 20% to 40%. The probability of landing error has decreased from 10% to 5%, and measurement accuracy has increased from 85% to 95%. These results indicate a substantial improvement in landing safety under non-ideal conditions. Given the reduction in the impact of turbulence and the increase in measurement accuracy, the GWO algorithm plays a crucial role in enhancing the safety and efficiency of aircraft landings.

Keywords

Optimum Landing
Navigation Systems
Distance Measurement equipment
Positioning Dynamics
Turbulence Reduce

Received: 05.11.2024

Revised: 07.24.2024

Accepted: 10.01.2024

*Corresponding Author

Masoud Moradi Rad

Email

Masoud.moradirad@yahoo.com

1- Introduction

During the last few decades, advances in microelectronics technology have made cheap and fast processors available, and on the other hand, advances in communication technology have made faster and more cost-effective networks. The combination of advances in these two fields has resulted in a cheaper and more efficient technology that instead of using a very fast processor, uses regular multiprocessors that are connected together. In terms of architecture, computers that consist of multiple processors connected together are called coupled systems, which are of two types: strong coupled systems and weak coupled systems. In strongly coupled systems, there is a common memory that is shared among all processors, but in

weakly coupled systems, there is no shared memory and each processor has its own memory.

Usually, strongly coupled systems are called parallel processing systems and weakly coupled systems are called distributed computing systems. Therefore, distributed systems are a set of processors connected together in a communication network, where each processor has local memory and peripheral devices. It has its own that these processors and their resources are called nodes or sites or machines. Interval distributed systems are designed to achieve the result of the operation of several systems in terms of processing, the efficiency of which is an acceptable and



mathematically verifiable interval to achieve a specific goal [1].

2- Control System

The experimental setup is constructed around a dual-axis mechanism, where a rotating base supports an elongated arm equipped with reaction wheels at its extremities. The arm's rotation relative to the base defines the inclination angle (θ), while a secondary rotational axis (ψ) is facilitated through a turntable that underpins the entire assembly. The frame, crafted using 3D printing technology, leverages PLA polymer for its lightweight nature, production flexibility, and suitability for intricate designs. These characteristics ensure precise alignment during assembly, reducing the risk of component misalignment and enhancing operational stability.

To control the system's orientation, reaction wheels generate rotational forces. Achieving substantial angular momentum without excessive weight was realized by integrating 3D-printed components with. The orthogonal arrangement of these wheels minimizes cross-axis torque disturbances, ensuring efficient control. Additionally, movable counterweights are strategically positioned to balance the structure and maintain equilibrium in diverse configurations. Even when motors are inactive, the system incorporates stabilizing joints that uphold structural integrity.

This modular and lightweight setup provides a versatile platform for testing advanced control algorithms, making it ideal for dynamic experiments in orientation regulation. As demonstrated in Fig. 1, the design effectively addresses challenges associated with multi-axis dynamics.

The developed system incorporates diverse control algorithms, which can be implemented on the processing hardware. It facilitates seamless online communication with a computer, supporting real-time monitoring and enabling adjustments to the controller parameters. This feature allows for the

implementation, testing, and observation of various control strategies. The structure of the control system is depicted in fig. 2.

The main problem in designing any fuzzy control system is the shape of membership functions and selection of fuzzy rules. The decision logic is whatever the output of the controller is. Decision logic uses input fuzzy sets and uses input values to make decisions. In addition, the information base includes information on the scope of application and the purpose of control, which includes data and control based on fuzzy rules. [6]

In Figure 1, the assumed triangle is the main runway in the triangle rule and the location of the plane is the vertex of the triangle. The ideal situation for landing is the semi-circle formed by the apex of the triangle. If the distance of the plane from each of the gauges is the same, the plane is in the right direction for landing

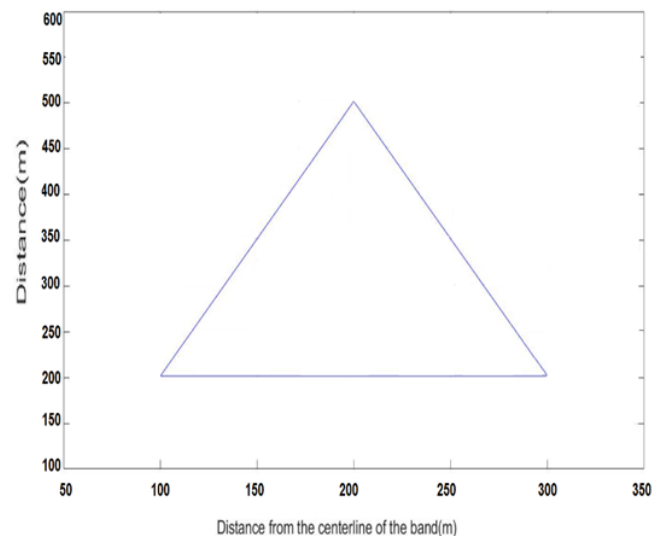


Figure 1 :Formation of an isosceles triangle.

As shown in Figure 2, first DME1 is placed with a different and acceptable distance in the desired phase from DME2 to the centerline. Considering the interval fuzzy system, a very small and acceptable difference has been detected and as it can be seen, the proposed centerline is in accordance with the accepted centerline for landing.

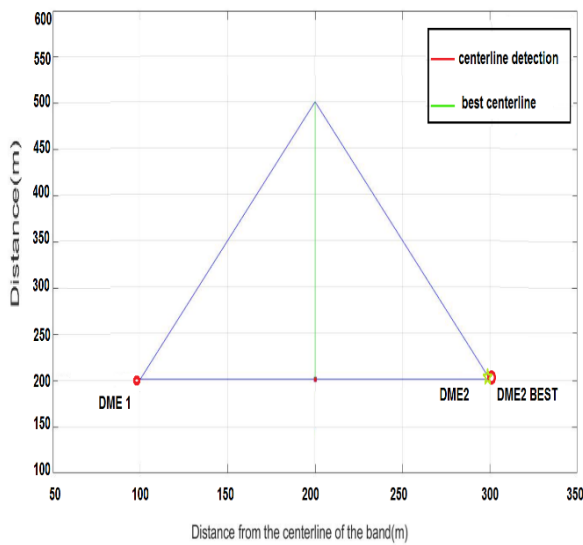


Figure 2 :Display of the output obtained from the basic hypothesis of interval fuzzy.

In the following, in Figure 3, the result of work innovation and consideration of non-ideal atmospheric conditions (wind) has been presented.

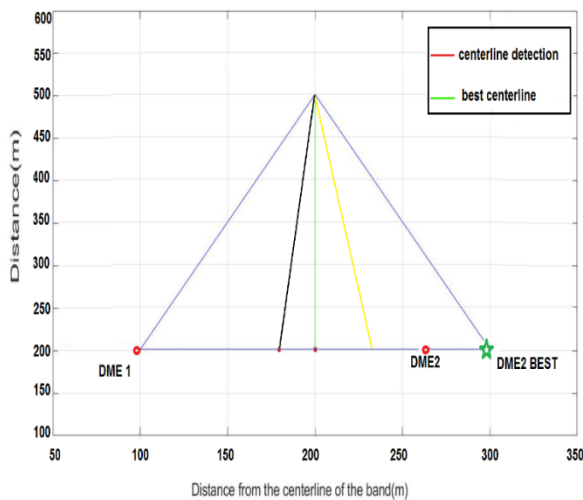


Figure 3 :Output display considering non-ideal conditions (momentary wind).

As can be seen, taking into account the momentary wind conditions from the side of gauge number 1 to the aircraft body, the landing conditions will be more difficult. Based on the output of Figure 3, it can be said that the green line shows the optimal landing line. The red line shows the initial landing conditions, taking into account the non-uniform distance of the sensors from the centerline.

It is possible to show the landing line correctly and according to the green line. But the addition of the wind phenomenon and the created non-ideal conditions lead to landing in incorrect conditions and corresponding to the yellow color. Obviously, in order to improve the landing conditions, by identifying the correct location of gauge number 2; Landing conditions were very close to ideal.

3- Results

In this article, the identification of the optimal location of the distance measuring system was discussed in order to identify the most suitable approach in the landing of the plane and to identify the optimal centerline. Among the most important effective factors in simulating and analyzing information is the initial placement of each sensor and the initial position of the aircraft and its distance from each of these two sensor systems. After the completion of the first phase, which identified the initial distance of the aircraft to each of the sensors and also identified whether the distance of each sensor to the main centerline was the same or not, in the second phase, the location of the secondary DME was optimized. and in the final stage, compliance with the actual centerline of the identified runway will be done.

In non-ideal weather conditions, such as strong winds or sudden weather changes, it becomes very difficult for distance measuring devices to function correctly and accurately. The proposed method using interval fuzzy logic helps to identify the most optimal position for distance measuring devices to minimize the effect of these atmospheric conditions on the measurement accuracy.

For the improvement and practical application of the presented methods in the aviation industry, the following suggestions are significant:

The first suggestion is to use optimization methods such as the gray wolf algorithm and interval fuzzy logic to design and improve navigation and landing systems in adverse weather conditions. By using these methods, it is possible to more accurately determine the optimal position of

distance measuring devices (DME) and minimize the influence of atmospheric conditions.

The second proposal is to integrate these methods with artificial intelligence and machine learning systems to predict and optimize flight dynamics in real time. Using data collected from sensors and measurement systems, accurate predictive models can be created for atmospheric conditions and their effects on aircraft landings.

4- References

- [1] Öztürk, Ş., & Örs, İ. (2020). An overview for effects on aerodynamic performance of using winglets and wingtip devices on aircraft. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaa/issue/62591/945018>.
- [2] Ostroumov, I., Marais, K., & Kuzmenko, N. (2022). Aircraft positioning using multiple distance measurements and spline prediction. *Aviation*, 26(1), 1-10. <https://doi.org/10.3846/aviation.2022.16589>.
- [3] Pytka, J., Budzyński, P., Tomiło, P., Michałowska, J., Błażejczak, D., Gnapowski, E., ... & Gierczak, K. (2022). Measurement of aircraft ground roll distance during takeoff and landing on a grass runway. *Measurement*, 195, 111130. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111130>.
- [4] Lo, S., Chen, Y. H., Enge, P., Pelgrum, W., Li, K., Weida, G., & Soelter, A. (2020). Flight test of a pseudo-ranging signal compatible with existing distance measuring equipment (DME) ground stations. *Navigation*, 67(3), 567-582. <https://doi.org/10.1002/navi.376>.
- [5] Zhuang, H., Zhang, X., Sun, Q., & Chen, Z. (2023). Fuzzy Adaptive Sliding Mode Attitude Control of Quaternion Model for Aircraft Based on Back-stepping Method. 2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), 243-248. <https://doi.org/10.1109/DDCLS58216.2023.10166739>.
- [6] Singh, D.J., & Verma, N.K. (2022). Design of Fuzzy Control System for Generic Aircraft/UAVs. 2022 Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T53885.2022.9776784>.
- [7] Tang, L., Yang, M., & Sun, J. (2021). Adaptive fuzzy constraint control for switched nonlinear systems in nonstrict feedback form. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 35, 1594 - 1611. <https://doi.org/10.1002/acs.3277>.
- [8] Teimoori, M., Taghizadeh, H., Pourmahmoud, J., & Azimi, M.H. (2021). A Multi-Objective Grey Wolf Optimization Algorithm for Aircraft Landing Problem. <https://doi.org/10.22105/jarie.2021.261337.1230>.
- [9] G. Feng and J. Ma, "Quadratic stabilization of uncertain discrete-time fuzzy dynamic systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems* <https://doi.org/10.1109/81.964424>.
- [10] Ning, B. A. I., Xiaochao, L. I. U., Juefei, L. I., Zhuangzhuang, W. A. N. G., Pengyuan, Q. I., SHANG, Y., & Zongxia, J. I. A. O. (2023). An aircraft brake control algorithm with torque compensation based on RBF neural network. *Chinese Journal of Aeronautics*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.06.010>.
- [11] Miller, J.D., Godfroy-Cooper, M., & Szoboszlay, Z.P. (2021). Degraded Visual Environment Mitigation (DVE-M) Program, Bumper RADAR Obstacle Cueing Flight Trials 2020. Proceedings of the Vertical Flight Society 77th Annual Forum. <https://doi.org/10.4050/F-0077-2021-16747>.
- [12] Rabah, M., Haghbayan, H., Immonen, E., & Plosila, J. (2022). An AI-in-Loop Fuzzy-Control Technique for UAV's Stabilization and Landing. *IEEE Access*, 10, 101109-101123. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3208685>.



یافتن موقعیت بهینه دستگاه سنجش فاصله باهدف کاهش ریسک و عدم قطعیت در فاز نشست

هواپیما

مسعود مرادی راد^{۱*}، امیر رضا کوثری^۲، محمدعلی امیری آتشگاه^۲

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی هوافضا، پردیس بین المللی کیش دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

کلمات کلیدی

فرود بهینه
سیستم‌های ناوبری
سیستم اندازه‌گیری فاصله
یویاسازی مکان‌یابی
کاهش توربولانس

در شرایط غیرایده آل جوی، دستگاه سنجش فاصله برای کاهش خطا در فرود هواپیما باید در موقعیت بهینه‌ای باشند. در این راستا، منطق فازی بازه‌ای به‌عنوان روشی کارآمد در تعیین موقعیت بهینه دستگاه سنجش فاصله استفاده می‌شود. با این روش، فاکتورهایی نظیر شرایط هوا، مسیر پرواز و سایر متغیرهای مرتبط، به صورت فازی ارزیابی و موقعیت بهینه دستگاه سنجش فاصله تعیین می‌شود. زمانی که فاصله‌های غیر یکسان از باند فرود نرمال برای هر یک از سنجش‌گرها برقرار باشد، نیاز به شناسایی مناسب‌ترین مکان جهت قرارگیری سنجش‌گر ثانویه وجود دارد. به همین منظور سیستم به صورت پویا طراحی شده‌است، به شکلی که پس از شناسایی سنترلاین مفروض بر اساس نحوه قرارگیری اولیه هر یک از سنجش‌گرها، درنهایت جایگاه مناسب و محل قرارگیری بهینه برای سنجش‌گر ثانویه شناسایی می‌شود. این شرایط تنها در صورت غیر یکسان بودن هر دو سنجش‌گر حاصل خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری تأثیر قابل توجهی در بهبود شرایط فرود هواپیما دارد. با استفاده از این الگوریتم، کاهش تأثیر توربولانس از ۲۰٪ به ۴۰٪ افزایش یافته است. احتمال خطای فرود نیز از ۱۰٪ به ۵٪ کاهش یافته و دقت اندازه‌گیری از ۸۵٪ به ۹۵٪ افزایش پیدا کرده است. این نتایج نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در امنیت فرود هواپیما در شرایط غیرایده آل می‌باشد. با توجه به کاهش تأثیر توربولانس و افزایش دقت اندازه‌گیری، الگوریتم گرگ خاکستری نقش مهمی در بهبود ایمنی و کارایی فرود هواپیما ایفا می‌کند.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

*نویسنده مسئول

مسعود مرادی راد

ایمیل

Masoud.moradirad@yahoo.com

۱- مقدمه

می‌شود ولی در سیستم‌های جفت شده ضعیف حافظه اشتراکی وجود ندارد و هر پردازنده حافظه مختص به خود را دارد. معمولاً به سیستم‌های جفت شده قوی سیستم‌های پردازش موازی و به سیستم‌های جفت شده ضعیف سیستم‌های محاسباتی توزیع شده گفته می‌شود. بنابراین سیستم‌های توزیع شده مجموعه‌ای از پردازنده‌های متصل به هم در یک شبکه ارتباطی هستند که هر پردازنده حافظه محلی و دستگاه‌های جانبی خود را دارد که به این پردازنده‌ها و منابع آن‌ها گره یا سایت یا ماشین می‌گویند. سیستم‌های توزیع شده بازه‌ای برای حصول برآیند کارکرد چندین سیستم از لحاظ پردازش که بازه آن یک بازه قابل قبول و قابل بررسی ریاضی برای نیل به یک هدف خاص است طراحی می‌شوند [۱].

در طول چند دهه اخیر پیشرفت‌ها در تکنولوژی میکروالکترونیک باعث در دسترس قرار گرفتن پردازنده‌های ارزان و سریع شده‌است و از طرفی پیشرفت در تکنولوژی ارتباطات باعث به وجود آمدن شبکه‌های سریع تر و به صرفه تر شده‌است. از ترکیب پیشرفت در این دو زمینه تکنولوژی ارزان تر و کارتری به وجود آمده که به جای اینکه از یک پردازنده خیلی سریع استفاده شود از چند پردازنده معمولی که به هم متصل شده‌اند استفاده می‌شود. از نظر معماری کامپیوترهایی که از چند پردازنده متصل به هم تشکیل شده‌اند راسیستم‌های جفت شده می‌نامند که بر دو نوع هستند: سیستم‌های جفت شده قوی و سیستم‌های جفت شده ضعیف. در سیستم‌های جفت شده قوی یک حافظه عمومی وجود دارد که میان همه پردازنده‌ها به اشتراک گذاشته



۱-۱- مروری بر مقدمات سیستم‌های کنترلی

مشکل اصلی در طراحی هر سیستم کنترل فازی، شکل توابع عضویت و انتخاب قوانین فازی است. منطق تصمیم‌گیری را هر است که از آن طریق خروجی کنترلر به دست می‌آید. منطق تصمیم‌گیری از مجموعه‌های فازی ورودی استفاده می‌کند و برای تصمیم‌گیری از مقادیر ورودی‌ها استفاده می‌کند. علاوه بر این پایه اطلاعاتی شامل اطلاعات دامنه کاربرد و هدف کنترل می‌باشد که این شامل دیتاها و کنترل بر پایه قوانین فازی می‌باشد [۶].

یک کنترلر فازی براساس خطای ردیابی، e و مشتق خطا و طراحی می‌شود تا بتواند خطی‌سازی فیدبک ورودی-خروجی و کنترل براساس S.P. را پیاده‌سازی کند. محققان بسیاری استفاده از توابع عضویت مثلثی شکل یکنواخت را توصیه کرده‌اند و هم به استفاده از قوانین ویژگی مشترک و یافتن را هر برای بهبود، تنظیم و سازگار کردن آنها با تغییرات سیستم، دینامیک‌های مدل نشده یا اعوجاجات خارجی توصیه کرده‌اند. یک سیستم کنترل فازی را وقتی سیستم کنترل فازی تطبیقی می‌گوییم که یک مجموعه از قوانین فازی برای بهبود یا تغییر ساختار کنترلر فازی موجود (شامل توابع عضویت یا قوانین فازی) وجود داشته باشد [۶].

به‌منظور نوآوری در این مقاله، شرایط غیر ایده‌آل جوی و ناپایدار در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است با در نظر گرفتن این شرایط، شناسایی تقرب مناسب به‌سختی امکان‌پذیر می‌باشد زیرا لاین فرود در این شرایط می‌تواند منطبق بر لاین بهینه‌ی شناسایی شده نباشد. اما وظیفه‌ی اصلی که در این مقاله به دنبال آن می‌باشیم، شناسایی باند فرود بهینه و جایگیری بهینه‌ی دستگاه سنجش‌گر فاصله در راستای بهبود شرایط فرود می‌باشد. همچنین در این مقاله به شناسایی و کاهش تأثیر توربولانس با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری^۲ پرداخته می‌شود. توربولانس در هنگام فرود هواپیما چالشی است که نیازمند راه‌حل‌های نوآورانه است. این مقاله به جستجو برای موقعیت‌یابی بهینه دستگاه‌های اندازه‌گیری فاصله برای کاهش خطاهای فرود در شرایط غیر ایده‌آل می‌پردازد. ما استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری را برای کاهش تأثیر توربولانس در هنگام فرود بررسی خواهیم کرد. کاهش تأثیر توربولانس برای اطمینان از فرود ایمن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توربولانس در هوانوردی به حرکات هوایی نامنظم و اغلب غیرقابل پیش‌بینی اطلاق می‌شود که می‌تواند بر پایداری و کنترل هواپیما تأثیر بگذارد. در هنگام فرود،

در طول مراحل حیاتی برخاستن، صعود اولیه، نزدیک شدن و فرود درجایی که هواپیما نزدیک به زمین است، قدرت سیگنال سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی^۱ ممکن است برای تضمین عملکرد ایمن، به‌ویژه در حضور تداخل احتمالی به حد کافی اتکا نباشد. هنگامی که مکان GNSS گم می‌شود، هواپیما معمولاً به سایر کمک‌های ناوبری باز می‌گردد. دقیق‌ترین کمک ناوبری، تجهیزات اندازه‌گیری فاصله (DME) است. با این حال، در حالی که مکان GNSS به صورت مثلثی است، تجهیزات ناوبری در هواپیما تنها می‌تواند دو سیگنال DME را به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری کند. یک رویکرد جدید برای موقعیت‌یابی با استفاده از چندین DME ارائه شده است. این رویکرد مبتنی بر تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی فواصل DME در زمان اندازه‌گیری است. این رویکرد دقت موقعیت‌یابی را به دلیل در دسترس بودن داده‌های چندگانه DME در سیستم معادلات ناوبری افزایش می‌دهد [۲].

اندازه‌گیری‌های صعود و فرود در تعیین عملکرد خاص هواپیما در سطوح مختلف باند از اهمیت فراوانی برخوردار هستند. گزارش‌های کوتاه خلبان پس از برخاستن یا فرود در یک فرودگاه معین، در شرایطی که از حالت عادی، خارج گردد حاوی اطلاعات ارزشمندی برای سایر خلبانان جهت شناسایی تأثیر توربولانس بر فرود هواپیما می‌باشد [۳]. فرآیند فازی کردن باعث می‌شود تا یک خروجی نامعمول هم بتواند، توسط مجموعه‌ها براساس اهمیتشان، عمودی شود. یک قانون در پایه اطلاعاتی می‌تواند چنان تعریف شود که نیروی کنترل صفر شود بدون اینکه روی سیستم اثر نامناسبی بگذارد. به‌طور مشابه، با هر مجموعه می‌توان متفاوت از سایر مجموعه‌ها برخورد کرد. کنترلر فازی مزایای زیادی دارد. ۱- میان گروه‌های متفاوت ورودی، براساس اهمیتشان، تمایز قائل می‌شود و بر همان اساس با تعداد کمی عملیات با آن‌ها رفتار شود. ۲- به‌راحتی می‌تواند عملیاتی را که اثری نامطلوب بر سیستم دارد حذف کند. ۳- با استفاده از مجموعه‌های فازی دوزنقه‌ای می‌توان سیگنال‌های ورودی را فیلتر کرد. ۴- دی فازی کردن و فازی کردن خروجی‌ها، باعث کاهش تأثیر نویز ورودی و بی‌دقتی‌های محاسباتی کامپیوتر می‌شود [۵].

لذا در این مقاله با به‌کارگیری رویکرد کنترلی فازی بازه‌ای به یافتن مکان بهینه‌ی سیستم سنجش‌گر فاصله به‌منظور بهبود فرود هواپیما و شناسایی لاین فرود بهینه پرداخته می‌شود.

² GWO

¹ GNSS

۲- معادلات حاکم و فرمول‌بندی

شرایط اولیه مسئله را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که تنها یک حالت معیار به‌عنوان پاسخ بهینه وجود داشته باشد. مشاهدات مربوط به سیستم را می‌توان برای یک سیستم ناپایدار نیز بسط داد [۶].

مثال، ممکن است نیروهای اعمال شده دارای فرکانس‌ها، زوایای فاز و دامنه‌های متفاوت و یا ترکیبی از این حالات باشند. با توجه به استفاده از بیش از یک مختصات، امکان وجود فاز نسبی میان مختصات مختلف نیز وجود دارد.

برای درک بهتر حالت بهینه، حالت ساده‌ای را که در آن توابع نیرو هم فرکانس و هم فاز می‌باشند، در نظر می‌گیریم. در این حالت ممکن است دامنه برخی نیروها صفر نیز باشد. اگر توابع نیرو دارای فرکانس‌های متفاوت باشند، می‌توان با استفاده از اصل برهم‌نهی مصالح را به چند بخش با فرکانس تحریک‌های مختلف تقسیم کرده و در نهایت تمام پاسخ‌های به دست آمده را باهم جمع کرد [۹-۱۱].

معادله حرکت سیستم ناپایدار با مجموعه توابع نیرویی با فرکانس و زاویه فاز صفر به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \sin \omega t \quad (1)$$

بردار $\{F\}$ شامل دامنه‌های توابع نیرو می‌باشد. فرض پاسخ هماهنگ در معادله را می‌توان بکار برد. در این صورت معادله ۱ به معادله جبری زیر تبدیل خواهد شد:

$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = \{F\} \quad (2)$$

در نهایت پاسخ سیستم ناپایدار به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\{x(t)\} = ([K] - \omega^2[M])^{-1}\{F\} \sin \omega t \quad (3)$$

معادله لاگرانژ مبتنی بر اصل دالامبر و معادله ۴ می‌باشد:

$$\delta W = \sum_{k=1}^n (\mathbf{F}_k - m_k \ddot{\mathbf{r}}_k) \cdot \delta \mathbf{r}_k = 0 \quad (4)$$

دو بخش کار مجازی در این رابطه وجود دارد. بخش اول مربوط به کار مجازی انجام‌شده توسط نیروهای خارجی است که توسط رابطه ۵ به دست می‌آید. بخش دوم، کار مجازی انجام‌شده توسط نیروهای اینرسی می‌باشد. عبارت مربوط به این کار مجازی، بدون ارائه اثبات، به‌صورت زیر است:

$$\sum_k m_k \ddot{\mathbf{r}}_k \cdot \delta \mathbf{r}_k \sum_{i=1}^n \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) \frac{\partial T}{\partial q_i} \right] \delta q_i \quad (5)$$

با جایگذاری روابط ۴ و ۵ در رابطه ۶ خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} \right] \delta q_i - \sum_{i=1}^n Q_i \delta q_i = 0$$

توربولانس می‌تواند متغیرهایی را ایجاد کند که خطر تصادف را افزایش می‌دهد. توربولانس فرآیند پیچیده فرود را پیچیده می‌کند. این می‌تواند منجر به تغییرات در ارتفاع، سرعت و زاویه فرود شود و یک تاج داوون صاف را چالش‌برانگیز کند. کاهش توربولانس برای اطمینان از فرود ایمن بسیار مهم است.

در شرایط آشفته، حاشیه خطا به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری‌های دقیق برای خلبانان برای انجام تنظیمات و اصلاحات سریع ضروری است. سنسورهای پیشرفته اندازه‌گیری فاصله دقت و قابلیت اطمینان بالاتری را ارائه می‌دهند. آنها به‌روزرسانی داده‌ها را در زمان واقعی فعال می‌کنند و به افزایش ایمنی فرود در شرایط ناپایدار منجر به بروز توربولانس کمک می‌کنند [۷].

مقدمه‌ای کوتاه بر الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری یک تکنیک بهینه‌سازی هوشمند است که از رفتار شکار گرگ‌های خاکستری الهام گرفته شده است. این به‌ویژه در سناریوهای حل مسئله که دقت و انطباق ضروری است مؤثر است. این رویکرد می‌تواند قرار دادن دستگاه‌های اندازه‌گیری فاصله را در هواپیما برای کاهش تأثیر توربولانس در هنگام فرود بهینه کند. با تنظیم دقیق موقعیت این دستگاه‌ها، الگوریتم مورد استفاده به خلبانان کمک می‌کند تا داده‌های دقیق را حتی در شرایط چالش‌برانگیز دریافت کنند که نه تنها خطاهای فرود مربوط به توربولانس را کاهش می‌دهد، بلکه عملکرد هواپیما را بهینه می‌کند و در نتیجه فرود ایمن‌تر و کارآمدتر را به همراه دارد [۸].

تعیین موقعیت بهینه دستگاه سنجش فاصله باهدف در شرایط غیرایده‌آل جوی، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این شرایط، عواملی مانند باد باعث افزایش خطر و کاهش دقت در فرود هواپیما می‌شوند. با تعیین موقعیت بهینه دستگاه سنجش فاصله باهدف، خطر خطای فرود هواپیما به حداقل ممکن کاهش پیدا می‌کند و از عواقب تلفات آن جلوگیری می‌شود. استفاده از منطق فازی بازه‌ای در تعیین موقعیت بهینه دستگاه سنجش فاصله باهدف، باعث افزایش دقت و کاهش خطا در تعیین موقعیت شده و به دلیل قابلیت اعمال ارزیابی فاکتورهای متعدد، به روشی کارآمد و مؤثر برای تعیین موقعیت بهینه تبدیل شده است. به‌طور کلی، بهره‌برداری از روش‌های کارآمد و مؤثر در تعیین موقعیت بهینه دستگاه سنجش فاصله باهدف، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و می‌تواند به افزایش ایمنی در حوزه هوانوردی کمک کند.

گرگ‌های خاکستری در هنگام شکار، دور شکار حلقه‌زده و آن را محاصره می‌کنند. به منظور مدل‌سازی ریاضی رفتار محاصره، معادلات زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (11)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (12)$$

که T نشان‌دهنده تکرار فعلی، A و C بردارهای ضرایب می‌باشند، XP بردار موقعیت شکار و X بردار موقعیت گرگ خاکستری است.

۴- نتایج و بحث

به منظور شبیه‌سازی و استخراج سنتر لاین در این مقاله از منطق فازی استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است هواپیما به‌عنوان رأس مثلث متساوی‌الساقین بایستی فاصله یکسانی را با هر یک از سنجش‌گرها داشته باشد. در نمودار ارائه شده نیمساز مثلث متساوی‌الساقین که به شکل سبز (شکل ۳و۲) نشان داده شده است نشان‌دهنده سنترلاین می‌باشد. نمودار قرمز رنگ (شکل ۳و۲) جهت حرکت و فرود هواپیما را نشان می‌دهد که در ابتدا فاصله هواپیما DME2 کمتر می‌باشد و این نشان‌دهنده فرود نامناسب و غیرقابل‌پذیرش می‌باشد به شکلی که فرود بایستی دقیقاً مطابق با نیمساز مثلث متساوی‌الساقین انجام شود با شناسایی زاویه تشکیل شده است حرکت هواپیما که برخط متصل‌کننده هر دو سنجش‌گر عمود می‌شود نسبت به نیمساز مثلث و قرار دادن آن در منطقه فازی به‌عنوان بازه کنترل نشده این بازه در فیدبک سیستم کنترلی تعریف شده و خروجی نهایی مطابق آنچه در شکل شماره ۲ و ۳ نمایش داده شده است استخراج می‌گردد.

در راستای شناسایی مناسب‌ترین مکان و سنترلاین فرود، سه حالت در نظر گرفته می‌شود. سیستم کلی به‌گونه‌ای می‌باشد که با تنظیم فرکانس هریک از سنجش‌گرهای موجود در هواپیما با یکی از سنجش‌گرهای کنار لاین فرود، به شناسایی سنترلاین می‌پردازیم. این سیستم به‌گونه‌ای عمل می‌کند که با شناسایی فاصله‌ی هواپیما از هریک از سنجش‌گرهای کنار لاین فرود به تشخیص سنترلاین اصلی می‌پردازد. اصول اساسی به‌گونه‌ای است که هواپیما به‌عنوان رأس یک مثلث قائم‌الزاویه در نظر گرفته می‌شود. (مطابق شکل ۱).

مهم‌ترین بحث در راستای شبیه‌سازی و ارائه‌ی رویکرد نوآورانه در این مقاله، شناسایی مکان بهینه‌ی هریک از سنجش‌گرهای فاصله با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت (عدم برابر بودن اولیه‌ی فاصله‌ی هریک

و یا

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} - Q_i \right] \delta q_i = 0 \quad (6)$$

از آنجاکه جابجایی‌های مجازی δq_i اختیاری می‌باشند، می‌توان آنها را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که هر بار تنها یک مختصات تعمیم یافته دارای جابجایی غیر صفر باشد. بنابراین رابطه ۶ به n معادله مستقل زیر تبدیل خواهد شد: [12]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} - Q_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

رابطه فوق به معادله لاگرانژ موسوم است.

اگر سیستم پایستار باشد، با جایگذاری معادلات ۵ در ۶ خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

با تعریف تابع لاگرانژ L به‌صورت زیر:

$$L = T - U \quad (9)$$

و در صورتی که U تابع سرعت نباشد، معادله (۹) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

رابطه فوق، شکل فشرده معادله لاگرانژ برای یک سیستم پایدار است.

برای حل مسائل مربوط به سیستم‌های پایستار به کمک معادله لاگرانژ، مراحل زیر باید انجام شوند:

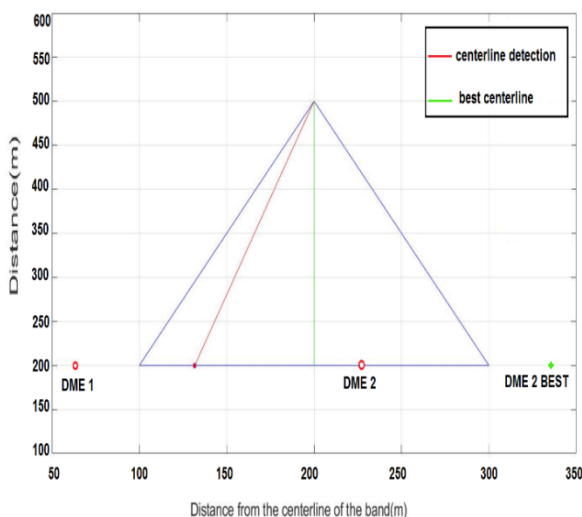
- (۱) تعداد درجات آزادی سیستم را مشخص کرده و مختصات تعمیم یافته را برای توصیف حرکت سیستم انتخاب کنید.
- (۲) انرژی جنبشی سیستم، T را برحسب سرعت‌های تعمیم یافته به دست آورید.
- (۴) انرژی پتانسیل سیستم، U را برحسب مختصات تعمیم یافته سیستم به دست آورید.

۳- معادلات حاکم الگوریتم گرگ خاکستری

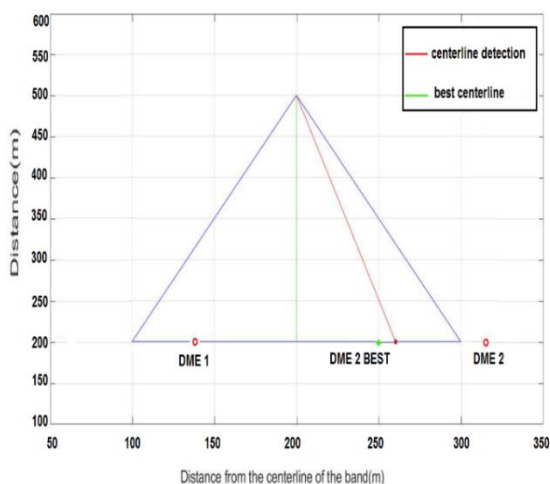
هنگام طراحی GWO، به منظور مدل‌سازی ریاضی سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌ها، ما مناسب‌ترین راه‌حل را به صورت آلفا (a) در نظر می‌گیریم. متعاقباً، دومین و سومین راه مناسب به ترتیب بتا (b) و دلتا (d) نامیده می‌شوند.

صورت DME 2 best (نقطه‌ی سبز رنگ)؛ فاز نهایی شناسایی باند فرود مانند آنچه در شکل با خط سبز کشیده شده‌است صورت خواهد پذیرفت.

در شکل ۳ به ارائه‌ی نمودار حاصل از حالت دوم ($DME2 < DME1$) پرداخته شده‌است.



شکل ۲: خروجی حاصل از فاصله نابرابر در حالت $DME1 > DME2$

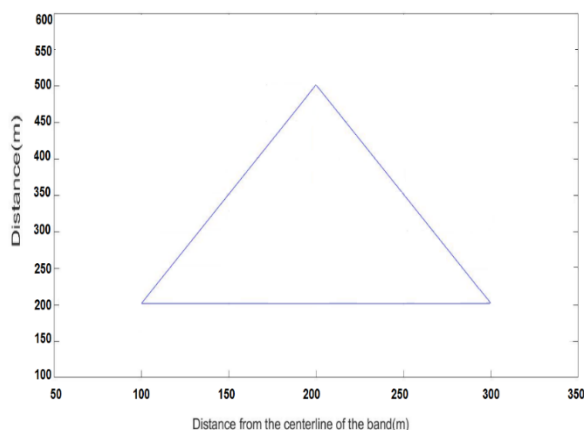


شکل ۳: خروجی حاصل از فاصله نابرابر در حالت $DME1 < DME2$

قابل ذکر است با توجه به در نظر گرفتن سیستم فازی بازه‌ای و با فرض بر اینکه عرض باند فرود ۶۰ متر در نظر گرفته شده باشد، این امر منجر به قرارگیری باند فرود بهینه در حداکثر ۱۵ متر شیفت به چپ و راست سنترلاین خواهد شد که ایده‌آل می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده‌است، ابتدا $DME1$ با فاصله‌ی متفاوت و قابل‌پذیرش در فازی بازه‌ای موردنظر (متفاوت نسبت

از سنجش‌گرها نسبت به لاین فرود اصلی)، می‌باشد. در این راستا سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده‌است که ابتدا به شناسایی لاین فرود غیرایده‌آل (با توجه به متفاوت بودن اولیه‌ی فاصله‌ی سنجش‌گرها از لاین اصلی فرود)؛ پرداخته خواهد شد. پس از آن و باوجود عدم تقرب بهینه، سیستم به‌طور خودکار به شناسایی مکان بهینه‌ی سنجش‌گر ثانویه نسبت به باند پرواز اصلی، پرداخته و با ارائه‌ی جایگاه بهینه‌ی سنجش‌گر ثانویه؛ به ارائه‌ی باند فرود شناسایی‌شده‌ی نهایی مطابق آنچه در شکل ۳ نمایش داده شده‌است خواهد پرداخت.



شکل ۱: تشکیل مثلث متساوی‌الساقین

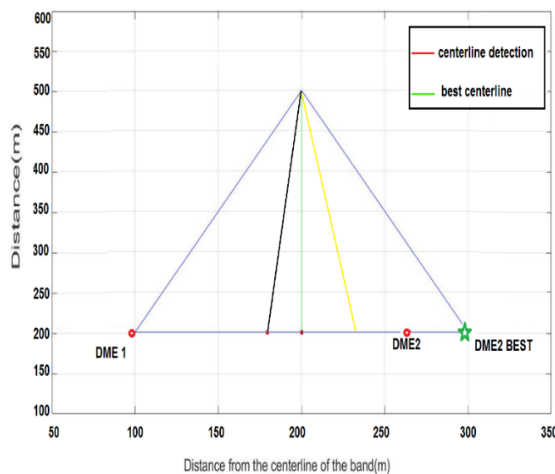
در شکل ۱ مثلث مفروض به‌عنوان باند اصلی پرواز در قائده‌ی مثلث و مکان هواپیما به‌عنوان رأس مثلث می‌باشد. حالت ایده‌آل برای فرود نیمساز تشکیل شده از رأس مثلث می‌باشد. چنانچه فاصله‌ی هواپیما از هر یک از سنجش‌گرها یکسان باشد، هواپیما در راستای مناسب جهت فرود قرار دارد.

زمانی که فاصله‌های غیر یکسان از باند فرود نرمال برای هر یک از سنجش‌گرها وجود داشته باشد نیاز به شناسایی مناسب‌ترین مکان جهت قرارگیری DME ثانویه وجود دارد و همین منظور سیستم به صورت پویا در نظر گرفته می‌شود به‌گونه‌ای که پس از شناسایی سنتر لاین مفروض بر اساس نحوه قرارگیری اولیه هر یک از سنجش‌گرها در انتها جایگاه مناسب و محل قرارگیری بهینه برای ثانویه شناسایی خواهد شد بدیهی است این شرایط تنها در صورت غیر یکسان بودن هر دو سنجش‌گر حاصل خواهد شد.

همان‌طور که در شکل ۲ داده شده‌است، ابتدا و براساس نابرابر بودن هر دو سنجش‌گر، سنترلاین پیشنهاد شده مانند آنچه در شکل ۲ به خط قرمز نشان داده شده‌است شناسایی می‌شود. با توجه به غیر ایده‌آل بودن باند فرود، نیاز به بهبود جایگذاری و شناسایی مکان‌یابی بهینه در $DME2$ وجود دارد که پس از شناسایی جایگاه مناسب به

جدول ۱: بررسی اثرگذاری الگوریتم گرگ خاکستری بر کاهش تأثیر توربولانس

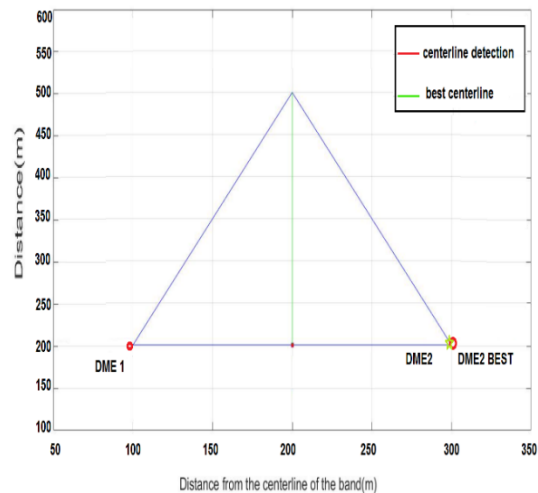
پارامترها	بدون الگوریتم گرگ خاکستری	با الگوریتم گرگ خاکستری
کاهش تأثیر توربولانس(%)	۲۰٪	۴۰٪
احتمال خطای فرود	۱۰٪	۵٪
دقت اندازه‌گیری فاصله	۸۵٪	۹۵٪
پیچیدگی محاسباتی	بالا	پایین



شکل ۵: نمایش خروجی با در نظر گرفتن شرایط غیر ایده‌آل (وزش باد لحظه‌ای)

در راستای تحقق فرود ایمن‌تر، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری برای به حداقل رساندن خطاهای مربوط به توربولانس پیشنهاد شده‌است، این الگوریتم با بهینه‌سازی موقعیت دستگاه‌های اندازه‌گیری فاصله در هواپیما به کاهش توربولانس کمک می‌کند و ایمنی فرود را در شرایط غیر ایده‌آل افزایش می‌دهد. صنعت هوانوردی با چالش مستمر اطمینان از فرود ایمن مواجه است، به‌ویژه زمانی که تأثیر توربولانس دقت این مانورهای حیاتی را مختل کند. انطباق‌پذیری الگوریتم در حل مسئله، مهم‌ترین عامل در پرداختن به این چالش بوده و ظرفیت آن برای تنظیم دقیق قرارگیری دستگاه‌های اندازه‌گیری فاصله به خلبانان این امکان را می‌دهد که حتی در مواجهه با تأثیر توربولانس داده‌های دقیق را دریافت کنند که در نهایت منجر به فرود ایمن‌تر می‌شود. همان‌طور که به آینده ایمنی هوانوردی توجه خواهیم داشت، واضح است که ادغام فناوری پیشرفته و استراتژی‌های نوآورانه، مانند الگوریتم گرگ خاکستری، نقشی اساسی ایفا می‌کند. با این حال، توجه به این نکته مهم است که تلاش برای افزایش ایمنی صرفاً بر یک

به شکل ۲) از DME2 نسبت به سنترلاین قرار داده شده‌است. با در نظر گرفتن سیستم فازی بازه‌ای، تفاوت بسیار ناچیز و موردقبول شناسایی شده و همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سنترلاین پیشنهادشده منطبق بر سنترلاین موردقبول جهت فرود قرار گرفته است.



شکل ۴: نمایش خروجی حاصل از فرضیه‌ی اساسی فازی بازه‌ای

در ادامه و در شکل ۵ به ارائه‌ی نتیجه‌ی حاصل از نوآوری کار و در نظر گرفتن شرایط غیرایده‌آل جوی (وزش باد) پرداخته شده‌است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن شرایط وزش باد لحظه‌ای از سمت سنجش‌گر شماره‌ی ۱ به بدنه‌ی هواپیما، شرایط فرود در حالت دشوارتر قرار خواهد گرفت. بر اساس خروجی شکل ۵ می‌توان بیان کرد که خط سبز رنگ لاین فرود بهینه را نشان می‌دهد. خط قرمز شرایط فرود اولیه با در نظر گرفتن فاصله غیر یکسان سنجش‌گرها از سنترلاین را نشان می‌دهد که در صورت جابجایی سنجش‌گر شماره‌ی ۲ و استقرار آن در محلی که با ستاره‌ی سبز نشان داده شده‌است، می‌توان لاین فرود را به‌درستی و منطبق بر خط سبز نشان داد. اما اضافه شدن پدیده‌ی وزش باد و شرایط غیر ایده‌آل ایجادشده منجر به فرود در شرایط نادرست و منطبق بر خط زرد رنگ می‌شود. بدیهی است به‌منظور بهبود شرایط فرود می‌توان با شناسایی مکان درست سنجش‌گر شماره‌ی ۲؛ شرایط فرود را تا حدود زیادی به حالت ایده‌آل نزدیک کرد.

کند. به همین دلیل، در صنعت هوانوردی که در آن دقت و ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است، این روش می‌تواند نقش کلیدی در کاهش خطاهای فرود و بهبود عملکرد کلی ایفا کند.

در شرایط جوی غیرایده‌آل، مانند وزش باد شدید یا تغییرات ناگهانی آب‌وهوا، عملکرد صحیح دستگاه‌های سنجش فاصله و دقت در اندازه‌گیری بسیار دشوار می‌شود. روش پیشنهادی با استفاده از منطق فازی بازه‌ای به شناسایی بهینه‌ترین موقعیت برای دستگاه‌های سنجش فاصله کمک می‌کند تا تأثیر این شرایط جوی بر دقت اندازه‌گیری به حداقل برسد. به‌عنوان مثال، در مواردی که فاصله‌های غیر یکسان از باند فرود وجود دارد، این روش به‌طور پویا جایگاه بهینه سنجش‌گرهای ثانویه را شناسایی می‌کند و بنابراین، امکان فرود دقیق‌تر و ایمن‌تر را فراهم می‌آورد.

درنهایت، ادغام این تکنیک‌های نوآورانه در صنعت هوانوردی، به‌ویژه در فرودگاه‌های پرتردد و شرایط جوی نامساعد، می‌تواند بهبودهای قابل‌توجهی در امنیت و کارایی پروازها به همراه داشته باشد. با توجه به چالش‌های مداوم در پیش‌بینی و مدیریت شرایط جوی، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته مانند منطق فازی بازه‌ای و الگوریتم گرگ خاکستری، می‌تواند به‌طور چشمگیری در کاهش خطاها و افزایش ایمنی و دقت فرود مؤثر واقع شود. این رویکردها نه تنها به بهبود عملکرد فرودهای کنونی کمک می‌کنند بلکه به‌عنوان پایه‌ای برای تحقیقات و پیشرفت‌های آینده در صنعت هوانوردی نیز به شمار می‌آیند.

برای بهبود و کاربرد عملی روش‌های ارائه‌شده در صنعت هوانوردی، پیشنهادها زیر قابل‌توجه است:

اولین پیشنهاد، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم گرگ خاکستری و منطق فازی بازه‌ای برای طراحی و بهبود سیستم‌های هدایت و فرود هوایی در شرایط جوی نامطلوب است. با به‌کارگیری این روش‌ها، می‌توان به‌طور دقیق‌تری موقعیت بهینه دستگاه‌های سنجش فاصله (DME) را تعیین کرده و تأثیر شرایط جوی را به حداقل رساند. این تکنیک‌ها می‌توانند به طراحان سیستم‌های هدایت پرواز کمک کنند تا سیستم‌های دقیق‌تری برای بهبود ایمنی و کارایی فرود هواپیما در شرایط مختلف جوی توسعه دهند. همچنین، این روش‌ها می‌توانند در شبیه‌سازی‌های پیشرفته و برنامه‌ریزی استراتژیک برای بهبود عملکرد سیستم‌های فرود و کاهش احتمال خطاهای ناشی از توربولانس و دیگر عوامل جوی به کار روند.

الگوریتم یا فناوری نیست. تلاش‌های مشترک در سراسر صنعت هوانوردی، بهبود پیش‌بینی آب‌وهوا، و تعهد مداوم به تحقیق و توسعه، همگی در کاهش بیشتر خطاهای مربوط به تأثیر توربولانس در هنگام فرود بسیار مهم هستند. در نتیجه، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، با دقت و سازگاری قابل‌توجه خود، به‌عنوان یک چراغ امید در حرکت برای فرود ایمن‌تر عمل می‌کند. این هدف باهدف گسترده‌تر به حداقل رساندن تأثیرات توربولانس در هنگام فرود هواپیما هماهنگ است. براساس جدول ۱ با توجه به مقادیر در جدول، مشخص است که الگوریتم گرگ خاکستری توانسته است بهبود کاهش اثرات توربولانس را از ۲۰٪ به ۴۰٪ افزایش دهد. این نشان‌دهنده اثر مثبت و بهبوددهندگی در کاهش تأثیرات توربولانس با استفاده از این الگوریتم می‌باشد. احتمال خطای فرود از ۱۰٪ به ۵٪ کاهش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که این الگوریتم بهبود قابل‌توجهی در امنیت فرود هواپیما در شرایط غیرایده‌آل دارد. دقت اندازه‌گیری از ۸۵٪ به ۹۵٪ افزایش پیدا کرده است. این به معنای بهبود دقت در تعیین موقعیت دستگاه سنجش فاصله می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به شناسایی مکان بهینه‌ی سیستم سنجش‌گر فاصله جهت شناسایی مناسب‌ترین تقرب در فرود هواپیما و شناسایی سنترلاین بهینه پرداخته شد. از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در راستای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل اطلاعات، جای‌گیری اولیه هر یک از سنجش‌گرها و موقعیت اولیه هواپیما و فاصله آن نسبت به هر یک از این دو سیستم سنجش‌گر می‌باشد. پس از اتمام فاز اولیه که شناسایی فاصله اولیه هواپیما نسبت به هر یک از سنجش‌گرها و همچنین شناسایی یکسان یا غیر یکسان بودن فاصله‌ی هر یک از سنجش‌گرها نسبت به سنترلاین اصلی پرداخته شد، در فاز دوم به بهینه‌سازی مکان قرارگیری DME ثانویه پرداخته می‌شود و در مرحله‌ی نهایی نیز به انطباق بر سنترلاین واقعی باند فرود شناسایی شده پرداخته خواهد شد.

با توجه به نیازهای پیچیده و خاص صنعت هوانوردی، بهینه‌سازی موقعیت دستگاه‌های سنجش فاصله و کاهش خطاهای مربوط به فرود در شرایط جوی نامطلوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از منطق فازی بازه‌ای برای تعیین موقعیت بهینه دستگاه‌های سنجش فاصله، یک روش نوآورانه است که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی دقت و ایمنی فرود هواپیما را بهبود بخشد. این روش با توجه به ارزیابی فازی فاکتورهای مختلفی مانند شرایط آب‌وهوا، مسیر پرواز، و متغیرهای مرتبط، قادر است موقعیت بهینه دستگاه‌ها را شبیه‌سازی و پیش‌بینی

- Conference (DDCLS), 243-248. <https://doi.org/10.1109/DDCLS58216.2023.10166739>.
- [6] Singh, D.J., & Verma, N.K. (2022). Design of Fuzzy Control System for Generic Aircraft/UAVs. 2022 Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T53885.2022.9776784>.
- [7] Tang, L., Yang, M., & Sun, J. (2021). Adaptive fuzzy constraint control for switched nonlinear systems in nonstrict feedback form. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 35, 1594 - 1611. <https://doi.org/10.1002/acs.3277>.
- [8] Teimoori, M., Taghizadeh, H., Pourmahmoud, J., & Azimi, M.H. (2021). A Multi-Objective Grey Wolf Optimization Algorithm for Aircraft Landing Problem. <https://doi.org/10.22105/jarie.2021.261337.1230>.
- [9] G. Feng and J. Ma, "Quadratic stabilization of uncertain discrete-time fuzzy dynamic systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems* <https://doi.org/10.1109/81.964424>.
- [10] Ning, B. A. I., Xiaochao, L. I. U., Juefei, L. I., Zhuangzhuang, W. A. N. G., Pengyuan, Q. I., SHANG, Y., & Zongxia, J. I. A. O. (2023). An aircraft brake control algorithm with torque compensation based on RBF neural network. *Chinese Journal of Aeronautics*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.06.010>.
- [11] Miller, J.D., Godfroy-Cooper, M., & Szoboszlai, Z.P. (2021). Degraded Visual Environment Mitigation (DVE-M) Program, Bumper RADAR Obstacle Cueing Flight Trials 2020. Proceedings of the Vertical Flight Society 77th Annual Forum. <https://doi.org/10.4050/F-0077-2021-16747>.
- [12] Rabah, M., Haghbayan, H., Immonen, E., & Plosila, J. (2022). An AI-in-Loop Fuzzy-Control Technique for UAV's Stabilization and Landing. *IEEE Access*, 10, 101109-101123. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3208685>.
- دومین پیشنهاد، ادغام این روش‌ها با سیستم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی دینامیک‌های پرواز در زمان واقعی است. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرها و سیستم‌های اندازه‌گیری، می‌توان مدل‌های پیش‌بینی دقیقی برای شرایط جوی و تأثیرات آن بر فرود هواپیما ایجاد کرد. این مدل‌ها می‌توانند به سیستم‌های خودکار فرود کمک کنند تا به صورت پویا و در زمان واقعی موقعیت دستگاه‌های سنجش فاصله را تنظیم کنند و به‌طور مؤثرتری واکنش نشان دهند. این ادغام فناوری‌ها می‌تواند به بهبود ایمنی پرواز و کاهش نیاز به دخالت انسانی در شرایط بحرانی کمک کرده و فرآیند فرود را سریع‌تر و دقیق‌تر کند.

۶- منابع

- [1] Öztürk, Ş., & Örs, İ. (2020). An overview for effects on aerodynamic performance of using winglets and wingtip devices on aircraft. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaa/issue/62591/945018>.
- [2] Ostroumov, I., Marais, K., & Kuzmenko, N. (2022). Aircraft positioning using multiple distance measurements and spline prediction. *Aviation*, 26(1), 1-10. <https://doi.org/10.3846/aviation.2022.16589>.
- [3] Pytka, J., Budzyński, P., Tomiło, P., Michałowska, J., Błażejczak, D., Gnapowski, E., ... & Gierczak, K. (2022). Measurement of aircraft ground roll distance during takeoff and landing on a grass runway. *Measurement*, 195, 111130. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111130>
- [4] Lo, S., Chen, Y. H., Enge, P., Pelgrum, W., Li, K., Weida, G., & Soelter, A. (2020). Flight test of a pseudo-ranging signal compatible with existing distance measuring equipment (DME) ground stations. *Navigation*, 67(3), 567-582. <https://doi.org/10.1002/navi.376>.
- [5] Zhuang, H., Zhang, X., Sun, Q., & Chen, Z. (2023). Fuzzy Adaptive Sliding Mode Attitude Control of Quaternion Model for Aircraft Based on Back-stepping Method. 2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems

