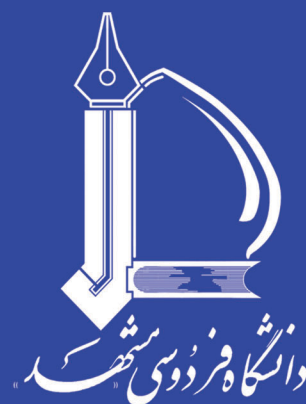




- ۱ ارزش کلانتری- میلاد مهرپویا
علیرضا پورمند - مجید سلطانی
- ارزیابی ترمودینامیکی سامانه زیست توده ای
تولید همزمان برق، گرما و سرما با چیلر
جذبی پربازده و جعبه داغ برای کاربرد
ساختمانی
- ۲۷ ابراهیم افشاری - مهدیه هراتیان اول
نبی جهاننخ
- شبیه سازی عددی افزایش هیدروژن افزوده
شده به گاز طبیعی بر مشخصه های احتراق در
مشعل های صنعتی
- ۴۳ محمد تولمی - اکبر نظری گلشن
سید سلمان نورآذر
- تحلیل جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی
همراه تزریق جریان از دیوارها با استفاده از
مشتق کسری
- ۶۵ محمدصادق میرجلیلی - محمد
جعفری
محسن سلطانی
- تحلیل نیرویی و تنش پین پوشر کوره
القائی: تأثیر لقی شعاعی و محوری بین
اعضای درگیر و طول تکیه گاه پین
- ۸۳ محمد علی قلی پور شهرکی
بهزاد قاسمی - افراسیاب ریسی
مرتضی بیاره
- شبیه سازی عددی کارایی دارورسانی
مغناطیسی در جریان مغزی بیماران
دیابتی بر اساس بازسازی هندسه واقعی
از تصاویر CT
- ۹۷ کیوان ورمزیاری - اکبر اللهوردی زاده
فرید وکیلی تهامی - پژمان نمه شیرینی
- ارزیابی پاسخ مکانیکی مغز انسان در
هنگام برخورد با توپ گلف
- ۱۲۱ علی زاهدی - زهرا سادات امینی
سید محمد عرب
- تحلیل پدیده شکست ورق دولایه آلومینیوم
- مس تغییر شکل یافته در فرایند شکل دهی
تدریجی تک نقطه ای



نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

ISSN: 2008-918X

مدیر مسئول: دکتر حمید نیازمند

سر دبیر: دکتر مهران کدخدایان
صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه:

دانشیار، دانشگاه آرام آی تی، استرالیا	دکتر اکبر آفاقی خطیبی
دانشیار، دانشگاه استرالیای جنوبی، استرالیا	دکتر کاظم ابهری
استاد، دانشگاه آرام آی تی، استرالیا	دکتر علی اکبر اکبرزاده
استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوا فضا	دکتر مسعود برومند
دانشیار، دانشگاه سوانزی، انگلستان	دکتر حامد حداد خداپرست
استاد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک	دکتر سیدمحمد رضا خلیلی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر احسان روحی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر محمود شریعتی
استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک	دکتر ابراهیم شیرانی چهارسوقی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر مسعود طهانی
استاد، دانشگاه کالیفرنیا، گروه بیومکانیک سلول مولکولی، آمریکا	دکتر محمد رضا کاظم پور مفرد
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر مهران کدخدایان
دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر حمید معین فرد
استاد، دانشگاه نیو کاسل، استرالیا	دکتر بهداد مقتدری
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر محمد رضا مه پیکر
استاد، دانشگاه ایالتی کنسو آمریکا	دکتر سیمین ناصری
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر حمید نیازمند
استادیار، دانشگاه ایالتی کنسو آمریکا، گروه مهندسی عمران و محیط زیست	دکتر محمد جنیدی
پژوهشگر، دانشگاه یو تی آستین، آمریکا	دکتر سید محمود موسوی
پژوهشگر، دانشگاه ویکتوریا، دانشکده مهندسی و علوم کامپیوتر، کانادا	دکتر محمد رضا پندار

ویرایش و صفحه آرایی: سیده عاطفه نوعی

ویراستار: الهام دهقان

نشانی: مشهد - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده مهندسی - دفتر نشریه تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۶۰۲۴ دورنگار: ۰۵۱-۳۸۷۶۳۳۰۱

وب سایت: <http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir>

پست الکترونیکی: mechanic-ferdowsi@um.ac.ir

شماره نامه مجوز وزارت علوم، تحقیقات و فناوری: ۱۳۳۳۷۵ مورخ ۱۳۹۰/۷/۱۹

نمایه شده در پایگاه‌های معتبر: EBSCO, Magiran, SID, ISC, DOAJ

فهرست مطالب

۱	آرش کلانتری - میلاد مهرپویا - علیرضا پورمند مجید سلطانی	ارزیابی ترمودینامیکی سامانه زیست توده‌ای تولید همزمان برق، گرما و سرما با چیلر جذبی پربازده و جعبه داغ برای کاربرد ساختمانی
۲۷	ابراهیم افشاری - مهدیه هراتیان اول - نبی جهانتیغ	شبیه‌سازی عددی افزایش هیدروژن افزوده شده به گاز طبیعی بر مشخصه‌های احتراق در مشعل‌های صنعتی
۴۳	محمد تولمی - اکبر نظری گلشن - سید سلمان نورآذر	تحلیل جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی همراه تزریق جریان از دیوارها با استفاده از مشتق کسری
۶۵	محمدصادق میرجلیلی - محمد جعفری محسن سلطانی	تحلیل نیرویی و تنش پین پوشر کوره القائی: تأثیر لقی شعاعی و محوری بین اعضای درگیر و طول تکیه‌گاه پین
۸۳	محمد علی قلی پور شهرکی - بهزاد قاسمی افراسیاب ریسی - مرتضی بیاره	شبیه‌سازی عددی کارایی دارورسانی مغناطیسی در شریان مغزی بیماران دیابتی بر اساس بازسازی هندسه واقعی از تصاویر CT
۹۷	کیوان ورمزیاری - اکبر اللهوردی زاده فرید وکیلی تهامی - پژمان نمه شیر	ارزیابی پاسخ مکانیکی مغز انسان در هنگام برخورد با توپ گلف
۱۲۱	علی زاهدی - زهرا سادات امینی - سید محمد عرب	تحلیل پدیده شکست ورق دولایه آلومینیوم - مس تغییر شکل یافته در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای

Thermodynamic Evaluation of a Biomass-Based Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) System with a High-Performance Absorption Chiller and Hot-Box for Building Application

Research Article

Arash Kalantari¹ , Milad Mehrpooya², Alireza Pourmand³, Majid Soltani⁴ 

 [10.22067/jacsm.2025.94113.1339](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.94113.1339)

Abstract: This study presents the design and thermodynamic analysis of a novel biomass-based trigeneration system intended for building applications. The system integrates an open Brayton cycle, a supercritical carbon dioxide Brayton cycle, and a high-performance absorption chiller. Energy and exergy analyses were employed to evaluate system performance. A key innovation lies in the use of a hot box for efficient heat recovery, enabling the absorption chiller to achieve a coefficient of performance (COP) of 82%. Under baseline conditions, the system demonstrates energy and exergy efficiencies of 83.65% and 47.78%, respectively, with total exergy destruction reaching 4366 kW. Raising the hot box outlet temperature to 160°C further improves the chiller's COP to 82.21% (energy-based) and 32.33% (exergy-based). Parametric analysis indicates that preheating air temperature, CO₂ turbine inlet temperature, and hot box outlet temperature have a substantial impact on system behavior. The results confirm the system's strong performance and adaptability, underscoring its suitability for integration into hybrid energy systems utilizing renewable resources.

Keywords: Multigeneration, Biomass, High-Efficiency Absorption Chiller, Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle, Energy and Exergy Analysis.

1. Introduction

The depletion of fossil fuels and the rise in greenhouse gas emissions have increased the demand for sustainable and high-efficiency energy systems [1]. Traditional fossil fuel-based power generation faces major challenges, including unstable fuel prices, high costs, and severe environmental impacts [2]. Buildings are responsible for nearly 40% of global energy consumption, with heating and cooling accounting for about 80% of this usage [3]. Among renewable energy sources, biomass is particularly attractive due to its wide availability and ability to produce heat, power, and biofuels [4]. Integrating biomass with advanced technologies can help reduce fossil fuel dependency and emissions while supporting environmental sustainability [5]. Combined heat and power (CHP) and combined cooling, heating, and power (CCHP) systems are effective solutions for improving overall efficiency, saving 20–30% more energy compared to

conventional plants [6]. However, most previous biomass-based CCHP studies have focused mainly on producing chilled water using absorption refrigeration cycles, neglecting the potential to simultaneously generate hot water. This study proposes a novel biomass-based CCHP system that integrates direct biomass combustion, a supercritical CO₂ Brayton cycle, and an ammonia–water absorption refrigeration cycle. The system includes a multi-stage heat recovery unit, called the hot box, which captures waste heat at three different points and transfers it to the absorption cycle to produce both chilled and hot water with a COP above 82%. The schematic layout of the proposed system is shown in Figure 1, highlighting its three main subsystems: the biomass combustion chamber, the supercritical CO₂ cycle, and the absorption refrigeration unit. This design maximizes waste heat recovery, significantly improving the energy and exergy efficiencies of the system. The main objectives of this work are to design and analyze the proposed CCHP system, evaluate its performance through comprehensive energy and exergy analyses, and introduce the Fuel Saving Ratio (FSR) as a new performance indicator to assess its potential for sustainable building energy management.

2. Methodology

Thermodynamic modeling of the designed integrated system was conducted to evaluate key performance parameters such as energy efficiency, electrical efficiency, fuel savings rate, exergy destruction, exergy destruction ratio, and exergy efficiency. The initial assumptions for the biomass-based CCHP system included: all components operate under thermodynamic equilibrium or steady-state conditions; ambient temperature and pressure are 25°C and 101.3 kPa, respectively; outlet streams from separators are saturated; kinetic and potential energy changes are negligible; pressure drops in connections and heat exchangers are ignored; the working fluid in the absorption refrigeration cycle is an ammonia–water solution; the system is assumed adiabatic with no heat loss to the environment, allowing exergy

* Manuscript received June 18, 2025, Revised August 31, 2025, Accepted September 08, 2025 .

¹ M.Sc. Graduate in Energy Systems Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

² M.Sc. Student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

³ M.Sc. Graduate in Aerospace Engineering, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

⁴ Corresponding Author: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
Email: msoltani@kntu.ac.ir

destruction to be calculated based on the difference between fuel and product exergy. Following prior studies, the Peng Robinson equation of state was employed for gas mixture property calculations within Aspen HYSYS software. Mass, energy, and exergy balances were applied to all system components to characterize system behavior. Exergy analysis included calculation of exergy destruction share and exergy efficiency for each component, with relevant equations and results tabulated for detailed assessment.

3. Results

This section presents the energy and exergy analysis results of the integrated CCHP system. The base-case model outputs include 3001 kW thermal power, 1283 kW cooling power, and 2085 kW electrical power, with overall energy efficiency, electrical efficiency, and exergy efficiency of 83.65%, 27.39%, and 47.78%, respectively. The inclusion of a hot box in the absorption refrigeration cycle significantly improves the coefficient of performance (COP), achieving 82.21% (first law) and 32.33% (second law) enhancements. Exergy destruction totals 4366 kW, predominantly in the biomass burner (39.46%) and the supercritical CO₂ Brayton cycle heat exchangers, indicating key areas for thermal recovery improvements. Increasing heat absorption in key heat exchangers (E-100, E-101, and E-104) enhances both cooling/heating output and electrical generation. Exergy efficiency comparison shows phase separators perform best, while heat exchangers have substantial potential for thermodynamic optimization. Compared to similar biomass-based studies, the proposed system demonstrates superior COP, energy, and exergy efficiencies, mainly due to thermal integration, hot box utilization, and a recuperator in the supercritical CO₂ cycle. Fuel savings analysis confirms the process's strong potential for energy conservation and effective replacement of conventional systems through advanced thermal integration.

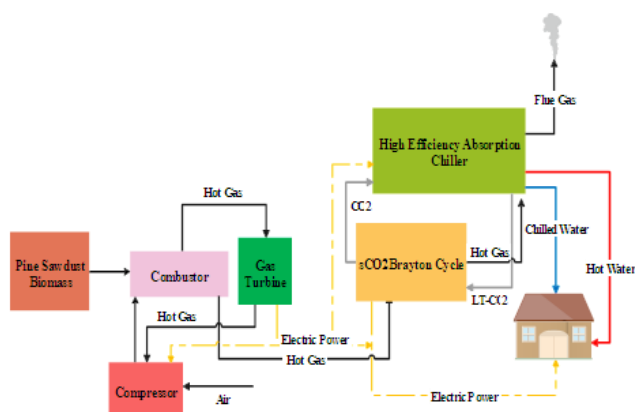


Figure 1 Overall schematic of the new CCHP system

4. Conclusion

This study proposes a novel biomass-fueled integrated CCHP system featuring multi-stage heat recovery from a gas turbine. The system demonstrates superior fuel savings and higher energy and exergy efficiencies compared to previous similar studies. A key innovation is the high-efficiency absorption chiller achieving a coefficient of performance (COP) above 82%, enabled by the use of a hot box and enhanced heat recovery. Energy and exergy analyses, alongside targeted

sensitivity assessments of critical parameters, reveal that the hot box significantly improves the overall exergy efficiency of the CCHP system. The results indicate that the inlet temperature of supercritical CO₂ to the turbine has a more pronounced effect on energy and exergy efficiencies than the combustion air preheating temperature. Notably, increasing the CO₂ turbine inlet temperature yields similar qualitative effects to raising the air preheat temperature, with heating and cooling outputs of the absorption chiller remaining stable—implying balanced energy transfer through the hot box. Key findings include a fuel savings rate confirming the system's strong potential as a thermal integration solution, exergy destruction mainly concentrated in the biomass burner (39.46% of total 4366 kW), and maximum permissible temperatures identified as 750°C for air preheating, 700°C for CO₂ turbine inlet, and 170°C for the hot box outlet. Under these optimal conditions, heat absorption in heat exchangers 100, 101, and 104 is maximized, resulting in exergy efficiencies of 51%, 54%, and 53%, respectively.

References:

- [1] Javaherideh S, SafariSabab S. Exergy-Economic and Energy Investigation of a Combined Cycle of Simultaneous Production of Rankine Steam and Ejector Refrigeration Cycle Using Solar Energy. *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics* 2025;37:29–48.
<https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.88420.1267>
- [2] Kardgar A. Evaluation of an integrated solar-geothermal energy system to provide power, heat and cooling. *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics* 2022;34:19–34.
<https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.76152.1108>
- [3] Saoud A, Bruno JC, Boukhchanaa Y, Fellah A. Performance investigation and numerical evaluation of a single-effect double-lift absorption chiller. *Applied Thermal Engineering* 2023;227:120369.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120369>
- [4] Akhtari S, Sowlati T, Day K. Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014;33:117–27.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.058>
- [5] Nguyen VG, Sharma P, Ağbulut Ü, Le HS, Cao DN, Dzida M, et al. Improving the prediction of biochar production from various biomass sources through the implementation of explainable machine learning approaches. *Int J Green Energy* 2024;21:2771–98.
<https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2326076>
- [6] Abdoos B, Pourfayaz F, Ahmadi MH, Gholami A. Energetic/exergetic parametric study of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system coupled with a local cellululosic biomass combustion chamber. *Energy Reports* 2024;12:3770–7.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.051>



ارزیابی ترمودینامیکی سامانه زیست توده‌ای تولید همزمان برق، گرما و سرما با چیلر جذبی پربازده و جعبه داغ

برای کاربرد ساختمانی*

مقاله پژوهشی

آرش کلاتری^(۱) میلاد مهرپویا^(۲) علیرضا پورمند^(۳) مجید سلطانی^(۴)

doi 10.22067/jacsm.2025.94113.1339

چکیده در این پژوهش، یک سامانه نوین تولید همزمان برق، گرما و سرما مبتنی بر انرژی زیست توده برای کاربردهای ساختمانی طراحی و به صورت ترمودینامیکی تحلیل شده است. این سامانه شامل چرخه برایتون باز، چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی و چیلر جذبی با ضریب عملکرد بالا است. تحلیل انرژی و انرژی برای ارزیابی عملکرد به کار رفته است. یکی از ویژگی‌های برجسته، استفاده از چیلر جذبی با ضریب عملکرد ۸۲ درصد به واسطه بازیابی مؤثر حرارت از طریق جعبه داغ است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد بازده انرژی و انرژی سامانه به ترتیب ۸۳/۶۵ و ۴۷/۷۸ درصد است. همچنین با افزایش دمای سیال خروجی جعبه داغ به ۱۶۰ درجه سلسیوس، ضریب عملکرد چیلر به طور قابل توجهی ارتقا می‌یابد. تحلیل پارامتری حاکی از تأثیر قابل توجه دماهای پیش‌گرمایش هوا، ورودی توربین و خروجی جعبه داغ بر عملکرد سامانه است. در دماهای عملیاتی خاص، بیشینه جذب حرارت و بیشترین بازده انرژی به ترتیب ۵۱، ۵۴ و ۵۳ درصد به دست آمده است. نتایج نشان دهنده کارایی بالا و قابلیت این سامانه برای استفاده در سامانه‌های انرژی ترکیبی تجدیدپذیر است.

واژه‌های کلیدی تولید همزمان، زیست توده، چیلر جذبی پربازده، چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی، تحلیل انرژی و انرژی.

مقدمه

تقریباً ۴۰ درصد از انرژی، یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جهان محسوب می‌شوند [6]. بر اساس گزارش استراتژی گرمایش و سرمایش اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۶، سرمایش و گرمایش حدود ۸۰ درصد از کل مصرف انرژی ساختمان‌ها را در بر دارد [7]. در این راستا، برای تولید برق، اخیراً استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی و زیست توده، توجه فزاینده‌ای را برای کاهش اثرات مخرب زیستی به خود جلب کرده است [7]. زیست توده یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر با پتانسیل بالا برای تأمین انرژی مورد نیاز است [8]. زیست توده به دلایل مقابله با مسائلی مانند گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی و همچنین حفظ کیفیت خاک، برای

با کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از سامانه‌های کارآمد انرژی به ویژه سامانه‌های انتگراسیون شده انرژی تجدیدپذیر و پایدار توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است [1-3]. با توجه به تقاضای زیاد انرژی در سطح جهان، تولید برق از منابع انرژی تجدیدناپذیر، به ویژه سوخت‌های فسیلی با روندی رو به رشد همراه بوده است. با این حال، تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، اثرات منفی اقتصادی و زیست محیطی مانند بی‌ثباتی قیمت‌ها، هزینه‌های بالای واردات، و انتشار گازهای گلخانه‌ای به همراه دارد که نمی‌توان آن‌ها را نادیده گرفت [4,5]. از این نظر، ساختمان‌ها، با مصرف

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۳/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۶/۱۷ می باشد.

(۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(۳) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

(۴) نویسنده مسئول، دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

پایداری محیط زیست ضروری است [9]. ادغام زیست‌توده با فناوری‌های جدید می‌تواند آن را به گرما، برق، سوخت زیستی، زغال چوب، مواد شیمیایی و غیره تبدیل کند [10]. به عنوان مثال بیودیزل و بیوجاز دو محصول شناخته شده‌ای هستند که به ترتیب از طریق استریفیکاسیون و پیرولیز از زیست‌توده به دست می‌آیند [4,11]. سامانه‌های ترکیبی حرارت و توان (CHP) و سامانه‌های ترکیبی سرمایش، حرارت و توان (Combined cooling heating and power) (CCHP) به دلیل راندمان بالا، سازگاری با محیط زیست و قابلیت اطمینان بالا، یک فناوری امیدوارکننده در مقایسه با سایر فناوری‌های جایگزین محسوب می‌شوند. در ضمن، ادغام این سامانه‌ها با منابع انرژی تجدیدپذیر وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انتشار آلاینده‌ها را نیز کاهش می‌دهد [10,12]. نگرانی‌های زیست‌محیطی در مورد کاهش گازهای گلخانه‌ای و توافق‌نامه‌های بین‌المللی و همچنین صرفه‌جویی در انرژی، بخش‌های مختلف را به استفاده از سامانه‌های خنک‌کننده، گرمایش و تولید همزمان متمایل کرده است. این سامانه‌ها می‌توانند بیش از یک محصول تولید کنند [4]. سامانه‌های تولید همزمان می‌توانند مقدار معینی سرما، گرما یا نیرو تولید کنند و ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مقایسه با نیروگاه‌های معمولی داشته باشند [13].

در خصوص سامانه‌های تولید همزمان مطالعات زیادی صورت گرفته است که در آن‌ها منابع انرژی مختلف و هیبریدی نیز حضور دارند و عموماً از سیکل تبرید جذبی برای تولید توان سرمایشی استفاده شده است که برای نمونه می‌توان به مطالعه صورت گرفته توسط جلیلی و همکاران [14] اشاره کرد که در فرایندی یکپارچه بر اساس سوخت زیست‌توده و گازسازی برای تولید گاز سنتز به عنوان سوخت توربین گازی استفاده شده است و تولید سرمایش از طریق سیکل تبرید جذبی بوده است. سیکل تبرید پیشنهادی از محلول آب، لیتیوم و برم استفاده کرده است و سیکل توربین گازی با سهم ۶۱ درصدی و چیلر جذبی با سهم ۶ درصد دارای بالاترین و کمترین تخریب انرژی هستند. علاوه بر این در مقاله دیگری لوزانو و همکاران [15] از انرژی زیست‌توده و خورشیدی در یک سامانه تولید همزمان استفاده کردند. از جمله مهم‌ترین نتایج این مطالعه می‌توان به بازده الکتریکی معادل ۱۸/۲ درصد، بازده کلی برابر با ۶۲ درصد، دوره بازگشت سرمایه ۶/۸ سال و هزینه هم‌سطح شده برق (Levelized cost of electricity) (LCOE) برابر با ۰/۲۸۷ دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت اشاره کرد. استفاده مستقیم از انرژی احتراق

زیست‌توده نیز توسط عبدوس و همکاران [12] در یک سامانه تولید همزمان بررسی شده و بخش‌های سامانه شامل محفظه احتراق زیست‌توده، سیکل رانکین بخار و تبرید جذبی با حلال لیتیوم، برم و آب می‌باشد. از مهم‌ترین نتایج این مطالعه می‌توان به ضریب عملکرد ۴۵/۳۴ درصد چیلر جذبی و بازده انرژی ۲۴/۳ درصدی اشاره کرد. همچنین ماو و همکاران [16] یک سامانه تولید همزمان سه‌گانه را ارائه کردند که سیکل تبرید جذبی آن با محلول لیتیوم بروماید - آب کار می‌کند و کارایی انرژی و انرژی آن به ترتیب ۵/۱۹ درصد و ۶/۱۲ درصد است و دوره بازگشت سرمایه سامانه نیز بین ۰/۶۷ الی ۵/۲ سال گزارش شده است. همچنین احمدی و همکاران [17] نیز از احتراق مستقیم زیست‌توده برای تولید محصولات برق، هیدروژن، گرمایش و سرمایش استفاده می‌کنند در حالی که سیکل تبرید جذبی از محلول لیتیوم بروماید - آب استفاده می‌کند و ضریب عملکرد و کارایی انرژی سامانه به ترتیب ۴۳ درصد و ۲۲/۲ درصد گزارش شده است. از دیگر سامانه‌های تولید همزمان که مبتنی بر احتراق مستقیم زیست‌توده است، می‌توان به مقاله منتشر شده توسط ستار و همکاران [18] اشاره کرد که زیرسامانه‌ها شامل محفظه احتراق زیست‌توده، سیکل ارگانیک رانکین، توربین گازی و سیکل تبرید جذبی است. این سامانه دارای راندمان الکتریکی ۲۴/۲ درصد، کارایی ۴۳/۵ درصد و ظرفیت سرمایشی معادل با ۳۸/۵ کیلووات است و پارامتر ضریب عملکرد سامانه تبرید معادل با ۰/۵۷ محاسبه شده است. سامانه‌های تولید همزمان نیز بر اساس سوخت گازی توسعه یافته‌اند که در آن‌ها از سامانه تبرید جذبی با محلول آب - آمونیاک استفاده شده است. از این موارد می‌توان به مقاله بیشال و همکاران [19] اشاره کرد که در آن یک ادغام حرارتی میان چرخه دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی، توربین گازی، چرخه تبرید جذبی و چرخه آلی رانکین انجام شده است. از مهم‌ترین خروجی‌ها می‌توان به ضریب عملکرد سامانه تبرید و ضریب بهره‌برداری انرژی (Energy utilization factor) به ترتیب برابر با ۰/۷۲ و ۴۹/۰۹ درصد اشاره کرد. در مطالعه‌ای مشابه از بیشال و همکاران [20] یک سامانه تولید همزمان برق و سرما ارائه داده‌اند که با نمک‌زدایی و تولید آب شیرین ادغام شده است. سامانه تولید برق از نوع خنک‌سازی جزئی با دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی (Supercritical CO₂ Partial Cooling) است و تولید آب شیرین از طریق دستگاه شیرین‌سازی با تکنولوژی ME-TVC انجام گرفته است و از نتایج آن می‌توان به ضریب عملکرد سیکل تبرید آب - آمونیاک و ضریب

و می‌تواند از حرارت اتلافی بخش غنی‌سازی برای تولید آب گرم نیز استفاده کند که باعث بالا رفتن پارامتر ضریب عملکرد سیکل می‌شود و در مطالعات قبلی اصلاً به این موضوع پرداخته نشده است. شکل (۱) دیاگرام کلی مدل جدید را نشان می‌دهد و زیرسامانه‌ها شامل توربین گازی با احتراق مستقیم زیست‌توده، سیکل فوق بحرانی دی‌اکسید کربن و تبرید جذبی است. مهم‌ترین نوآوری فرایند جدید استفاده از مبدلی تحت عنوان جعبه داغ (Hot Box) بوده است (شکل ۲) که در سه مرحله گرمای بیهوده را از تمام فرایند بازیابی می‌کند و آن را در اختیار چیلر جذبی قرار می‌دهد تا به این ترتیب بالاترین ضریب عملکرد حاصل گردد. جعبه داغ در سامانه پیشنهادی یک مبدل حرارتی تجمیع کننده است که وظیفه آن بازیابی حرارت بیهوده از چندین بخش مختلف سامانه و انتقال آن به چیلر جذبی است. این بخش به طور عملی باعث افزایش ضریب عملکرد انرژی و انرژی کل سامانه می‌شود، بدون آنکه خود به تولید برق، گرمایش یا سرمایش مستقلاً بپردازد. در شبیه‌سازی، اثر هات‌باکس بر عملکرد سیستم از طریق تغییر دمای سیال عامل خروجی و تأثیر آن بر COP و بازده انرژی و انرژی بررسی شده است. جعبه داغ به عنوان یک پل حرارتی بین سه مرحله بازیابی حرارت عمل می‌کند و به این ترتیب انرژی‌های اتلافی هر بخش به نحو کارآمدی در چیلر جذبی استفاده می‌شوند، که منجر به بهبود کلی کارایی ترمودینامیکی سامانه تولید همزمان می‌گردد. در همه مطالعات مروری بخش تولید بخار تنها از یک منبع حرارت بهره برده است ولی در مدل جدید سه مرحله گرمایش برای واحد تولید بخار سیکل تبرید تعریف گردیده و این کار باعث شده است تا ظرفیت بالایی نیز در بخش غنی‌سازی برای تولید آب داغ فراهم گردد به گونه‌ای که تمامی محصول آب سرد و گرم فقط از چیلر جذبی تولید می‌شوند و برای تولید برق نیز از چرخه برایتون دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی استفاده شده است. جعبه داغ پیشنهاد شده دارای سه مرحله گرم است که به شرح زیر هستند:

۱. تأمین گرمایش از طریق گاز دودکش.
۲. تأمین گرمایش از طریق سیال دی‌اکسیدکربن داغ خروجی از توربین.
۳. بازیابی گرما به صورت خودبازگردان (Self-recuperating) در بخش تبرید جذبی.

بنابراین، مهم‌ترین نوآوری فرایند را می‌توان ارائه یک چیلر جذبی با بازدهی بالا با ضریب عملکرد بالای ۸۲ درصد بیان کرد

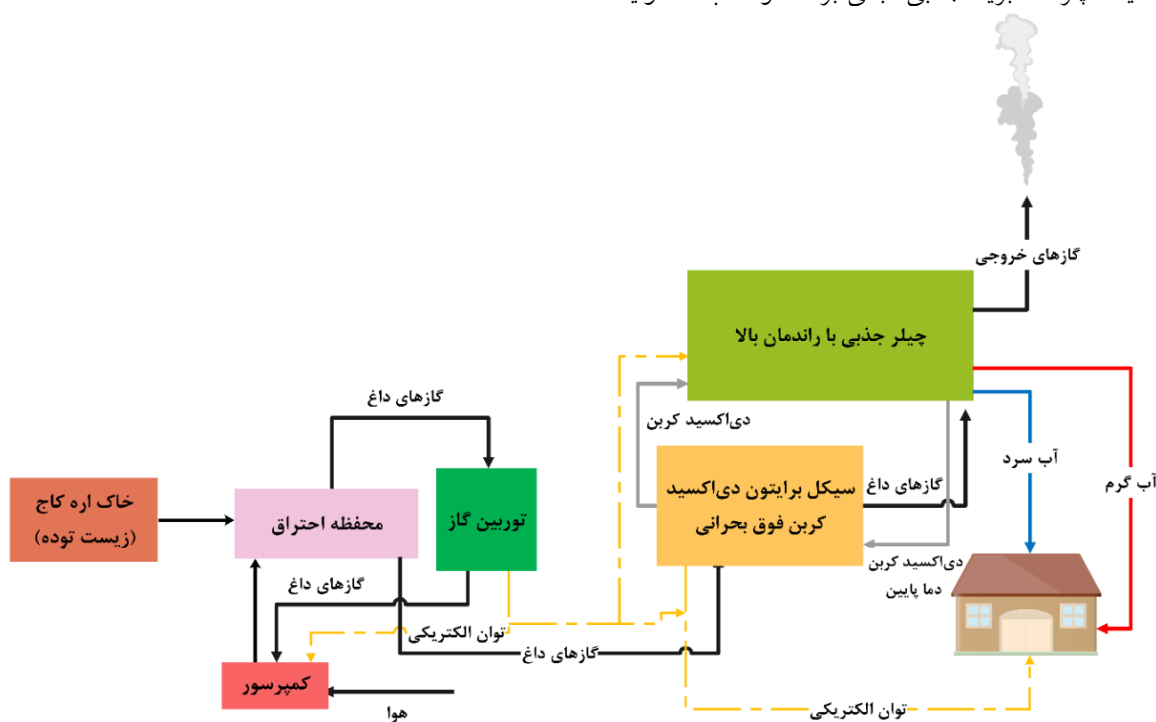
بهره‌برداری انرژی به ترتیب برابر با ۰/۶۶۷ و ۵۹ درصد اشاره داشت. از دیگر مقالات منتشر شده در خصوص سامانه تولید همزمان مبتنی بر احتراق مستقیم زیست‌توده و ریکاوری گرمای بیهوده محفظه احتراق از طریق سیکل ارگانیک رانکین، نمک-زدایی آب دریا و سیکل تبرید جذبی می‌توان به کار انجام شده توسط نوتاکی و همکاران [21] اشاره کرد که در آن یک ارزیابی انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی و انرژی صورت گرفته و مهم‌ترین نتایج شامل بازده انرژی ۵۴/۲۶ درصد، کارایی انرژی ۲۹/۱۴ درصد، ضریب عملکرد سیکل تبرید معادل با ۳۱/۸۵ درصد و شدت انتشار کربن دی‌اکسید برابر با ۰/۶۵۴۴ کیلوگرم به ازای هر کیلووات‌ساعت هستند. همان طور که اشاره شد محققان زیادی از احتراق مستقیم زیست‌توده برای تولید برق، گرمایش، سرمایش و آب شیرین استفاده کرده‌اند. برای نمونه فنگ و همکاران [22] سامانه‌ای شامل تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش همراه با شیرین‌سازی آب و تولید هیدروژن معرفی کردند که در آن از سامانه تبرید جذبی با محلول آب - آمونیاک برای تولید سرمایش استفاده شده است و از نتایج آن می‌توان به راندمان انرژی ۵۸/۲۴ درصد، بازده انرژی ۳۱/۹۷ درصد و تولید توان سرمایی ۴۶۵ کیلووات اشاره کرد. همچنین وانگ و همکاران [23] از احتراق مستقیم زیست‌توده و گرمای ناشی از آن برای تولید همزمان برق، گرمایش، سرمایش و آب شیرین استفاده کردند که طبق نتایج مدل‌سازی نرخ انتقال حرارت در واحد تولید بخار سیکل تبرید جذبی ۷۴۰۶ کیلووات و تولید توان سرمایشی آن ۲۴۷۸ کیلووات است و در این شرایط پارامتر ضریب عملکرد سیکل معادل با ۳۳/۴۶ درصد است و کل سامانه نیز دارای راندمان انرژی و انرژی ۵۱/۹۳ درصد و ۳۸/۷۸ درصد می‌باشد. از جمله مدل‌های ترمودینامیکی تولید همزمان که در آن برای تولید توان سرمایشی از سامانه تبرید جذبی با محلول آب - آمونیاک استفاده شده است می‌توان به مقاله ارائه شده توسط ژو و همکاران [24] اشاره کرد که از گرمای احتراق زیست‌توده در فرایند استفاده شده و ظرفیت تولید توان سرمایشی و پارامتر ضریب عملکرد به ترتیب برابر با ۴۹۲۷ کیلووات و ۱۶/۴۷ درصد می‌باشد و کل فرایند نیز دارای راندمان انرژی و انرژی ۶۷/۱ درصد و ۳۷/۱۵ درصد است. مطالعات مروری نشان می‌دهد که محققان اغلب بخش تبرید جذبی را در انتهای زنجیره انتگراسیون قرار داده‌اند و هدف فقط تولید آب سرد بوده است ولی در مطالعه حاضر استفاده از چیلر جذبی با محلول آب - آمونیاک در قالب یک سامانه تولید همزمان صرفاً برای تولید آب سرد به کار نرفته است

که برای این منظور از جعبه داغ و ریکاوری بالای حرارت استفاده شده است.

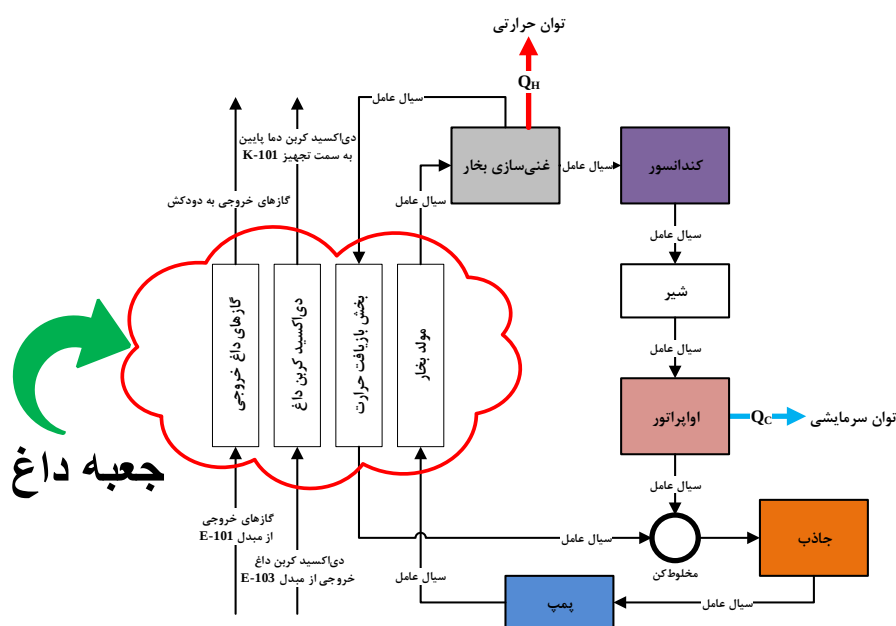
همچنین اهداف مقاله نیز شامل موارد زیر هستند:

۱. سنتز سامانه جدید تولید همزمان بر اساس احتراق زیست‌توده با راندمان بالای انرژی و اگرزری.
۲. تحلیل انرژی و اگرزری سامانه پیشنهادی.
۳. ارائه یک چرخه تبرید جذبی مبتنی بر محلول آب - آمونیاک

- با COP به مراتب بالاتر از مطالعات قبلی.
۴. مطالعه پارامتری فرایند جدید از طریق تعریف تحلیل‌های حساسیت.
۵. معرفی و محاسبه پارامتر نرخ صرفه‌جویی سوخت (Fuel saving rate) (FSR) برای فرایند جدید که تابعی از راندمان انرژی است.



شکل ۱ نمودار کلی (نمودار جعبه‌ای) سامانه جدید تولید همزمان



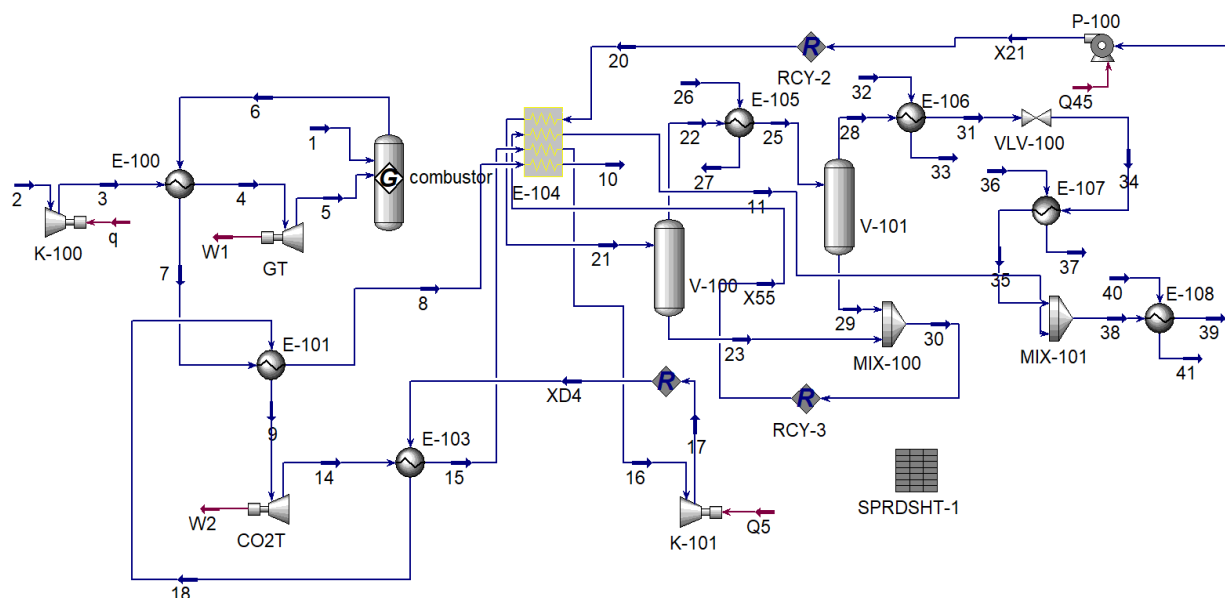
شکل ۲ نمودار مفهومی چیلر جذبی با بازدهی بالا همراه با جعبه داغ

جایی که هوای منبسط نیز برای احتراق زیست‌توده به آن تزریق می‌شود. هوا (جریان ۲) قبلاً از طریق کمپرسور K-100 متراکم و عبور آن از مبدل E-100 باعث افزایش دمای هوا شده است. در توربین گاز، هوای داغ (جریان ۴) منبسط و برق تولید می‌شود که بخشی از آن برای تأمین کمپرسور K-100 مصرف شده است. گاز داغ خروجی از محفظه احتراق با عبور از مبدل حرارتی E-100 وارد مبدل E-101 می‌شود، جایی که سیال دی‌اکسیدکربن (جریان ۱۸) در فشار بالا از آن عبور می‌کند و با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد وارد توربین دی‌اکسیدکربن می‌شود و در آنجا انبساط دی‌اکسیدکربن منجر به تولید توان الکتریکی می‌شود. دی‌اکسیدکربن خروجی از توربین (جریان ۱۴) در رکوپراتور E-103 حرارت را انتقال می‌دهد و پس از آن در مبدل E-104 (جعبه داغ) برای تأمین حرارت لازم برای سامانه تبرید جذبی به کار می‌رود و پس از دست دادن دما به کمپرسور K-101 وارد می‌شود (جریان ۱۶). دی‌اکسیدکربن پس از تراکم پیش از ورود به مبدل E-101 از رکوپراتور E-103 عبور می‌کند و در دمای بالاتری وارد مبدل E-101 می‌شود که این کار برای بهینه‌سازی سیکل فوق بحرانی انجام شده است. گاز دودکش (جریان ۱۰) خروجی از مبدل E-101 نیز در مبدل حرارتی E-104 به عنوان جعبه داغ وارد می‌شود و پس از انتقال گرما وارد دودکش شده و از آنجا رهاسازی می‌شود (جریان ۱۰).

نوآوری اصلی سامانه پیشنهادی در این مطالعه شامل طراحی یک چیلر جذبی با ضریب عملکرد بالا است که قادر به تولید همزمان آب سرد و گرم است و به طور بهینه از حرارت اتلافی فرایند بهره‌برداری می‌کند. بر خلاف مطالعات پیشین که بخش تبرید جذبی صرفاً برای تولید آب سرد طراحی شده است، در این مدل حرارت اتلافی بخش غنی‌سازی نیز برای تولید آب گرم بازیابی می‌شود که منجر به افزایش ضریب عملکرد سیکل و بهره‌وری انرژی می‌شود. همچنین، استفاده از یک مبدل جعبه داغ با سه مرحله بازیابی حرارت شامل گاز دودکش، دی‌اکسیدکربن داغ خروجی از توربین و بازگردانی خودکار حرارت، امکان بهره‌برداری حداکثری از منابع حرارتی را فراهم می‌کند و ظرفیت تولید آب داغ را نیز بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، طراحی چند منبع تولید بخار، ترکیب با چرخه فوق بحرانی دی‌اکسیدکربن و تحلیل‌های پارامتری انرژی و اگزرژی، نشان دهنده واقعیت‌پذیری و جامعیت سامانه پیشنهادی است. این مطالعه با ارائه چنین سامانه‌ای، ضمن ارتقای کارایی انرژی و اگزرژی، فاصله موجود در مطالعات پیشین را پر می‌کند و راهکارهای نوآورانه‌ای برای بهره‌برداری همزمان از آب سرد و گرم ارائه می‌دهد.

توصیف فرایند

شکل (۳) نمودار جریان فرایند را نشان داده است. جریان زیست‌توده خاک اره کاج [25] وارد محفظه احتراق شده است؛



شکل ۳ سامانه تولید همزمان سوخت‌رسانی شده با خاک اره کاج، طراحی شده در مطالعه حاضر

جدول ۱ خواص ترمودینامیکی در حالات مختلف سامانه تولید همزمان مبتنی بر زیست‌توده

جریان	دما (°C)	فشار (kPa)	دبی ($\frac{kg}{s}$)	آنتالپی ($\frac{kJ}{kg}$)	انتروپی ($\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$)
۱	۲۵	۱۰۱٫۳	۰٫۳	۰٫۹۴۶۲	۶٫۷۱۴
۲	۲۵	۱۰۱٫۳	۴	-۰٫۲۸۳۶	۵٫۲۵۸
۳	۳۱۷٫۵	۹۸۸	۴	۳۰۴٫۵	۵٫۳۱۱
۴	۶۵۰	۹۸۸	۴	۶۷۲٫۱	۵٫۸۰۴
۵	۲۸۰٫۴	۱۰۵	۴	۲۶۵	۵٫۸۱۹
۶	۱۶۷۵	۱۰۱٫۳	۴٫۳	۲۴۶٫۵	۷٫۶۶۷
۷	۱۴۱۹	۱۰۱٫۳	۴٫۳	-۹۵٫۴۸	۷٫۴۷۹
۸	۴۱۰	۱۰۱٫۳	۴٫۳	-۱۳۵۰	۶٫۳۶۳
۹	۶۰۰	۲۰۰۰	۲۱٫۸۸	-۸۳۶۱	۳٫۹۸۹
۱۰	۵۰	۱۰۱٫۳	۴٫۳	-۱۷۴۵	۵٫۵۴۶
۱۱	۳۵	۲۰۰۰	۳٫۵۳۹	-۱۲۲۱۰	۳٫۶۸۹
۱۴	۴۸۰٫۶	۷۶۰۰	۲۱٫۸۸	-۸۴۹۶	۴٫۰۰۹
۱۵	۲۰۷٫۴	۷۶۰۰	۲۱٫۸۸	-۸۸۰۸	۳٫۴۹۶
۱۶	۷۰	۷۶۰۰	۲۱٫۸۸	-۸۹۷۷	۳٫۰۷۸
۱۷	۱۶۰٫۲	۲۰۰۰	۲۱٫۸۸	-۸۹۱۹	۳٫۰۹۱
۱۸	۴۰۰	۲۰۰۰	۲۱٫۸۸	-۸۶۰۷	۳٫۶۶۸
۲۰	۲۷٫۲۵	۲۰۰۰	۴٫۷۴۸	-۱۰۲۳۰	۳٫۸۵۸
۲۱	۱۶۰	۲۰۰۰	۴٫۷۴۸	-۸۸۳۳	۷٫۵۱۸
۲۲	۱۶۰	۲۰۰۰	۲٫۶۵۸	-۵۴۴۳	۹٫۴۶۴
۲۳	۱۶۰	۲۰۰۰	۲٫۰۹۱	-۱۳۱۴۰	۵٫۰۴۴
۲۵	۹۰	۲۰۰۰	۲٫۶۵۸	-۶۵۷۲	۶٫۶۵۹
۲۶	۲۵	۱۰۱٫۳	۱۰٫۶۵	-۱۵۸۹۰	۲٫۹۸۱
۲۷	۹۰	۱۰۱٫۳	۱۰٫۶۵	-۱۵۶۱۰	۳٫۸۳۵
۲۸	۹۰	۲۰۰۰	۱٫۲۱	-۲۷۷۶	۸٫۹۱۵
۲۹	۹۰	۲۰۰۰	۱٫۴۴۸	-۹۷۴۴	۴٫۷۷۳
۳۰	۱۲۸٫۹	۲۰۰۰	۳٫۵۳۹	-۱۱۷۵۰	۴٫۹۹
۳۱	۴۰	۲۰۰۰	۱٫۲۱	-۴۰۵۸	۵
۳۲	۲۵	۱۰۱٫۳	۲۳٫۹۷	-۱۵۸۹۰	۲٫۹۸۱
۳۳	۴۰	۱۰۱٫۳	۲۳٫۹۷	-۱۵۸۲۰	۳٫۱۹۳
۳۴	-۳٫۸۰۴	۳۶۰	۱٫۲۱	-۴۰۵۸	۵٫۰۶۹
۳۵	۹	۳۶۰	۱٫۲۱	-۲۹۹۸	۸٫۹۸۵
۳۶	۲۵	۱۰۱٫۳	۱۵٫۶۴	-۱۵۸۹۰	۲٫۹۸۱
۳۷	۶	۱۰۱٫۳	۱۵٫۶۴	-۱۵۹۷۰	۲٫۶۹۷
۳۸	۴۵٫۱۸	۳۶۰	۴٫۷۴۹	-۹۸۶۶	۵٫۰۵۶
۳۹	۲۶٫۹۹	۳۶۰	۴٫۷۴۹	-۱۰۲۴۰	۳٫۸۵۷
۴۰	۲۵	۱۰۱٫۳	۲۷٫۱۳	-۱۵۸۹۰	۲٫۹۸۱
۴۱	۴۰	۱۰۱٫۳	۲۷٫۱۳	-۱۵۸۲۰	۳٫۱۹۳

۳/۱۰۱ کیلوپاسکال هستند [20].

۳. جریان‌های خروجی از جداکننده‌ها به صورت اشباع هستند [26].

۴. تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیلی ناچیز است [27].

۵. تغییرات فشار در اتصالات و مبدل‌های حرارتی صرف نظر شده است [28].

۶. در سامانه تبرید جذبی سیال عامل آب - آمونیاک است [21].
۷. سامانه بدون اتلاف حرارت با محیط است؛ در نتیجه تخریب انرژی را می‌توان بر اساس اختلاف انرژی سوخت و انرژی محصول نوشت [21].

۸. مطابق با توصیه محققان قبلی که از Aspen HYSYS برای مدل‌سازی استفاده کرده‌اند از معادله حالت پنگ رابینسون استفاده شده است [21,29,30].

در این پژوهش، برای محاسبه خواص ترمودینامیکی سیال CO_2 ، معادله حالت پنگ - رابینسون در نرم‌افزار Aspen HYSYS به کار گرفته شده است. انتخاب این معادله بر اساس دو معیار اصلی صورت گرفته است؛ نخست، هماهنگی با مطالعات پیشین به منظور مقایسه مستقیم نتایج و فراهم کردن امکان بازتولید مدل توسط سایر پژوهشگران؛ دوم، پایداری و همگرایی مدل‌سازی سامانه یکپارچه، زیرا استفاده از معادلات دقیق‌تر مانند Span-Wagner یا اتصال به REFPROP، با وجود دقت بالاتر، موجب بروز مشکلات همگرایی در سیستم‌های ترکیبی شامل توربین گاز، سیکل فوق بحرانی و چیلر جذبی می‌شود. همچنین، مقایسه نتایج به دست آمده از معادله پنگ - رابینسون با داده‌های مرجع تجربی نشان داد که اختلافات کمتر از ۲٪ است و در محدوده قابل قبول برای تحلیل‌های ترمودینامیکی قرار دارد.

در جدول (۲) مقادیر پارامترهای ورودی که برای مدل‌سازی سامانه در شرایط مبنا لازم می‌باشد لیست شده است.

در مدل‌سازی سامانه برای محاسبه خواص مبتنی بر جرم مخلوط گازی، از معادله پنگ - رابینسون استفاده شده که رابطه کلی آن به شرح زیر است [31]:

$$P = \frac{RT}{v_{\text{mix}} - b} - \left[\frac{a}{(v_{\text{mix}}(v_{\text{mix}} + b) + b(v_{\text{mix}} - b))} \right] \quad (1)$$

جایی که P فشار، T دما، R ثابت گازها و v حجم مولی

در سامانه تبرید جذبی، سیال عامل آب - آمونیاک خروجی از پمپ P-100 (جریان ۲۰) با عبور از مبدل حرارتی E-104 در فشار ثابت به دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و فازهای مایع و بخار از طریق جداکننده V-100 تفکیک شده است. به منظور ریکاوری حرارت، بخار بالای جداکننده V-100 (جریان ۲۲) وارد مبدل E-105 می‌شود؛ جایی که علاوه بر تولید آب داغ (جریان ۲۷)، کندانس بخار نیز صورت می‌گیرد و به این ترتیب یک بخش غنی‌ساز انتگرال‌شده برای سامانه تبرید استفاده شده است. در ادامه توسط جداکننده V-101 تفکیک بخار از مایع انجام گرفته است و بخار بالاسری با غلظت بالایی از آمونیاک (جریان ۲۸) با عبور از مبدل E-106 در تبادل حرارت با جریان آب، کاملاً کندانس شده است و عبور آن از شیر کاهنده فشار ۱۰۰ باعث ایجاد افت دمای محسوسی شده است (جریان ۳۴). از دمای پایین سیال مبرد در تبخیر کننده E-107 برای تولید آب سرد استفاده شده و مبرد در خروجی تبخیر کننده (جریان ۳۵) وارد میکسر شده است؛ جایی که جریان‌های مایع تحتانی جداکننده V-100 و V-101 پس از جمع‌آوری با آن مخلوط شده و از طریق جاذب حرارت E-108 فاز سیال به مایع اشباع تبدیل شده است (جریان ۳۹). باید توجه شود که برای افزایش بازیابی حرارت، از دمای جریان گرم پایین جداکننده V-100 و V-101 پیش از ورود به میکسر در مبدل حرارتی E-104 برای افزایش انتقال حرارت در مبدل E-104 استفاده شده است (رکوپراتور سامانه تبرید). در جدول (۱) شرایط عملیاتی برای نقاط مختلف فرایند پیشنهادی لیست شده است.

مدل‌سازی ترمودینامیکی

مدل‌سازی ترمودینامیکی سامانه یکپارچه طراحی شده در این بخش انجام گرفته است. مدل‌سازی ترمودینامیکی با هدف رسیدن به پارامترهای اساسی سامانه نظیر بازده انرژی، بازده الکتریکی، نرخ صرفه‌جویی سوخت، میزان تخریب انرژی، نسبت تخریب انرژی و کارایی انرژی صورت گرفته است. علاوه بر این فرضیات اولیه سامانه تولید همزمان مبتنی بر زیست‌توده از موارد زیر پیروی کرده است:

۱. همه بخش‌ها در فرایند پیشنهادی به تعادل ترمودینامیکی رسیده‌اند یا شرایط کاری حالت پایا دارند [20].
۲. در شرایط محیط دما و فشار به ترتیب ۲۵ درجه سانتی‌گراد و

$$ex_{ph} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (6)$$

$$ex_{ch} = \sum x_i ex_i^{0, ch} - RT_0 \sum x_i \ln x_i \quad (7)$$

برای فهم بهتر عملکرد ترمودینامیکی هر بخش دو پارامتر اساسی تحلیل انرژی شامل سهم تخریب انرژی و راندمان انرژی نیز بر اساس معادلات زیر محاسبه شده و در جدول (۳) روابط مربوط به تخریب انرژی برای هر تجهیز لیست شده است [35,38]:

$$\theta_i = 100 \times \frac{\dot{Ex}_{D,i}}{\dot{Ex}_{D,total}} \quad (8)$$

$$\psi = 100 \times \frac{\dot{Ex}_P}{\dot{Ex}_F} \quad (9)$$

کارایی انرژی بر اساس تحلیل انرژی سوخت و محصول است که انرژی سوخت بیانگر مقداری از انرژی در دسترس برای تولید انرژی محصول است و انرژی محصول مقداری از انرژی مطلوب است که توسط سامانه یا تجهیزات به دست آمده است. همچنین برای محاسبه توان خالص تولید شده در فرایند پیشنهادی از رابطه (۱۰) استفاده شده است:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{CO2T} - \dot{W}_{P100} - \dot{W}_{K100} - \dot{W}_{K101} \quad (10)$$

برای ارزیابی عملکرد بخش جذبی سامانه، دو شاخص ضریب عملکرد انرژی و انرژی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که این ضرایب عملکرد، صرفاً مربوط به کل شاخه حرارتی شامل تولید گرمایش و سرمایش است و با ضریب عملکرد کلاسیک چیلر جذبی تفاوت دارد. هدف از این تعریف، بررسی سهم همزمان دو محصول گرمایشی و سرمایشی در مقایسه با انرژی و انرژی ورودی به این بخش از سامانه است. روابط مورد استفاده برای محاسبه این شاخص‌ها به صورت زیر ارائه شده‌اند:

$$COP_{en,total} = \frac{\dot{Q}_H + \dot{Q}_C}{\dot{Q}_{HOT BOX} - \dot{m}_{30}(h_{30} - h_{11}) + \dot{W}_{P100}} \quad (11)$$

$$COP_{ex,total} = \frac{\dot{Ex}_H + \dot{Ex}_C}{\dot{m}_8(ex_8 - ex_{10}) + \dot{m}_{15}(ex_{15} - ex_{16}) + \dot{W}_{P100}} \quad (12)$$

مخلوط، a و b ثوابت بسته سیالاتی هستند. علاوه بر این موازنه جرم، انرژی و انرژی برای تجهیزات مختلف سامانه از معادلات زیر پیروی کرده است [32-34]:

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{Ex}_D + \dot{Ex}_W + \sum \dot{Ex}_{out} \\ = \dot{Q}_i \left[1 - \frac{T_0}{T_i} \right] + \sum \dot{Ex}_{in} \end{aligned} \quad (4)$$

جایی که [32]:

$$\dot{Ex}_W = \dot{W} \quad (5)$$

جدول ۲. پارامترهای ورودی مورد استفاده در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
دمای محیط	۲۵ °C
فشار محیط	۱۰۱٫۳ kPa
دبی زیست توده	۰٫۳ kg/s
دبی هوا	۴ kg/s
فشار خروجی توربین دی‌اکسیدکربن	۷۶۰۰ kPa
فشار ورودی توربین دی‌اکسیدکربن	۲۰۰۰۰ kPa
T ₉	۶۰۰ °C
T ₁₆	۷۰ °C
فشار خروجی کمپرسور K-101	۲۰۰۰۰ kPa
فشار ورودی کمپرسور K-101	۷۶۰۰ kPa
فشار خروجی کمپرسور K-100	۹۸۸ kPa
فشار ورودی کمپرسور K-100	۱۰۱٫۳ kPa
فشار خروجی توربین گازی	۱۰۵ kPa
فشار ورودی توربین گازی	۹۸۸ kPa
فشار خروجی پمپ P-100	۲۰۰۰ kPa
فشار ورودی پمپ P-100	۳۶۰ kPa
T ₁₀	۵۰ °C
T ₄	۶۵۰ °C
T ₃₁	۴۰ °C
T ₂₅	۹۰ °C

علاوه بر این انرژی کلی یک جریان شامل مجموع انرژی فیزیکی و شیمیایی است [35-37]:

جدول ۳ معادلات مربوط به هر یک از اجزا

تجهیز	معادلات نرخ تخریب انرژی
کمپرسور K-100	$\dot{E}_2 + \dot{W} - \dot{E}_3$
مبدل E-100	$\dot{E}_3 + \dot{E}_6 - \dot{E}_4 - \dot{E}_7$
توربین گاز	$\dot{E}_4 - \dot{W} - \dot{E}_5$
محفظه احتراق	$\dot{E}_1 + \dot{E}_5 - \dot{E}_6$
مبدل E-101	$\dot{E}_7 + \dot{E}_{18} - \dot{E}_8 - \dot{E}_9$
توربین دی اکسیدکربن	$\dot{E}_9 - \dot{W} - \dot{E}_{14}$
مبدل E-103	$\dot{E}_{14} + \dot{E}_{17} - \dot{E}_{15} - \dot{E}_{18}$
کمپرسور K-101	$\dot{E}_{16} + \dot{W} - \dot{E}_{17}$
مبدل E-104	$\dot{E}_{15} + \dot{E}_8 + \dot{E}_{30} + \dot{E}_{20} - \dot{E}_{21} - \dot{E}_{10} - \dot{E}_{11} - \dot{E}_{16}$
جداساز V-100	$\dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} - \dot{E}_{23}$
جداساز V-101	$\dot{E}_{25} - \dot{E}_{28} - \dot{E}_{29}$
مبدل E-105	$\dot{E}_{22} + \dot{E}_{26} - \dot{E}_{25} - \dot{E}_{27}$
مبدل E-106	$\dot{E}_{28} + \dot{E}_{32} - \dot{E}_{31} - \dot{E}_{33}$
شیر VLV-100	$\dot{E}_{31} - \dot{E}_{34}$
پمپ P-100	$\dot{E}_{39} + \dot{W} - \dot{E}_{20}$
مبدل E-107	$\dot{E}_{34} + \dot{E}_{36} - \dot{E}_{35} - \dot{E}_{37}$
مبدل E-108	$\dot{E}_{38} + \dot{E}_{40} - \dot{E}_{39} - \dot{E}_{41}$

جایی که [12,21,39,40]:

$$\dot{E}x_{\text{biomass}} = \dot{m}_{\text{biomass}} \times ex_{\text{biomass}}^{\text{ch}} \quad (16)$$

$$ex_{\text{biomass}}^{\text{ch}} = \phi \times \text{LHV}_{\text{biomass}} \quad (17)$$

$$\phi = \frac{1/044 + 0/16 \frac{\text{H}}{\text{C}} - 0/34493 \frac{\text{O}}{\text{C}} \times \left[1 + 0/0531 \frac{\text{H}}{\text{C}} \right]}{1 - 0/4142 \frac{\text{O}}{\text{C}}} \quad (18)$$

نرخ صرفه جویی سوخت بیان می کند که فرایند جدید (شکل ۳) چه مقدار می تواند در مصرف انرژی (سوخت) سامانه های مشابه دارای ذخیره سازی باشد. این پارامتر به صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{FSR} = [\eta_{\text{en}}^{\text{new}} - \eta_{\text{en}}^{\text{i}}] \times (\dot{Q}_{\text{H}} + \dot{Q}_{\text{C}} + \dot{W}_{\text{net}}) \quad (19)$$

مقدار $\eta_{\text{en}}^{\text{i}}$ اشاره به بازده انرژی سامانه های مشابه دارد که در مقالات به آن ها اشاره می شود. نرخ انرژی ناشی از تولید حرارت و تولید سرما در سامانه پیشنهادی مطابق با روابط زیر بیان می شود:

$$\dot{E}x_{\text{H}} = \dot{Q}_{\text{H}} \left[1 - \frac{T_0}{T_{\text{H}}} \right] = \dot{m}_{22} (h_{22} - h_{25}) \left[1 - \frac{T_0}{T_{\text{H}}} \right] \quad (20)$$

$$\dot{E}x_{\text{C}} = \dot{Q}_{\text{C}} \left[\frac{T_0}{T_{\text{C}}} - 1 \right] = \dot{m}_{35} (h_{35} - h_{34}) \left[\frac{T_0}{T_{\text{C}}} - 1 \right] \quad (21)$$

بحث و نتایج

اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، هر بخش سامانه به صورت مجزا بررسی شده است، چرا که ساختار کامل سامانه در مطالعات پیشین موجود نبوده است. طبق جدول (۴) مقادیر ورودی مدل چیلر جذبی مطابق با داده های مرجع [41] وارد شده و نتایج شبیه سازی شامل نرخ انتقال حرارت در مولد (خطای ۱/۰۷ درصد)، نرخ انتقال حرارت در کندانسور (خطای ۱/۸۴ درصد) و ضریب عملکرد (COP) با خطای ۲/۱۷ درصد نشان دهنده دقت بالای مدل است و اختلاف های کوچک عمدتاً ناشی از تفاوت جزئی نرم افزار مدل سازی و فرضیات جزئی در مرجع است. همچنین طبق جدول (۵) نتایج مدل سازی سیکل فوق بحرانی

در روابط ارائه شده برای محاسبه ضریب عملکرد کل شاخه حرارتی، پارامترهای ورودی و خروجی به طور شفاف تعریف شده اند تا از بروز هر گونه ابهام جلوگیری شود. در این معادلات، $\dot{Q}_{\text{H}}$ بیانگر نرخ گرمایش تولیدی و $\dot{Q}_{\text{C}}$ نشان دهنده نرخ سرمایش تولیدی است. همچنین، به عنوان توان مصرفی پمپ در نظر گرفته شده و $\dot{Q}_{\text{HOT BOX}}$ حرارت خروجی از جعبه داغ را نشان می دهد. علاوه بر این، ترم $\dot{m}_{30} (h_{30} - h_{11})$ معرف اختلاف آنتالپی جریان سیال در نقاط ورودی و خروجی مرتبط است که نقش آن در محاسبه دقیق انرژی مبادله شده در این بخش از سامانه اهمیت بالایی دارد. برای محاسبه کارایی انرژی، بازده الکتریکی و راندمان انرژی کلی سامانه نیز از معادلات زیر استفاده شده است:

$$\eta_{\text{en}} = \frac{\dot{Q}_{\text{H}} + \dot{Q}_{\text{C}} + \dot{W}_{\text{net}}}{\dot{m}_{\text{biomass}} \text{LHV}_{\text{biomass}}} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{el}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{m}_{\text{biomass}} \text{LHV}_{\text{biomass}}} \quad (14)$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\dot{E}x_{\text{H}} + \dot{E}x_{\text{C}} + \dot{W}_{\text{net}}}{\dot{E}x_{\text{biomass}}} \quad (15)$$

می‌کند. تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کدهای داخلی Aspen HYSYS انجام شده و هیچ کد دستوری اضافی استفاده نشده است. درصد خطاهای مشاهده شده برای تمامی زیرسامانه‌ها کمتر از ۳ درصد است و این سطح دقت، اعتبار مدل پیشنهادی را برای تحلیل انرژی، انرژی، انرژی، ضریب عملکرد (COP) و نرخ صرفه‌جویی سوخت (FSR) به خوبی تأیید می‌کند. بنابراین، مدل ارائه شده کاملاً معتبر است و نتایج حاصل از آن می‌تواند برای بررسی عملکرد کل سامانه به طور قابل اعتماد مورد استفاده قرار گیرد.

دی‌اکسیدکربن با داده‌های مرجع [42] مقایسه شده است و توان خالص تولید شده با اختلاف ۱/۰۸ درصد، راندمان حرارتی با اختلاف ۱/۵۲ درصد و راندمان انرژی با اختلاف ۰/۹۹ درصد، نشان می‌دهد که مدل توانایی شبیه‌سازی دقیق رفتار سیکل را دارد و اختلاف‌ها در محدوده قابل قبول علمی هستند. ورودی‌های مدل سیکل توربین گازی شامل نرخ جریان هوا، نرخ جریان سوخت و دمای محفظه مطابق با جدول (۶) مرجع [43] است و نتایج شبیه‌سازی توان خروجی توربین (خطای ۰/۷۳ درصد)، توان ورودی کمپرسور (خطای ۰/۸۹ درصد) و راندمان انرژی (خطای ۱/۲۱ درصد) را نشان می‌دهد که دقت مدل را تأیید

جدول ۴ نتایج اعتبارسنجی مدل‌سازی چیلر جذبی

پارامترها	[41]	مطالعه حاضر	درصد خطا
مقادیر ورودی برای اعتبارسنجی			
نرخ انتقال حرارت در اواپراتور (کیلووات)	۱۰	۱۰	۰
دمای تبخیر (درجه سانتی‌گراد)	۲	۲	۰
دمای مولد (درجه سانتی‌گراد)	۸۰	۸۰	۰
دمای جاذب (درجه سانتی‌گراد)	۳۰	۳۰	۰
نتایج اعتبارسنجی			
نرخ انتقال حرارت در مولد (کیلووات)	۱۶/۷۷	۱۶/۵۹	۱/۰۷
نرخ انتقال حرارت در کندانسور (کیلووات)	۱۱/۴۳	۱۱/۲۲	۱/۸۴
ضریب عملکرد (COP)	۰/۶	۰/۵۸۷	۲/۱۷

جدول ۵ نتایج اعتبارسنجی مدل‌سازی سیکل فوق بحرانی CO₂

پارامترها	[42]	مطالعه حاضر	درصد خطا
توان خالص تولید شده (کیلووات)	۲۴۸/۸۲	۲۵۱/۵	۱/۰۸
راندمان حرارتی (درصد)	۴۱/۴۶	۴۲/۰۹	۱/۵۲
راندمان انرژی (درصد)	۵۷/۴۷	۵۸/۰۴	۰/۹۹

جدول ۶ نتایج اعتبارسنجی مدل‌سازی سیکل توربین گازی

پارامترها	[43]	مطالعه حاضر	درصد خطا
مقادیر ورودی برای اعتبارسنجی			
نرخ جریان هوا (کیلو مول بر ساعت)	۴۹۹۱۰	۴۹۹۱۰	۰
نرخ جریان سوخت (کیلو مول بر ساعت)	۵۶۵۶	۵۶۵۶	۰
دمای محفظه (درجه سانتی‌گراد)	۱۲۴۶	۱۲۴۶	۰
نتایج اعتبارسنجی			
توان خروجی توربین (کیلووات)	۲۸۱۷۰۰	۲۷۹۶۵۱	۰/۷۳
توان ورودی کمپرسور (کیلووات)	۱۵۸۴۰۰	۱۵۶۹۸۰	۰/۸۹
راندمان انرژی (درصد)	۲۸	۲۷/۶۶	۱/۲۱

نتایج انرژی و انرژی

در این بخش به ارائه نتایج تحلیل انرژی و انرژی پرداخته شده است. مهم ترین پارامترهای کلیدی برای سامانه کنونی در حالت مدل سازی پایه در جدول (۷) لیست شده است و بر طبق آن خروجی های سامانه شامل ۳۰۰۱ کیلووات توان گرمایی، ۱۲۸۳ کیلووات توان سرمایی و ۲۰۸۵ کیلووات توان الکتریکی هستند. علاوه بر این مشخص شد که کارایی انرژی، بازده الکتریکی و راندمان انرژی برای این سامانه یکپارچه به ترتیب برابر با ۸۳/۶۵ درصد، ۲۷/۳۹ درصد و ۴۷/۷۸ درصد هستند. جعبه داغ در سیکل تبرید جذبی به کار رفته و باعث بهبود مقدار ضریب عملکرد شده است، به طوری که طبق محاسبات انجام گرفته، این پارامتر برای قانون اول ۸۲/۲۱ درصد و برای قانون دوم ترمودینامیک معادل با ۳۲/۳۳ درصد شده است که در ادامه به مقایسه ضریب عملکرد با دیگر مقالات پرداخته شده است.

در جدول (۸) نتایج حاصل از ارزیابی انرژی اگزرژی قابل مشاهده است. سامانه تولید همزمان جدید در حالت مبنا دارای ۴۳۶۶ کیلووات تخریب انرژی است که ۳۹/۴۶ درصد آن در محفظه احتراق رخ داده است. مطابق با بررسی صورت گرفته در شکل (۴)، محفظه احتراق زیست توده با تخریب انرژی ۱۷۲۳ کیلووات بیشترین برگشتناپذیری را دارد که برای بهبود سامانه باید جذب حرارت را در مبدل حرارتی پیش از آن در بخش گازی افزایش داد. تخریب انرژی در محفظه احتراق زیست توده اجتنابناپذیر است و دلیل آن کیفیت بالای حرارتی است که از واکنش های احتراق ایجاد شده است. مبدل حرارتی E-101 نیز

که جذب حرارت را از گاز دودکش به سیکل برایتون فوق بحرانی دی اکسیدکربن انجام داده است، سهم ۱۸/۶۲ درصدی از تخریب انرژی دارد؛ لذا کاهش آن باعث افزایش تولید برق در این سیکل خواهد شد.

با توجه به شکل (۵)، بخش چرخه برایتون باز یا همان سیکل توربین گازی با سهم ۵۰ درصد دارای بالاترین سهم از برگشتناپذیری در فرایند است که دلیل آن بر اساس شکل (۶)، سهم ۳۹/۷۸ درصدی محفظه احتراق در سیکل گازی است که قبلاً دلیل بالا بودن تخریب انرژی در آن شرح داده شده است. بهترین راه برای بالا بردن کارایی انرژی سامانه پیشنهادی این است که جذب حرارت در مبدل E-100 و E-101 افزایش یابد. کاهش تخریب انرژی در محفظه احتراق به تنهایی در کل سامانه تأثیری ندارد، ولی مهم آن است که حرارت بیشتری از گرمای احتراق زیست توده توسط مبدل های حرارتی E-100، E-101 و جعبه داغ (مبدل E-104) بازیابی گردد. افزایش بازیابی حرارت در مبدل حرارتی E-104 منجر به افزایش تولید توان سرمایشی و گرمایشی می شود و افزایش ریکاوری گرما در مبدل های E-100 و E-101 برای افزایش تولید توان الکتریکی مطلوب است. در شکل (۷) بازده انرژی تجهیزات مقایسه شده است و طبق آن، در جداکننده های فازی همواره بیشترین بازدهی وجود دارد، ولی در سه مبدل حرارتی E-100، E-101 و E-104 ظرفیت بالایی برای بهبود ترمودینامیکی فراهم است که باید از آن استفاده کرد و تولید کار مفید را افزایش داد و از بی نظمی در فرایند جلوگیری کرد.

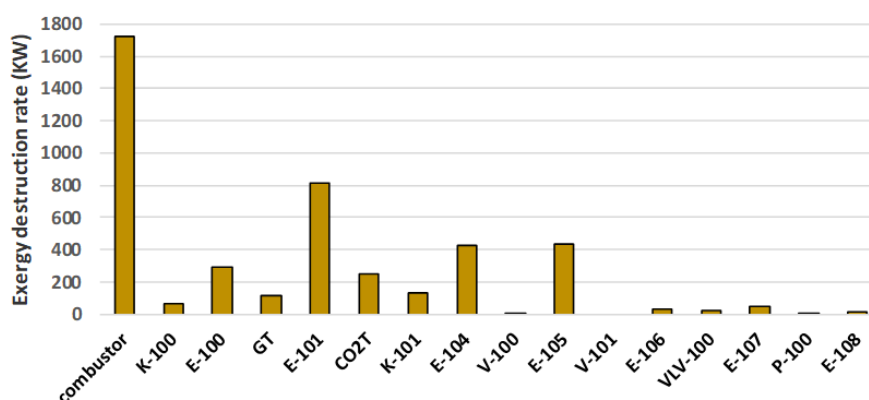
جدول ۷ نتایج عملکرد برای حالت پایه

پارامتر	مقدار
انرژی زیست توده (کیلووات)	۷۶۱۳
انرژی زیست توده (کیلووات)	۵۶۳۰
W_{net}	۲۰۸۵
$\dot{Q}_H$	۳۰۰۱
$\dot{Q}_C$	۱۲۸۳
η_{en}	۸۳/۶۵ %
η_{el}	۲۷/۳۹ %
η_{ex}	۴۷/۷۸ %
COP_{en}	۸۲/۲۱ %
COP_{ex}	۳۲/۳۳ %

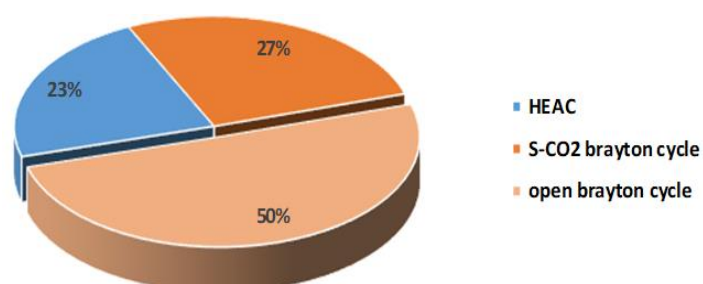
جدول ۸. نتایج محاسبات تحلیل انرژی برای تجهیزات به کار رفته در فرایند پیشنهادی

تجهیز	$\dot{E}_{XF}$	$\dot{E}_{XP}$	$\dot{E}_{XD}$	$\psi_i(\%)$	$\theta_i(\%)$
محفظه احتراق	۵۹۴۲	۴۲۱۹	۱۷۲۳	۷۱	۳۹٫۴۶
کمپرسور K-100	۱۲۱۹	۱۱۵۶	۶۳	۹۴٫۸	۱٫۴۴
مبدل E-100	۱۲۳۰	۹۳۵	۲۹۵	۷۶٫۰۲	۶٫۷۶
توربین گاز	۱۷۴۵	۱۶۲۸	۱۱۷	۹۳٫۳	۲٫۶۸
مبدل E-101	۳۹۶۴	۳۱۵۱	۸۱۳	۷۹٫۵	۱۸٫۶۲
توربین دی‌اکسیدکربن	۳۲۳۴	۲۹۶۹	۲۴۹	۹۱٫۸	۵٫۷
کمپرسور K-101	۱۲۸۰	۱۱۵۲	۱۲۸	۹۰	۲٫۹۳
مبدل E-104	۱۹۰۱	۱۴۷۲	۴۲۹	۷۷٫۴۳	۹٫۸۲
جداساز V-100	۱۶۳۹	۱۶۳۳	۶	۹۹٫۶۳	۰٫۱۴
مبدل E-105	۱۳۹۱	۹۶۰	۴۳۱	۶۹	۹٫۸۷
جداساز V-101	۶۱۴	۶۱۴	۰	۱۰۰	۰
مبدل E-106	۱۳۸	۱۰۹	۲۹	۷۹	۰٫۶۶
شیر VLV-100	۳۷۵	۳۵۰	۲۵	۹۳٫۳۳	۰٫۵۷
مبدل E-107	۱۳۱	۸۵	۴۶	۶۵	۱٫۰۵
پمپ P-100	۱۴	۱۲	۲	۸۵٫۷۱	۰
مبدل E-108	۵۷	۴۷	۱۰	۸۲	۰٫۲۳

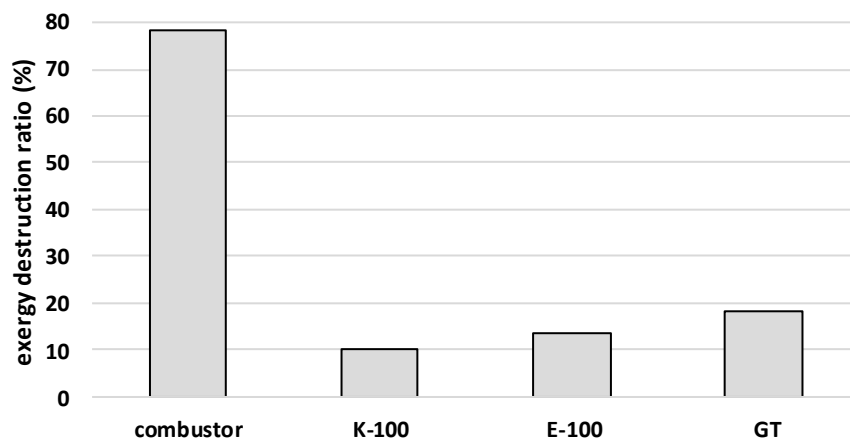
۴۳۶۶ کیلووات = تخریب انرژی کل



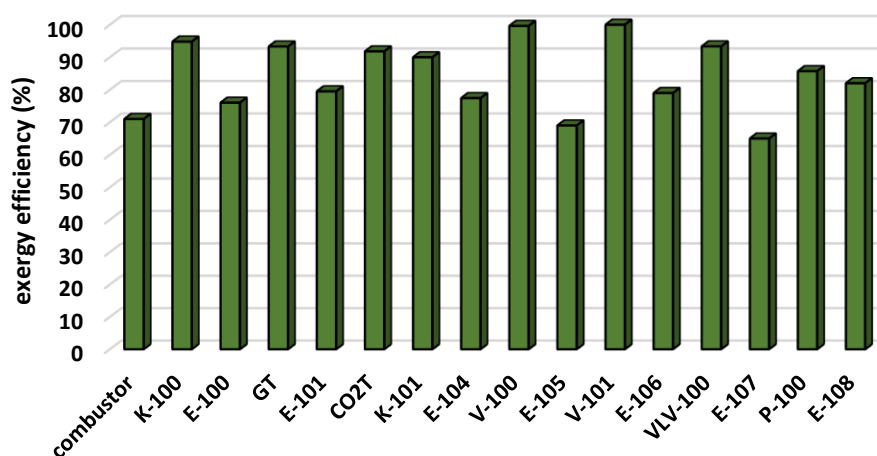
شکل ۴. مقایسه نرخ تخریب انرژی تجهیزات در سامانه تولید همزمان



شکل ۵. مقایسه سهم تخریب انرژی زیرسامانه‌های انتگرال‌یون حرارتی



شکل ۶ مقایسه سهم تخریب انرژی تجهیزات در سیکل برایتون باز



شکل ۷ مقایسه راندمان انرژی تجهیزات در فرایند پیشنهادی

۲. استفاده از جعبه داغ برای سامانه تبرید و به حداکثر رساندن پارامتر ضریب عملکرد.

۳. استفاده از رکوپراتور در سیکل فوق بحرانی دی اکسید کربن. علاوه بر این، مقدار نرخ صرفه جویی سوخت نیز در مقایسه با دیگر مقالات نشان می دهد که استفاده از فرایند تولید همزمان جدید می تواند تا چه میزان در صرفه جویی انرژی مؤثر باشد که مقدار این ذخیره سازی با بازده انرژی سامانه مورد مقایسه رابطه عکس دارد. پارامتر نرخ صرفه جویی سوخت بیان کرده است که فرایند جدید به خوبی می تواند جایگزین سامانه های مورد بررسی گردد و ایده آن برای ادغام حرارتی بسیار قدرتمندتر شده است.

در نهایت، پارامترهای اساسی ترمودینامیکی و به خصوص نرخ صرفه جویی سوخت با دیگر مطالعات مشابه مورد مقایسه قرار گرفتند. این مطالعات همگی از منبع زیست توده استفاده کرده و تولیدات گرما، سرما و برق را قطعاً دارند. طبق جدول (۹)، مقدار ضریب عملکرد سامانه پیشنهادی به دلیل استفاده از جعبه داغ و ایجاد بیشترین ریکاوری حرارت از این طریق در مقایسه با دیگر مقالات به مراتب بیشتر شده است و لذا سامانه تبرید جذبی کارآمدتری را ارائه کرده است. از طرفی بازده انرژی و انرژی کلی نیز دارای برتری محسوسی است که از دلایل آن می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. انتگرال حرارتی بخش غنی سازی سامانه تبرید و تولید توان گرمایشی از این طریق.

جدول ۹ مقایسه پارامترهای کلیدی با مطالعات قبلی

مرجع	منبع انرژی	ضریب عملکرد	راندمان انرژی	نرخ صرفه‌جویی سوخت (کیلووات)	راندمان انرژی
[12]	زیست‌توده	۴۵/۳۴ %	-	-	۲۴/۳ %
[16]	-	-	۵/۱۹ %	۴۹۹۷	۶/۱۲ %
[17]	زیست‌توده	۴۳ %	-	-	۲۲/۲ %
[18]	زیست‌توده	۵۷ %	۴۳/۵ %	۲۵۵۷	-
[19]	-	۷۲ %	۴۹/۰۹ %	۲۲۰۱	-
[21]	زیست‌توده	۳۱/۸۵ %	۵۴/۲۶ %	۱۸۷۲	۲۹/۱۴ %
مطالعه حاضر	زیست‌توده	۸۲/۲۱ %	۸۳/۶۵ %	-	۴۷/۷۸ %

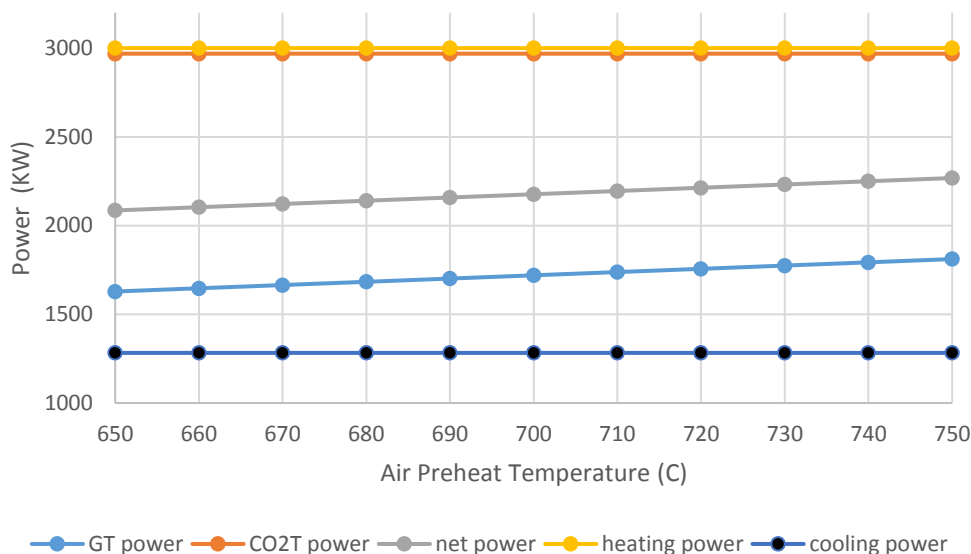
تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت در مقاله بر اساس تغییر تک‌متغیرهای کلیدی سامانه انجام شده است تا تأثیر هر پارامتر بر عملکرد کلی سیستم، شامل تولید برق، گرمایش، سرمایش و شاخص‌های انرژی و انرژی، به طور واضح مشخص شود. پارامترهای اصلی مورد بررسی شامل دمای پیش‌گرمایش هوای احتراق، دمای ورودی به توربین دی‌اکسیدکربن و دمای سیال عامل خروجی جعبه داغ بوده‌اند. انتخاب این پارامترها بر اساس تحلیل انرژی و تعیین بخش‌های بحرانی سامانه انجام شده است تا بیشترین اثر بر عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار گیرد.

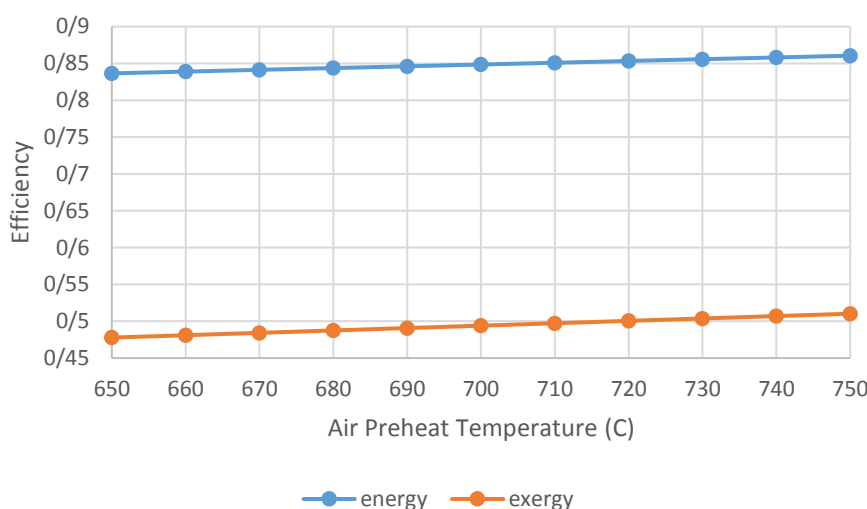
تأثیر تغییرات دمای پیش‌گرم‌کن هوای احتراق. در مبدل حرارتی E-100، انتقال حرارت بین گاز داغ خروجی محفظه احتراق زیست‌توده و هوای خروجی کمپرسور باعث افزایش دمای هوا پیش از ورود به توربین گاز می‌شود، بنابراین این مبدل را می‌توان به عنوان پیش‌گرمایش هوا در نظر گرفت. در تحلیل حساسیت، دمای پیش‌گرمایش هوا از مقدار پایه شبیه‌سازی تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد که بیشینه دمای ممکن برای انتقال حرارت در E-100 است، تغییر داده شد. این بازه دما برای همگرایی مبدل E-101 در سیکل فوق بحرانی نیز اهمیت دارد.

انتخاب دمای پیش‌گرمایش هوای احتراق بر اساس تحلیل انرژی انجام شد، زیرا بخش برایتون بیشترین تخریب انرژی

را دارد و تمرکز بر این بخش، بیشترین تأثیر را بر تولید توان الکتریکی دارد. همان طور که در شکل (۸) نشان داده شده، افزایش دمای پیش‌گرمایش منجر به افزایش توان الکتریکی توربین گاز می‌شود، در حالی که تولید برق توربین دی‌اکسیدکربن و نرخ تولید گرمایش و سرمایش در چیلر جذبی ثابت باقی می‌ماند. در نتیجه، توان خالص سامانه که تابعی از توربین گاز است، با افزایش دمای پیش‌گرمایش، به ۲۲۶۸ کیلووات افزایش یافته است. دلیل اصلی افزایش توان توربین گاز، افزایش دما و در نتیجه ورود انرژی و انرژی بیشتر به توربین است. با افزایش جذب حرارت در E-100، انرژی سوخت بیشتری به توربین گاز تزریق می‌شود، هرچند میزان تخریب انرژی در محفظه احتراق تغییر چندانی نمی‌کند، زیرا واکنش‌های احتراق ذاتا با برگشت‌ناپذیری بالایی همراه هستند. افزایش دما پیش از محفظه منجر به افزایش دمای خروجی آن شده و این عامل، مؤلفه اصلی برای انتقال حرارت بیشتر در E-100 و تغذیه انرژی و انرژی بیشتر به توربین گاز است. همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده، با افزایش دمای پیش‌گرمایش، پارامتر توان خالص سامانه $\dot{W}_{net}$ افزایش یافته و به دنبال آن، بازده انرژی و انرژی به ۰/۸۶ و ۰/۵۱ افزایش یافته‌اند. بنابراین، یکی از راه‌های عملی برای ارتقای سطح ترمودینامیکی سامانه، افزایش جذب حرارت در مبدل E-100 تا حد ممکن است.



شکل ۸. بررسی تغییرات دمای پیش گرمکن هوای احتراق بر نرخ تولید محصولات سامانه تولید همزمان



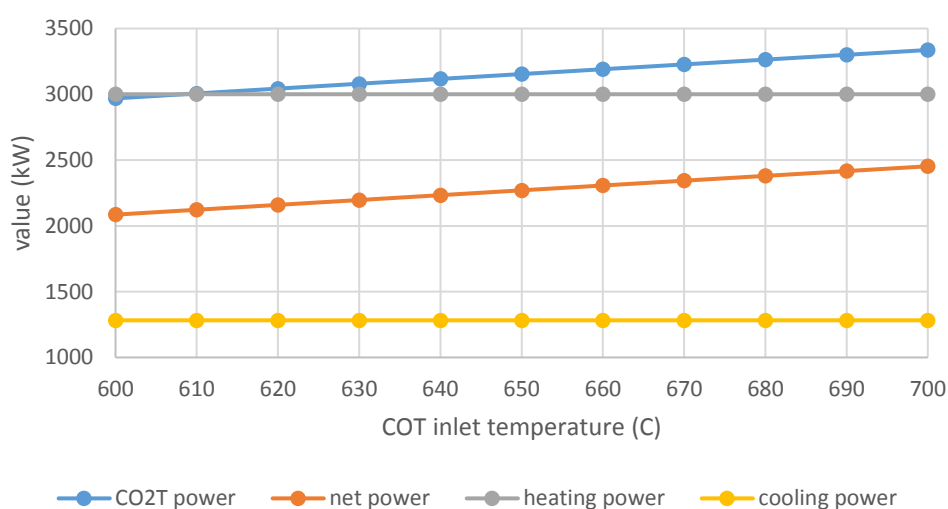
شکل ۹. بررسی تغییرات دمای پیش گرمکن هوای احتراق بر راندمان کلی انرژی و اگزرژی

(مقدار پایه) تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد، بیشینه دمای قابل دستیابی برای همگرایی حرارتی در مبدل E-103، تغییر داده شد. بر اساس شکل (۱۰)، افزایش دمای ورودی دی اکسیدکربن به توربین فوق بحرانی، همانند افزایش دمای پیش گرمایش هوا، منجر به افزایش توان تولیدی در توربین شده است، در حالی که تولید گرمایش و سرمایش در چیلر جذبی ثابت باقی مانده است. این امر نشان می دهد که بالانس انرژی کل سیکل فوق بحرانی به گونه ای است که انرژی انتقالی از جریان داغ دی اکسیدکربن به جعبه داغ تغییر نکرده و تنها تولید برق متأثر شده است. افزایش

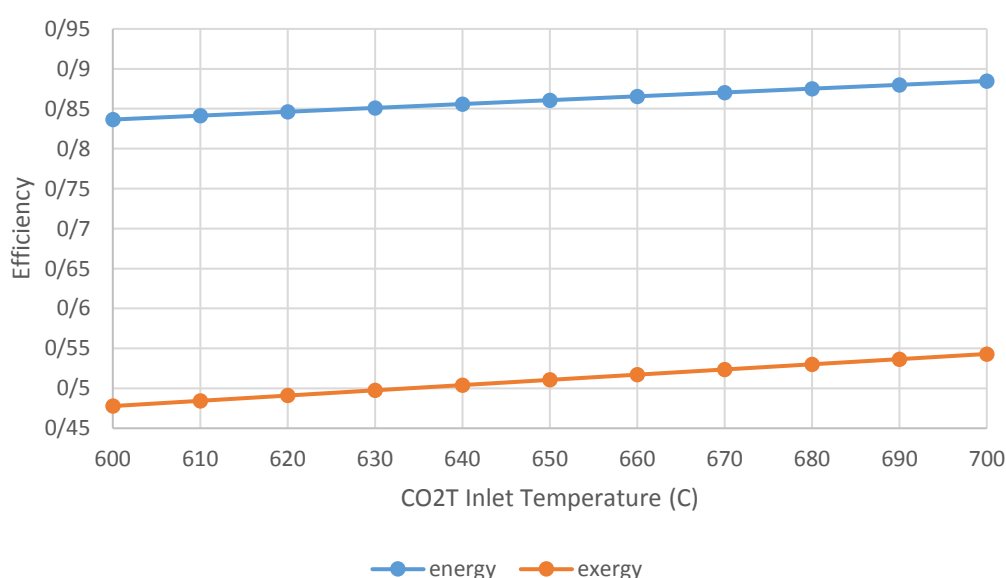
تأثیر تغییرات دمای ورودی به توربین دی اکسیدکربن. مطابق با شکل (۵)، بخش فوق بحرانی دی اکسیدکربن ۲۷ درصد از تخریب انرژی کل سامانه را به خود اختصاص می دهد؛ بنابراین کاهش برگشت ناپذیری در این بخش از اهمیت بالایی برای بهبود کلی سامانه تولید همزمان برخوردار است و به همین دلیل تحلیل حساسیت بر روی دمای دی اکسیدکربن ورودی به توربین فوق بحرانی انجام شد. این دما حاصل انتقال حرارت از گاز دودکش به وسیله مبدل E-101 است و مبدل E-101 نقش مشابه مبدل E-100 را دارد. دمای ورودی مورد بررسی از ۶۰۰ درجه سانتی گراد

اگر انرژی تغذیه می‌شود. علاوه بر این، با افزایش تولید برق و ثابت ماندن دبی سوخت، انرژی و اگر انرژی مفید بیشتری در کل سامانه تولید شده و بازده انرژی و اگر انرژی کل سامانه مطابق شکل (۱۱) به ۸۸ و ۵۴ درصد افزایش یافته است. مقایسه شکل‌های (۹) و (۱۱) نشان می‌دهد که تأثیر دمای دی‌اکسیدکربن ورودی بر بازده انرژی و اگر انرژی محسوس‌تر از تأثیر دمای پیش‌گرمایش هوای احتراق است.

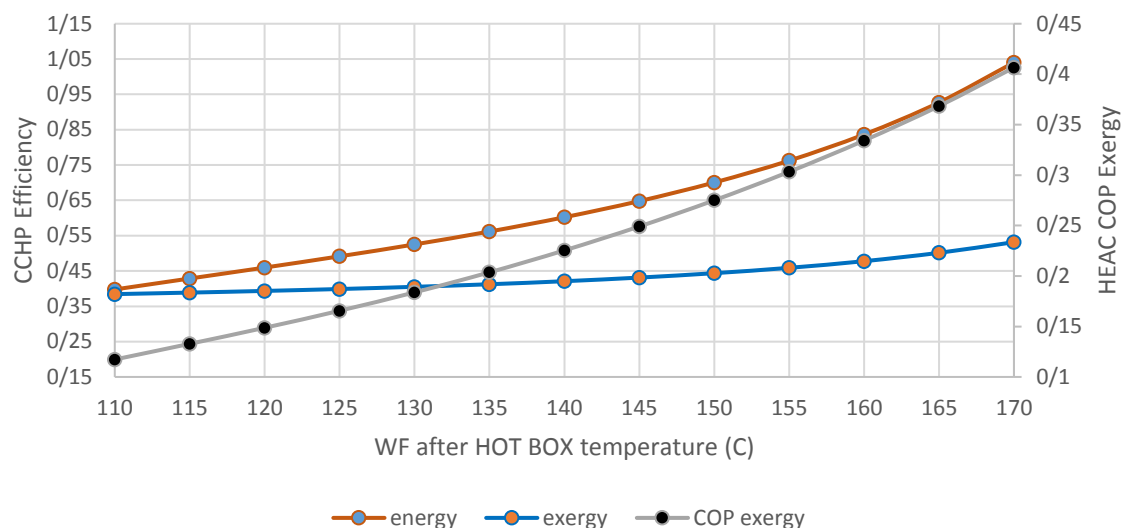
دمای ورودی باعث ورود انرژی و اگر انرژی بیشتر از طریق جذب حرارت در E-101 شده و تولید برق توربین دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی تا ۳۳۳۷ کیلووات افزایش یافته است. از آنجایی که تنها تولید برق تغییر کرده، توان خالص کل سامانه $\dot{W}_{net}$ به ۲۴۵۳ کیلووات افزایش یافته است. افزایش جذب حرارت در E-101 باعث افزایش ضریب عملکرد مبدل، کاهش تخریب اگر انرژی و بالا رفتن بازده اگر انرژی آن شده و توربین با مقدار بیشتری از



شکل ۱۰. بررسی تغییرات دمای ورودی توربین دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی بر نرخ تولید محصولات سامانه تولید همزمان



شکل ۱۱. بررسی تغییرات دمای ورودی توربین دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی بر راندمان کلی انرژی و اگر انرژی



شکل ۱۲ بررسی تغییرات دمای سیال عامل پس از جعبه داغ بر بازده انرژی و انرژی کلی سامانه تولید همزمان و ضریب عملکرد انرژی سامانه تبرید جذبی

ثابت باقی مانده است.

نتیجه گیری

در این مطالعه، یک سامانه یکپارچه جدید تولید همزمان پیشنهاد شده که سوخت آن زیست توده است و ریکاوری حرارت چندگانه را از توربین گازی ارائه می کند. از ویژگی های سامانه پیشنهادی می توان به نرخ ذخیره سازی سوخت در مقایسه با مطالعات قبلی و بالابودن بازده انرژی و انرژی در مقایسه با سامانه های مشابه اشاره کرد. علاوه بر این، مهم ترین نوآوری فرایند را می توان ارائه یک چیلر جذبی با راندمان بالا و ضریب عملکرد بالای ۸۲ درصد بیان کرد که برای این منظور از جعبه داغ و ریکاوری بالای حرارت استفاده شده است. این سامانه جدید از طریق تحلیل انرژی و انرژی بررسی شده و یک ارزیابی حساسیت هدفمند بر روی پارامترهای حیاتی آن صورت گرفته است. جعبه داغ به کار رفته در سامانه تبرید توانسته یک ضریب عملکرد مناسب را تولید کند که به شدت در بازده انرژی کلی تولید همزمان مؤثر و دخیل است. تحلیل ها نشان داد که تأثیر دمای دی اکسید کربن وارد شده به توربین دی اکسید کربن فوق بحرانی بر بازده انرژی و انرژی محسوس تر از تأثیر دمای پیش گرمایش هوای احتراق پیش از توربین گاز است و طبق بررسی ها، افزایش دمای دی اکسید کربن وارد شده به توربین دی اکسید کربن فوق بحرانی به لحاظ کیفی نتایجی شبیه به افزایش

تأثیر تغییرات دمای سیال عامل پس از جعبه داغ. جعبه داغ به عنوان مبدل حرارتی تجمیع کننده گرمای بیهوده در سراسر سامانه عمل می کند و افزایش قابل توجه ضریب عملکرد را به همراه دارد که در جدول (۹) با سایر مطالعات مقایسه شده است. در تحلیل حساسیت، دمای سیال عامل در خروجی جعبه داغ از ۱۱۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی گراد تغییر داده شد، در حالی که فشار سیال عامل ثابت نگه داشته شده است. بالاترین دما زمانی به دست آمد که کیفیت سیال عامل در خروجی ۱۰۰ درصد بخار نبوده است، زیرا در این شرایط همگرایی در جدا کننده V-100 و سایر تجهیزات حفظ می شود. بر اساس شکل (۱۲)، بیشترین دمای سیال عامل با بیشترین نرخ انتقال حرارت همراه بوده و ضریب عملکرد قانون دوم به ۰/۴۱ افزایش یافته است، که نسبت به حالت مبنا بهبود محسوس را نشان می دهد. این افزایش ضریب عملکرد و بهبود بازده انرژی و انرژی سامانه، عمدتاً ناشی از افزایش کارایی سامانه تبرید جذبی است. همچنین، همان طور که در تحلیل ترمودینامیکی پیشتر اشاره شد، افزایش جذب حرارت در مبدل های E-100، E-101 و E-104 می تواند در بهبود کارایی کل سامانه مؤثر باشد. در این تحلیل، افزایش انتقال حرارت در E-104 موجب ارتقای کارایی انرژی آن و انتقال انرژی سوخت بیشتر به مبدل های E-105 و E-107، تولیدکنندگان آب گرم و آب سرد، شد. به عبارت دیگر، افزایش کارایی جعبه داغ منجر به افزایش تولید گرمایش و سرمایش شده، در حالی که تولید برق

واژه نامه

پیشنهادی نوین	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
هزینه هم‌سطح‌شده برق	levelized cost of electricity	
سامانه‌های ترکیبی سرمایش، حرارت و توان	combined cooling heating and power	
ضریب بهره‌برداری انرژی	Energy utilization factor	
خنک‌سازی جزئی با دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی	supercritical CO ₂ Partial Cooling	
جعبه داغ	Hot Box	
بازیابی گرما به صورت خودبازگردان	self- recuperating	
نرخ صرفه‌جویی سوخت	fuel saving rate	
ضریب عملکرد	COP	

تقدیر و تشکر

دمای پیش‌گرمایش هوا را در پی داشته است و مقدار تولید گرمایش و سرمایش در چیلر جذبی ثابت مانده است که این امر نشان می‌دهد بالانس انرژی در کل سیکل فوق بحرانی به گونه‌ای پیش رفته است که انرژی انتقالی از طریق جریان داغ دی‌اکسیدکربن به جعبه داغ مقداری ثابت بوده و همراه با افزایش دمای دی‌اکسیدکربن ورودی به توربین دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی تغییر نکرده است.

یافته‌های کلیدی مقاله حاضر شامل موارد زیر است:

۱. پارامتر نرخ صرفه‌جویی سوخت بیان کرده است که فرایند جدید به خوبی می‌تواند جایگزین سامانه‌های مورد بررسی گردد و ایده آن برای ادغام حرارتی بسیار قدرتمند است.

۲. سامانه تولید همزمان جدید در حالت مبنا دارای ۴۳۶۶ کیلووات تخریب‌پذیری است که ۳۹/۴۶ درصد آن در محفظه احتراق رخ داده است. مطابق با بررسی صورت گرفته، محفظه احتراق زیست‌توده با تخریب‌پذیری ۱۷۲۳ کیلووات بیشترین برگشت‌ناپذیری را دارد که برای بهبود سامانه باید جذب حرارت را در مبدل حرارتی پیش از آن در بخش گازی افزایش داد.

۳. طبق نتایج مدل‌سازی مشخص شد که بیشترین دمای ممکن برای پیش‌گرمایش هوا پیش از توربین گاز برابر با ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و بیشترین دمای سیال ورودی به توربین دی‌اکسیدکربن معادل با ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند. علاوه بر این، بالاترین دمای ممکن برای سیال عامل خروجی از جعبه داغ معادل با ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد است و در این سه دما، مبدل‌های حرارتی E-100، E-101 و E-104 دارای بالاترین جذب حرارت از منبع گرما هستند و می‌توانند به خوبی تجهیزات تولید کننده محصولات را تغذیه کنند.

۴. ارزیابی حساسیت شرح داد که در شرایط $T_4 = 750^{\circ}\text{C}$ و $T_9 = 700^{\circ}\text{C}$ و $T_{21} = 170^{\circ}\text{C}$ سامانه دارای بالاترین جذب حرارت از محفظه احتراق، گازهای خروجی و جعبه داغ است و در این شرایط جدید کارایی انرژی سامانه تولید همزمان به ترتیب ۵۱ درصد، ۵۴ درصد و ۵۳ درصد خواهد بود.

مراجع

- [1] E. Gholamian et al., "Proposal, exergy analysis and optimization of a new biomass - based cogeneration system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 93, pp. 223–235, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.095>

- [2] P. Iodice et al., "Energy, economic and environmental performance appraisal of a trigeneration power plant for a new district: Advantages of using a renewable fuel," *Applied Thermal Engineering*, vol. 95, pp. 330–338, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.017>
- [3] K. Javaherdeh and S. SafariSabet, "Exergy- economic and energy investigation of a combined cycle of simultaneous production of Rankine steam and ejector refrigeration cycle using solar energy," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 37, pp. 29–48, 2025. <https://doi.org/10.22067/JACSM.2024.88420.1267>
- [4] M. S. Hossain et al., "Solar PV and biomass resources- based sustainable energy supply for off- grid cellular base stations," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 53817–53840, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978121>
- [5] A. Kardgar, "Evaluation of an integrated solar- geothermal energy system to provide power, heat and cooling," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 4, pp. 19–34, 2022. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.76152.1108>
- [6] E. Amiri Rad and P. Kazemiani- Najafabadi, "Thermoeconomic optimization of a superheated Kalina cycle for various geothermal source temperatures in Iran," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 33, no. 1, pp. 1–16, 2021. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.67824.1002>
- [7] A. Saoud et al., "Performance investigation and numerical evaluation of a single- effect double- lift absorption chiller," *Applied Thermal Engineering*, vol. 227, p. 120369, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120369>
- [8] D. Mertzis et al., "Performance analysis of a small- scale combined heat and power system using agricultural biomass residues: The SMART- CHP demonstration project," *Energy*, vol. 64, pp. 367–374, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.055>
- [9] V. G. Nguyen et al., "Improving the prediction of biochar production from various biomass sources through the implementation of explainable machine learning approaches," *International Journal of Green Energy*, vol. 21, pp. 2771–2798, 2024.
- [10] S. Akhtari et al., "Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 117–127, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.058>
- [11] V. G. Nguyen et al., "Precise prognostics of biochar yield from various biomass sources by Bayesian approach with supervised machine learning and ensemble methods," *International Journal of Green Energy*, vol. 21, pp. 2180–2204, 2024. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2297776>
- [12] B. Abdoos et al., "Energetic/exergetic parametric study of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system coupled with a local cellulosic biomass combustion chamber," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 3770–3777, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.051>
- [13] C. Y. Zheng et al., "A novel thermal storage strategy for CCHP system based on energy demands and state of storage tank," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 85, pp. 117–129, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.08.008>
- [14] M. Jalili et al., "An integrated CCHP system based on biomass and natural gas co- firing: Exergetic and thermo- economic assessments in the framework of energy nexus," *Energy Nexus*, vol. 5, p. 100016, 2022.

- <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100016>
- [15] D. Sánchez- Lozano et al., “Techno- economic assessment of a hybrid PV- assisted biomass gasification CCHP plant for electrification of a rural area in the Savannah region of Ghana,” *Applied Energy*, vol. 377, p. 124446, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124446>
- [16] Y. Ma et al., “Proposal and assessment of a novel supercritical CO₂ Brayton cycle integrated with LiBr absorption chiller for concentrated solar power applications,” *Energy*, vol. 148, pp. 839–854, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.155>
- [17] P. Ahmadi et al., “Development and assessment of an integrated biomass- based multi- generation energy system,” *Energy*, vol. 56, pp. 155–166, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.024>
- [18] H. Abd El- Sattar et al., “Tri- generation biomass system based on externally fired gas turbine, organic Rankine cycle and absorption chiller,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 260, p. 121068, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121068>
- [19] S. S. Bishal et al., “Performance evaluation of an integrated cooling and power system combining supercritical CO₂ , gas turbine, absorption refrigeration, and organic Rankine cycles for waste energy recuperating system,” *Results in Engineering*, vol. 17, p. 100943, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100943>
- [20] S. S. Bishal et al., “Performance evaluation of a novel multigeneration plant of cooling, power, and seawater desalination using supercritical CO₂ partial cooling, ME- TVC desalination, and absorption refrigeration cycles,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, p. 100485, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100485>
- [21] T. U. K. Nutakki et al., “Thermo- economic- environmental analysis of a sustainable heat integration design for a biomass- fueled power plant using integration of CCHP and seawater desalination application,” *Desalination*, vol. 577, p. 117404, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117404>
- [22] Y. Feng et al., “Design, economic analysis, and environmental assessment of an innovative municipal solid waste- based multigeneration system integrating LNG cold utilization and seawater desalination,” *Desalination*, vol. 586, p. 117848, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117848>
- [23] L. Wang et al., “Thermoeconomic assessment of an innovative combined cooling, heating, and power system based on biomass combustion, TCO₂ cycle, absorption chiller, and desalination,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 184, pp. 151–169, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.073>
- [24] Z. Xu et al., “Design and comprehensive thermo- enviro- economic assessment of an innovative polygeneration system using biomass fuel and LNG regasification: A CCHP- thermally desalination application,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 183, pp. 925–944, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.040>
- [25] C. R. Altafini et al., “Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model,” *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 2763–2777, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00025-6)
- [26] V. Adebayo et al., “Energy, exergy and exergo- environmental impact assessment of a solid oxide fuel cell coupled with absorption chiller & cascaded closed- loop ORC for multi- generation,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, pp. 3248–3265, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.222>

- [27] F. Mohammadkhani et al., "Exergoeconomic assessment and parametric study of a Gas Turbine-Modular Helium Reactor combined with two Organic Rankine Cycles," *Energy*, vol. 65, pp. 533-543, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.002>
- [28] J. Song and C. Gu, "Performance analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (ORC) system with wet steam expansion for engine waste heat recovery," *Applied Energy*, vol. 156, pp. 280-289, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.019>
- [29] J. You et al., "Integrating an innovative geothermal-driven multigeneration approach and LNG cold energy utilization process for sustainable energy supply, producing hydrogen, power, heating, and cooling," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 196, p. 106904, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106904>
- [30] M. Shamsi et al., "Evaluation of an environmentally-friendly poly-generation system driven by geothermal energy for green ammonia production," *Fuel*, vol. 365, p. 131037, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131037>
- [31] Q. Zhang et al., "Thermodynamic simulation and optimization of natural gas liquefaction cycle based on the common structure of organic Rankine cycle," *Energy*, vol. 264, p. 126134, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126134>
- [32] M. Zoghi et al., "Thermo-economic assessment of a novel trigeneration system based on coupling of organic Rankine cycle and absorption-compression cooling and power system for waste heat recovery," *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 567-580, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.030>
- [33] M. S. Barghi Jahromi et al., "Thermo-economic evaluation of a solar dryer with evacuated heat pipe collector and energy storage," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, pp. 39-58, 2021. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.56640.0>
- [34] F. Vahidinia, "Evaluation of energy and exergy of a parabolic trough solar collector equipped with internal fin and star turbulator absorber tube," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, pp. 97-114, 2024. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.83484.1199>
- [35] M. J. Moran et al., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [36] M. M. Ghafurrian and H. Niazmand, "Optimization of Combined Cooling Heating and Power System (CCHP) by a novel hybrid method," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 30, pp. 61-78, 2019.
- [37] M. R. Kalateh et al., "Experimental study and numerical modeling of the effect of utilizing selected twisted tape insert on the performance of thermal photovoltaic system," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 33, pp. 1-22, 2022. <https://doi.org/10.22067/JACSM.2022.74538.1083>
- [38] A. Bejan et al., *Thermal Design and Optimization*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1996.
- [39] P. Ahmadi et al., "Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boosted ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 1795-1805, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.025>
- [40] E. Gholamian et al., "Proposal, exergy analysis and optimization of a new biomass-based cogeneration system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 93, pp. 223-235, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.095>
- [41] J. Aman et al., "Residential solar air conditioning: Energy and exergy analyses of an ammonia-water absorption

- cooling system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, pp. 424–432, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.006>
- [42] X. Wang, Y. Yang, Y. Zheng, and Y. Dai, “Exergy and exergoeconomic analyses of a supercritical CO₂ cycle for a cogeneration application,” *Energy*, vol. 119, pp. 971–982, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.044>
- [43] W. Shao et al., “Simulation and multi-objective assessment of an environmentally friendly trigeneration system powered by biogas from landfilling using a novel cascade heat integration model,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 425, p. 138664, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138664>



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



Society of
Manufacturing
Engineering of
Iran

Investigation of the Hydrogen Increment to Natural Gas on Combustion Characteristic: Numerical Simulation*

Research Article

Ebrahim Afshari¹ , Mahdiye Haratin Aval², Nabi Jahantigh³

 [10.22067/jacsm.2025.94099.1338](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.94099.1338)

Abstract-- Injecting green hydrogen into natural gas is considered a renewable energy storage method. It is a cost-effective option for providing heat and electricity to residential and commercial sectors while reducing the carbon content of natural gas networks. By injecting less than 10% hydrogen into natural gas, there is no need to change the combustion infrastructure. The aim of this study is to investigate hydrogen injection into the urban gas transmission network by numerically simulating the combustion chamber of a natural gas and hydrogen mixture and finding the appropriate natural gas/hydrogen ratio by examining the combustion characteristics. For this purpose, the conservation equations of mass, momentum, energy and chemical components have been solved numerically. Comparison of the results of the present method with the experimental results, shows the high agreement and accuracy of the solution method. The results show that adding hydrogen increases the temperature and flame elongation, reduces carbon dioxide emission, increases water and the amount of NOx produced. In the case of 2.5% hydrogen, the heat of reaction is reduced compared to pure methane, but gradually and with increasing hydrogen percentage, the heat of reaction increases.

Key Words: Numerical Simulation, Mixed fuel, Hydrogen, produced NOx, Combustion chamber

1. Introduction

Due to the economic growth of countries, population growth, depletion of fossil fuels, volatility of fuel prices, the need for energy security, and also the pollutants resulting from the combustion of common fossil fuels such as diesel, oil, and coal, the development of renewable and less polluting energy sources is very important. The most important of these sources are solar energy, wind energy, geothermal energy, biogas, and hydrogen energy. The calorific value of hydrogen is much higher than that of methane and diesel fuel. Hydrogen is the lightest gaseous substance in the world and is considered one of the cleanest fuels available. One of the methods that eliminates the challenges of using hydrogen is injecting it into the

municipal gas network and creating a mixture of hydrogen and gas [1]. Finding the right ratio of hydrogen to natural gas is one of the challenges ahead. The aim of this research is to simulate the combustion of a mixture with certain ratios of natural gas and hydrogen and to investigate combustion characteristics such as calorific value, combustion temperature, flame length and pollution level for injecting hydrogen available in industries into the urban gas network.

2. Governing Equations

The combustion chamber under study is shown in figure (1) The flow inside the chamber is assumed to be steady and compressible. The reactants and products are assumed to be ideal gases. Buoyancy effects are ignored. The specific heat capacity is calculated from the mixing law model. According to the Reynolds number of the flow; the flow is turbulent and the turbulence model is used to model this flow.

The conservation equations include conservation of mass, momentum, energy, and conservation of particles [2].

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} C^i) = \nabla \cdot (D^{i,eff} \nabla C^i) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) \quad (4)$$

The second-order upwind model has been used to discretize the continuity, momentum, turbulence, and species equations in order to increase the accuracy of the results [3, 4].

3. Results

In order to ensure the numerical simulation, the simulation results have been compared with the results available in the reference. there is a very good agreement between

* Manuscript received June 17, 2025 Revised July 02, 2025, Accepted September 13, 2025.

¹ Corresponding author. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan.

Email: e.afshari@eng.ui.ac.ir

² Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan

³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zabol.

them. Figure (2) shows the changes in the mass fraction of carbon dioxide for different percentages of hydrogen in the fuel input. As the percentage of hydrogen input increases, the amount of carbon dioxide decreases, and in addition to stabilizing the flame, it slows down the progress of the combustion process in the early and middle stages, which in turn reduces the mole fraction of carbon monoxide and carbon dioxide in the later stages.

The values of NOx mass fraction are plotted in figure (3) for different hydrogen percentages along the defined

axis line inside the chamber. It is observed that with increasing hydrogen fuel fraction at the inlet, the amount of NOx produced in the chamber increased. According to the graph, NOx has been produced since the flame was formed and combustion took place, and as the amount of hydrogen input increased, the changes in the increase in NOx produced became smaller.

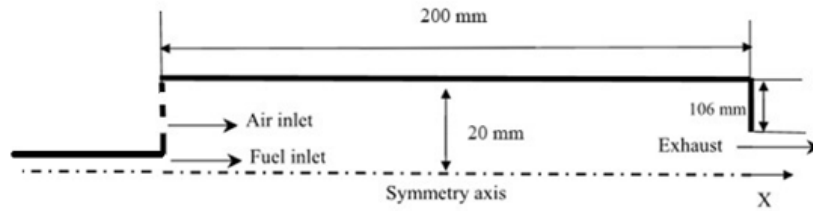


Fig.1. Combustion chamber geometry and boundary conditions

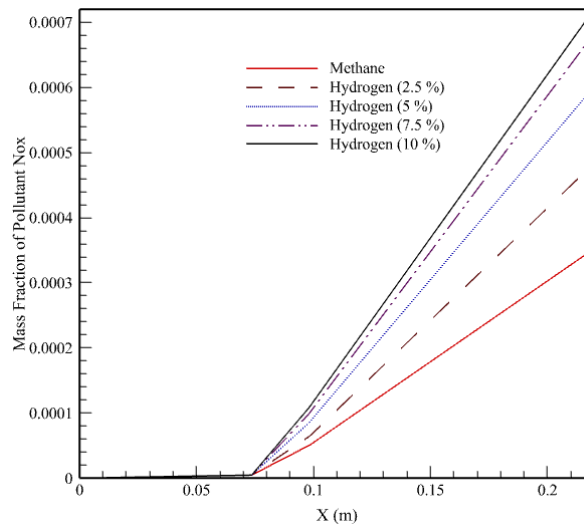


Fig. 2. Changes in carbon dioxide mass fraction along the axis for different hydrogen percentages

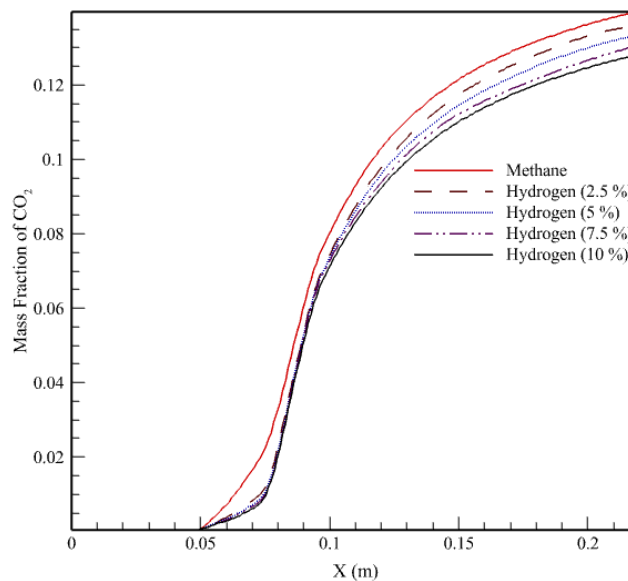


Fig. 3. Variations in CO₂ mass fraction along the axis for different hydrogen percentages

4. Conclusion

The purpose of this research is to simulate the combustion of a mixture with certain proportions of natural gas and hydrogen to find the optimal ratio of hydrogen to natural gas and to investigate combustion characteristics such as calorific value, combustion temperature, flame length, and pollution level for injecting hydrogen available in industries into the urban gas network. For this purpose, the equations of mass, momentum, energy and particles in the combustion chamber have been modeled using Fluent software, considering a fuel mixture of methane and different percentages of hydrogen at the inlet. The results show that by adding hydrogen, the carbon dioxide emission rate decreased due to the reduction in the total carbon rate, the amount of water produced increased, and the amount of NO_x produced in the chamber also increased. The addition of hydrogen also affects the flame structure and causes the flame to stretch. At 2.5% hydrogen in the inlet, the heat of reaction decreased compared to pure methane; however, gradually and with increasing hydrogen percentage, the heat of reaction increased.

5. References

- [1] R. Mahadevan and J. Asafu-Adjaye, "Energy consumption, economic growth and prices: A reassessment using panel VECM for developed and developing countries," *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2481-2490, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.08.019>
- [2] V. S. Nuotio-Antar, *Equations Governing Fluid Flow and Heat Transfer, in Fundamentals of Low Gravity Fluid Dynamics and Heat Transfer*: CRC Press, pp. 19-30, (2019).
- [3] J. R. Howell and R. Siegel, *Thermal radiation heat transfer. Volume 3 Radiation transfer with absorbing, emitting, and scattering media*, 1971.
- [4] A. Dolai, P. Badhuk, and R.V. "Ravikrishna, Investigation of syngas combustion in a novel ultra-low emission 20-kW two-stage combustor," *Fuel*, vol. 340, p. 127497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127497>.



شبیه سازی عددی افزایش هیدروژن افزوده شده به گاز طبیعی بر مشخصه های احتراق در مشعل های صنعتی*

مقاله پژوهشی

ابراهیم افشاری^(۱)  مهدیه هراتیان اول^(۲) نبی جهاننغ^(۳)

doi 10.22067/jacsm.2025.94099.1338

چکیده تزریق هیدروژن سبز به گاز طبیعی به عنوان یک روش ذخیره سازی انرژی های تجدیدپذیر محسوب می شود و یک گزینه مقرون به صرفه برای تأمین گرما و برق برای بخش های مسکونی و تجاری با کاهش محتوای کربن شبکه های گاز طبیعی است. با تزریق کمتر از ۱۰ درصد هیدروژن به گاز طبیعی، نیازی به تغییر زیرساخت های مربوط به احتراق نیز نیست. هدف از این مطالعه بررسی تزریق هیدروژن به شبکه انتقال گاز شهری با شبیه سازی عددی محفظه احتراق مخلوط گاز طبیعی و هیدروژن و یافتن نسبت مناسب گاز طبیعی/هیدروژن با بررسی ویژگی های احتراق است. بدین منظور معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و اجزای شیمیایی به روش عددی حل شده است و مقایسه نتایج روش حاضر با نتایج تجربی، نشان دهنده تطابق و دقت بالای روش حل است. نتایج نشان می دهد افزودن هیدروژن باعث افزایش دما و کشیدگی شعله، کاهش انتشار کربن دی اکسید، افزایش آب و مقدار NOx تولید شده می شود. در حالت ۲/۵ درصد هیدروژن، میزان گرمای واکنش نسبت به متان خالص کاهش یافته، اما به تدریج و با افزایش درصد هیدروژن، گرمای واکنش افزایش می یابد.

واژه های کلیدی شبیه سازی، سوخت ترکیبی، هیدروژن، NOx تولیدی، محفظه احتراق.

مقدمه

گازهای گلخانه ای، کشورهای در حال توسعه و به خصوص کشورهای توسعه یافته به دنبال جایگزینی سوخت هایی با آلایندگی کمتر به جای هیدروکربن های رایج هستند. در این مسیر با پیشرفت تجهیزات پالایش، نگهداری و ذخیره سوخت، هیدروژن توانسته گوی رقابت را از سایر رقبا برآورد. فراورده واکنش سوختن هیدروژن به دلیل عدم وجود اتم کربن در سمت واکنش دهنده منجر به تولید گاز گلخانه ای نمی شود و از این جهت یک انتخاب ایدئال است. با این حال، ساخت وسایل نقلیه ای که صرفاً از هیدروژن استفاده می کنند؛ همچنان به عنوان یک گزینه بلندمدت و نامطمئن با موانع متعددی شامل فرآوری سخت و پرهزینه هیدروژن خالص، دشواری طراحی شبکه انتقال، خطر نگهداری هیدروژن در حجم بالا به دلیل واکنش پذیری آن

به دلیل رشد اقتصادی کشورها، رشد جمعیت، پایان پذیری سوخت های فسیلی، متغیر بودن قیمت سوخت، نیاز به امنیت انرژی و همچنین آلاینده های ناشی از احتراق سوخت های رایج فسیلی مانند گازوئیل، نفت و زغال سنگ، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و با آلاینده گی کمتر بسیار مهم است. از مهم ترین این منابع، انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی، بیوگاز و انرژی هیدروژن است. در میان کشورهای توسعه یافته صادر کننده انرژی، در دو دوره کوتاه مدت و بلندمدت، علیت دو طرفه ای بین رشد اقتصادی و مصرف انرژی وجود دارد؛ این درحالی است که در کشورهای در حال توسعه مصرف انرژی تنها در کوتاه مدت محرک رشد بوده است [1]. امروزه با توجه به اهمیت کاهش

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۳/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۶/۲۲ می باشد.

Email: e.afshari@eng.ui.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۲) کارشناس مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل.

و نظیر این‌ها روبه‌رو است که باعث شده استفاده از هیدروژن خالص به عنوان سوخت منطقی به نظر نرسد.

ارزش حرارتی هیدروژن نسبت به متان و سوخت دیزل بسیار بالاتر است. هیدروژن سبک‌ترین ماده گازی موجود در جهان است و از پاک‌ترین سوخت‌های موجود محسوب می‌شود. سوختن هیدروژن باعث تولید مواد سمی نظیر هیدروکربن‌ها، مونواکسیدکربن، اکسید سولفور، اسیدهای ارگانیک و دی‌اکسیدکربن نمی‌شود و تنها فرآورده حاصل از احتراق آن آب است. هیدروژن به عنوان سوخت جایگزین سوخت‌های فسیلی، مشکلات عملی سوخت‌های مایع نظیر محبوس شدن بخار، سخت شدن دیواره سرد و تبخیر ناکافی را ندارد. معایبی شامل چگالی انرژی پایین در مقایسه با سایر سوخت‌ها، نیاز به شبکه انتقال مجزا با ویژگی‌های خاص، عدم دسترسی به طور طبیعی و هزینه بالای فرآوری، پایین بودن خالص انرژی تولیدی و عدم امکان استفاده از هیدروژن خالص در مشعل‌های طراحی شده متداول پی‌آمد استفاده از هیدروژن است [2].

جایگزینی کامل گاز طبیعی با هیدروژن نیازمند تغییر زیرساخت‌هایی از قبیل ایجاد شبکه لوله‌کشی انتقال مجزا، سیستم حمل و نقل با استانداردهای ویژه، تغییر در مشعل‌های صنعتی و خانگی و... را دارد؛ اما مطالعات نشان داده که تزریق مقدار مشخصی هیدروژن به شبکه انتقال گاز شهری (کمتر از ۱۰ درصد هیدروژن) بدون نیاز به ایجاد تغییرات در زیر ساخت، امکان‌پذیر است و مزایایی نظیر افزایش ارزش حرارتی سوخت، کاهش میزان آلاینده‌گی سوخت، از میان رفتن خطرات ذخیره‌سازی هیدروژن، امکان درآمدزایی با فروش هیدروژن موجود در صنایع به دولت‌ها دارد. در کنار فرصت‌های گفته شده ممکن است ایجاد تغییر در ترکیب رایج گاز طبیعی باعث آسیب به محیط زیست، شبکه انتقال و شبکه توزیع شود. لذا انجام این کار بدون بررسی دقیق تهدیدها ممکن است خسارت‌های جبران‌ناپذیری ایجاد کند [3]. یکی از روش‌هایی که باعث حذف چالش‌های استفاده از هیدروژن می‌شود؛ تزریق آن به شبکه گاز شهری و ایجاد مخلوط هیدروژن و گاز است. هر گونه تغییر در ترکیب سوخت در شبکه مصرف نیازمند بررسی تغییرات به وجود آمده در رفتار مواد در شبکه توزیع و مصرف است.

عبدالملک در مطالعه‌ای در مورد روش‌های زیاله‌سوزی، احتراق، پیرولیز و گازی‌سازی از زیست‌توده با تأکید روی

گازی‌سازی که فرایندی مؤثر و اقتصادی و با اثرات تخریبی کمتر زیست‌محیطی برای تولید هیدروژن است پرداخت [4]. ژو و همکاران به بررسی عوامل مؤثر بر تولید هیدروژن از زیست‌گاز پرداختند. نتایج حاکی از کاهش نسبت مولی کربن دی‌اکسید به متان در مخلوط زیست‌گاز با وجود ثابت ماندن انرژی کل سیستم است که باعث کاهش تولید هیدروژن در سمت فرآورده می‌شود [5]. چانگ الکس و لی به بررسی روش‌های ریفرمینگ زیست‌گاز در جهت تولید هیدروژن در یک راکتور نوع لانه‌زنبوری پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دما، درصد تبدیل متان و میزان تولید هیدروژن افزایش می‌یابد [6]. کوپلر و همکاران در یک آزمون تجربی، آلاینده‌های خروجی حاصل از سوخت ترکیب فشرده هیدروژن و گاز طبیعی را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن هیدروژن باعث افزایش اکسید نیتروژن و کاهش هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود و محدوده رقیق‌سوزی را افزایش می‌دهد [7]. وانگ و همکاران در یک آزمایش تجربی، رفتار احتراق مخلوط هیدروژن و گاز طبیعی را برای درصدهای حجمی مختلف هیدروژن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن هیدروژن، مدت زمان احتراق کاهش می‌یابد؛ ولی حرارت آزاد می‌شود و اکسید نیتروژن بیشتر می‌شود [8]. ژائو و همکاران به بررسی تأثیر نسبت مولی هیدروژن به متان بر دمای احتراق پرداختند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش درصد هیدروژن؛ دمای احتراق تا ۷۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد [9]. دونو و همکاران ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی و هیدروژن را در فشارهای بالا بررسی کردند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دما، فشار و درصد سوخت هیدروژن، زمان تأخیر در اشتعال کاهش می‌یابد [10]. دالگر بررسی عددی را روی احتراق مخلوط سوختی شامل گاز طبیعی و هیدروژن انجام داده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از مخلوط متان - هیدروژن به جای متان خالص با انرژی تولیدی برابر؛ بازده حرارتی و اکسید نیتروژن را افزایش می‌دهد؛ اما هیدروکربن‌های نسوخته، کربن مونواکسید کاهش می‌یابد [11]. کمالی و همکاران در یک شبیه‌سازی عددی تأثیر مخلوط هوا و هیدروژن بر میکرواحتراق با نسبت ابعادی مشابه را بررسی کردند. این مطالعه منجر به این نتیجه گردید که کاهش ابعاد محفظه احتراق منجر به کاهش چشمگیر در زمان اقامت می‌شود [12]. بوربانو و همکاران به بررسی اثرات اضافه کردن هیدروژن به متان بر ساختار شعله و انتشار گاز کربن مونواکسید در مشعل‌های اتمسفریک پرداختند. در این مطالعه تأثیرات افزوده

صنایع به شبکه گاز شهری است.

هندسه، معادلات حاکم، شرایط مرزی و روش حل عددی

محفظه احتراق مورد مطالعه مطابق شکل (۱) است. ابعاد محفظه در شکل نشان داده شده است. ضخامت دیواره‌ها ۵/۰ میلی‌متر است. جنس دیواره‌ها از فولاد ضد زنگ L316 است. جریان در داخل محفظه پایا و تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده است. واکنشگرها و محصولات گاز ایدئال در نظر گرفته می‌شوند. از اثرات شناوری صرف نظر می‌شود. اثرات سورت و دوفور نیز در نظر گرفته نمی‌شوند. برای محاسبه چگالی سیال، مدل گاز کامل استفاده می‌شود. ظرفیت گرمایی ویژه از مدل قانون مخلوط و سایر مشخصات از قبیل هدایت حرارتی و ویسکوزیته گازها از مدل قانون مخلوط گاز ایدئال محاسبه می‌شوند. با توجه به عدد رینولدز جریان، جریان آشفته است و برای مدل‌سازی این جریان از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده می‌شود. مدل‌های مختلف در مدل‌سازی جریان مغشوش تفاوت زیادی ندارد و فقط روند همگرایی مسئله متفاوت است.

معادلات بقا شامل بقای جرم، مومنتوم، انرژی و بقای اجزا است [18].

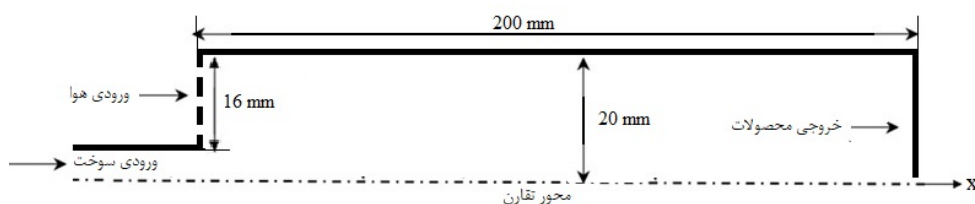
$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} C_i) = \nabla \cdot (D_i^{eff} \nabla C_i) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) \quad (4)$$

در معادله بقای جرم، $\vec{u}$ بردار سرعت و ρ چگالی مخلوط گاز است. معادلات بقا برای محفظه احتراق در دو بعد نوشته و حل می‌شوند. در معادله بقای مومنتوم، p و μ به ترتیب نشان دهنده فشار و ویسکوزیته هستند. در معادله بقای اجزا، C_i غلظت ذره و D_i^{eff} انتشار جرم مؤثر گونه i در مخلوط گاز است.



شکل ۱ هندسه و شرایط مرزی محفظه احتراق

شدن هیدروژن بر ساختار شعله و صدور کربن منوکسید در دو مشعل اتمسفریک مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش هیدروژن ارتفاع مخروط آبی رنگ شعله یک روند کاهشی ناشی از اضافه شدن هیدروژن دارد [13]. غفور و همکاران به بررسی مشخصات احتراقی شعله پخشی با سوخت آشفته هیبرید گاز طبیعی و هیدروژن پرداختند. افزودن هیدروژن تأثیر بسیار زیادی بر پایداری شعله و کاهش طول شعله، به خصوص در غلظت‌های بالای هیدروژن دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزودن هیدروژن به گاز طبیعی یک راه حل بی‌اثر برای کاهش NO_x و کربن‌مونواکسید در گستره این مطالعه است؛ در حالی که این استراتژی یک راه حل قابل توجه برای کاهش غلظت مولی کربن‌دی‌اکسید در حدود ۳۰٪ است [14]. وانگ و همکاران به بررسی اثر افزودن هیدروژن در مخلوط گاز طبیعی - هوا پرداختند. نتایج نشان دهنده بهبود مشخصه‌های احتراق در دو رژیم آرام و آشفته است [15]. شیواپراساد و همکاران تأثیر افزودن هیدروژن بر عملکرد احتراق و ویژگی‌های انتشار گازهای موتور بنزینی با سرعت بالا را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن هیدروژن باعث بهبود بازده موتور می‌شود [16]. بویویاکین و ازتان تأثیر غنی‌سازی متان با هیدروژن را بر ساختار شعله و آلاینده‌های حاصل از احتراق در دیگ بخار فشار داخلی با سیستم مشعل بدون پیش مخلوط بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن هیدروژن مانع انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق در دیگ بخار می‌شود و همچنین به دلیل افزایش میزان انتشار NO_x دمای شعله احتراق را افزایش می‌دهد [17].

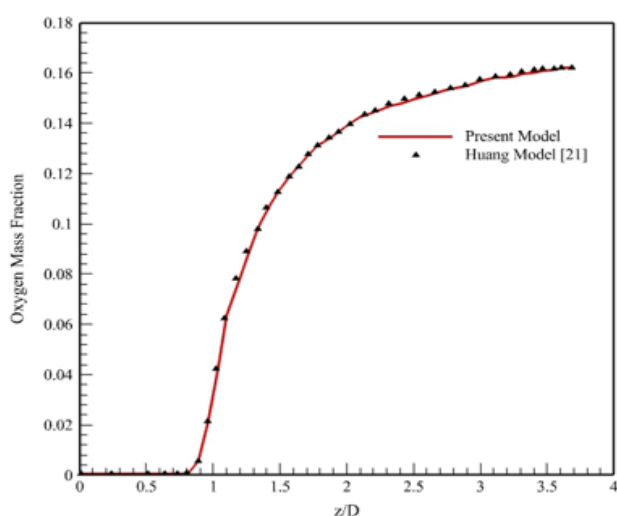
یافتن نسبت مناسب هیدروژن به گاز طبیعی یکی از چالش‌های پیش رو می‌باشد. هدف از این پژوهش شبیه‌سازی احتراق مخلوط با نسبت‌های معین گاز طبیعی و هیدروژن و بررسی ویژگی‌های احتراق مانند ارزش حرارتی، دمای احتراق، طول شعله و میزان آلاینده‌گی برای تزریق هیدروژن موجود در

فلوینت انجام شده است. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی تأثیر افزایش هیدروژن بر عملکرد سوخت با استفاده از مدل‌سازی عددی است. بنابراین در فاز شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن سوخت به صورت ترکیبی از متان و هیدروژن با درصدهای صفر، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ برای هیدروژن در ورودی، واکنش احتراق مدل‌سازی شده است.

نتایج

صحت‌سنجی

به منظور اطمینان از شبیه‌سازی عددی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج موجود در مراجع مقایسه شده است. به این منظور، تغییرات کسر جرمی اکسیژن بر حسب طول بی‌بعد شده محفظه احتراق در مطالعه حاضر و مرجع [21]، مطابق شکل (۲) مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل، تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل حاضر و نتایج مرجع [21] وجود دارد.



شکل ۲ مقایسه تغییرات کسر جرمی اکسیژن بر حسب طول بی‌بعد روی محور تقارن در مرجع [21] و مدل حاضر

در مرجع [21] طول و قطر کلی محفظه به همراه طول نازل سوخت ثابت بوده است، در حالی که قطر و سرعت ورودی سوخت به داخل محفظه متغیر است. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی و اعتبارسنجی برای حالتی که قطر و سرعت ورودی سوخت به ترتیب برابر ۴ میلی‌متر و ۱۱۷ متر بر ثانیه می‌باشد، انجام شده است. در این مطالعه مدل‌سازی احتراق برای چهار حالت مختلف انجام شده است. ابتدا احتراق هیدروژن و هوا،

تحلیل محفظه احتراق شامل جریان سیال به صورت دوبعدی، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه واکنش‌های شیمیایی، به کمک مدل‌سازی عددی جریان است. از روش حجم محدود که دارای کاربرد بیشتری به خصوص در مدل‌سازی جریان‌های تراکم‌ناپذیر است، استفاده می‌شود [19,20].

به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، هندسه به صورت متقارن و دوبعدی شبیه‌سازی شده است. شرایط مرزی در شکل (۱) ارائه شده است. شرایط مرزی متغیرهای جریان بر مرزهای مدل انتخابی، اعمال می‌شوند. شرایط مرزی اعمال شده در ورودی، مقدار معین سوخت و اکسیژن به داخل محفظه است که از قسمت ورودی تزریق می‌شود. مقادیر شرایط مرزی طبق مرجع [21] است. شرط مرزی بخش ورودی سوخت، دبی مشخص با مقدار ۱/۱۱ گرم بر ثانیه است. دما ۲۹۳ کلوین و نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی هیدروژن برابر ۰/۳۸، کربن مونواکسید برابر ۰/۴۸، نیتروژن برابر ۰/۱۴ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی در بخش ورودی اکسید کننده نیز از نوع دبی ورودی مشخص به میزان ۱۵/۷۴ گرم بر ثانیه و دما ۸۴۱ کلوین است. همچنین نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی اکسیژن برابر ۰/۱۶۹، آب برابر ۰/۰۲۸، کربن دی اکسید برابر ۰/۰۳۶ و نیتروژن برابر ۰/۷۶۷ تنظیم شده است. روی دیواره‌های محفظه اختلاط شرط عدم لغزش اعمال و دیواره‌ها به صورت عایق در نظر گرفته شده است. شرط تقارن در خط مرکزی و شرایط فشار خروجی مشخص در خروجی اعمال شده است. جریان محصولات احتراق از قسمت خروجی خارج می‌شود.

برای شبیه‌سازی عددی از روش گسسته‌سازی حجم محدود استفاده شده است. شبکه تولیدی شامل المان چهارضلعی و سازمان یافته است و نتایج دقت بالایی دارند. استقلال نتایج از شبکه نیز بررسی شده است و با تعداد ۱۳۸۴۰۰۰ سلول، نتایج مستقل از تعداد شبکه شده‌اند.

برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم، معادلات توربولانس و گونه‌ها از مدل آپ‌ویند مرتبه دوم به منظور افزایش دقت نتایج استفاده شده است. مرتبه همگرایی همه معادلات 10^{-4} و برای معادله انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی شیمی احتراق روش جریان آرام نرخ محدود استفاده می‌شود. مکانیزم مورد استفاده به صورت ۱۹ مرحله واکنش رفت و برگشتی و ۹ گونه است. شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار

مشخصات برای سرعت‌های ورودی و ابعاد محفظه، متان به طور کامل مصرف نمی‌شود و بخشی از آن در خروجی وجود دارد؛ در حالی که در احتراق هیدروژن - هوا، هیدروژن به طور کامل مصرف می‌شود و مقدار آن در خروجی برابر صفر است.

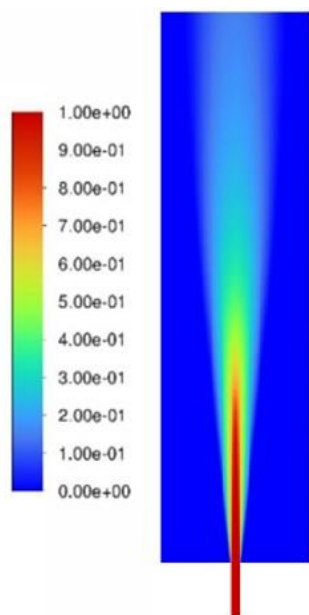
مطابق شکل (۵)، در احتراق هیدروژن - هوا، در قسمت‌های با طیف رنگی قرمز اکسیژن وجود داشته و در قسمت‌های آبی رنگ درصد اکسیژن درون محفظه کم شده است. در ابتدای محفظه که ورودی سوخت است، اکسیژن وجود ندارد. مطابق شکل (۶)، در احتراق متان - هوا، اکسیژن به طور کامل مصرف نشده است و بخشی از آن در خروجی وجود دارد و ناشی از عدم مصرف متان با توجه به مشخصات و ابعاد محفظه است.

کانتور دما می‌تواند معیار نشان دهنده شکل شعله درون محفظه احتراق باشد. مطابق شکل (۷)، هر چه مقدار دما بالاتر باشد دمای شعله بالاتر است. دمای ورودی سوخت ۲۹۳ کلوین است و در خروجی به ۲۹۷۰ کلوین می‌رسد. همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، دمای شعله در خروجی ۲۴۵۰ کلوین است که در مقایسه با احتراق هیدروژن هوا که دمای شعله ۲۹۷۰ کلوین بود، مقدار کمتری است؛ در حالی که با توجه به شرایط مرزی تعریف شده دمای هر دو در ورودی ۲۹۳ کلوین و یکسان است که ناشی از کامل مصرف نشدن متان و وجود آن در خروجی است. هر چه مقدار دما بالاتر باشد دمای شعله بالاتر است و احتراق بهتر شکل می‌گیرد.

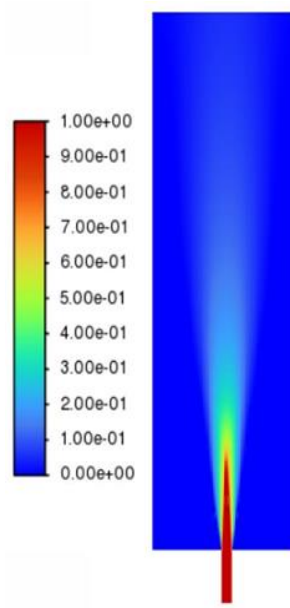
سپس احتراق متان و هوا، مقایسه بین آن‌ها و در ادامه احتراق متان، هیدروژن و هوا انجام شده است. در فاز بعدی شبیه‌سازی به منظور بررسی تأثیر اضافه کردن هیدروژن بر عملکرد احتراق، با در نظر گرفتن سوخت به نِسبت ترکیبی از متان، هیدروژن با درصد‌های مختلف برای هیدروژن در ورودی، واکنش احتراق مدل‌سازی شده است. در این وضعیت پارامترهای مؤثر از قبیل مقدار و توزیع کربن‌دی‌اکسید، آب، دما، NOx و میزان انتقال حرارت در محفظه ارائه شده است.

مقایسه احتراق هیدروژن - هوا با احتراق متان - هوا

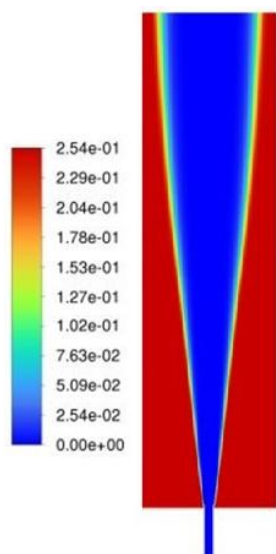
در شکل‌های (۳) و (۴) کانتورهای کسر جرمی هیدروژن داخل محفظه برای احتراق هیدروژن - هوا و متان - هوا نمایش داده شده است. در بخش ورودی سوخت، برای احتراق هیدروژن - هوا نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی هیدروژن برابر ۱، اکسیژن و آب صفر است. در این وضعیت؛ در بخش ورودی اکسید کننده نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی اکسیژن برابر ۰/۲۳، نیتروژن برابر ۰/۷۷، هیدروژن و آب برابر صفر است. در خروجی فرض شده که به هوا تخلیه می‌شود و گونه کسر جرمی اکسیژن ۰/۲۳ است. مطابق شکل (۳)، در ورودی محفظه احتراق کسر جرمی هیدروژن یک است و هر قدر داخل محفظه پیشروی کند مقدار آن کم شده و در خروجی هیدروژن کامل مصرف شده و احتراق کامل شکل گرفته است. مطابق شکل (۴)، در احتراق متان - هوا با توجه به



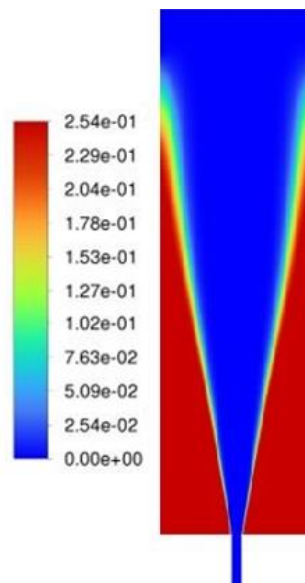
شکل ۴ کسر جرمی متان در احتراق متان - هوا



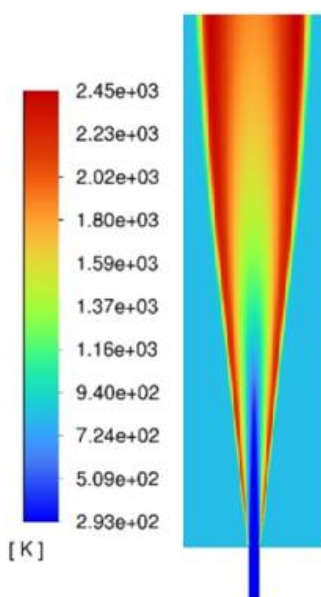
شکل ۳ کسر جرمی هیدروژن در احتراق هیدروژن - هوا



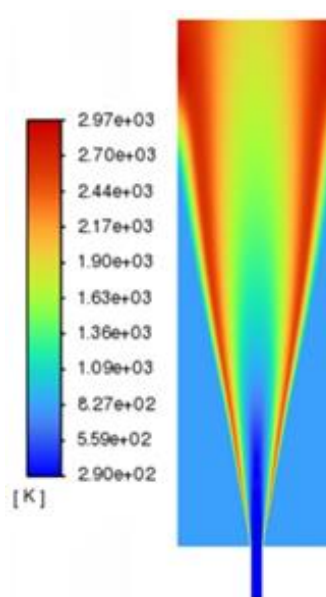
شکل ۶ کسر جرمی اکسیژن در احتراق متان - هوا



شکل ۵ کسر جرمی اکسیژن در احتراق هیدروژن - هوا



شکل ۸ تغییرات دما برای احتراق متان - هوا



شکل ۷ تغییرات دما برای احتراق هیدروژن - هوا

می‌شوند. به این ترتیب شش گونه شرکت کننده در واکنش شامل متان، هیدروژن، کربن دی‌اکسید، اکسیژن، آب و نیتروژن هستند. در بخش ورودی سوخت، نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی هیدروژن برابر ۰/۱، متان برابر ۰/۹، اکسیژن، آب و نیتروژن برابر صفر است.

در فاز بعدی شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن سوخت به صورت ترکیبی از متان و هیدروژن و واکنش‌های تعریف شده در قسمت قبل، با درصدهای مختلف برای هیدروژن در ورودی، واکنش

مدل‌سازی احتراق متان - هیدروژن - هوا و تأثیر افزودن هیدروژن به متان

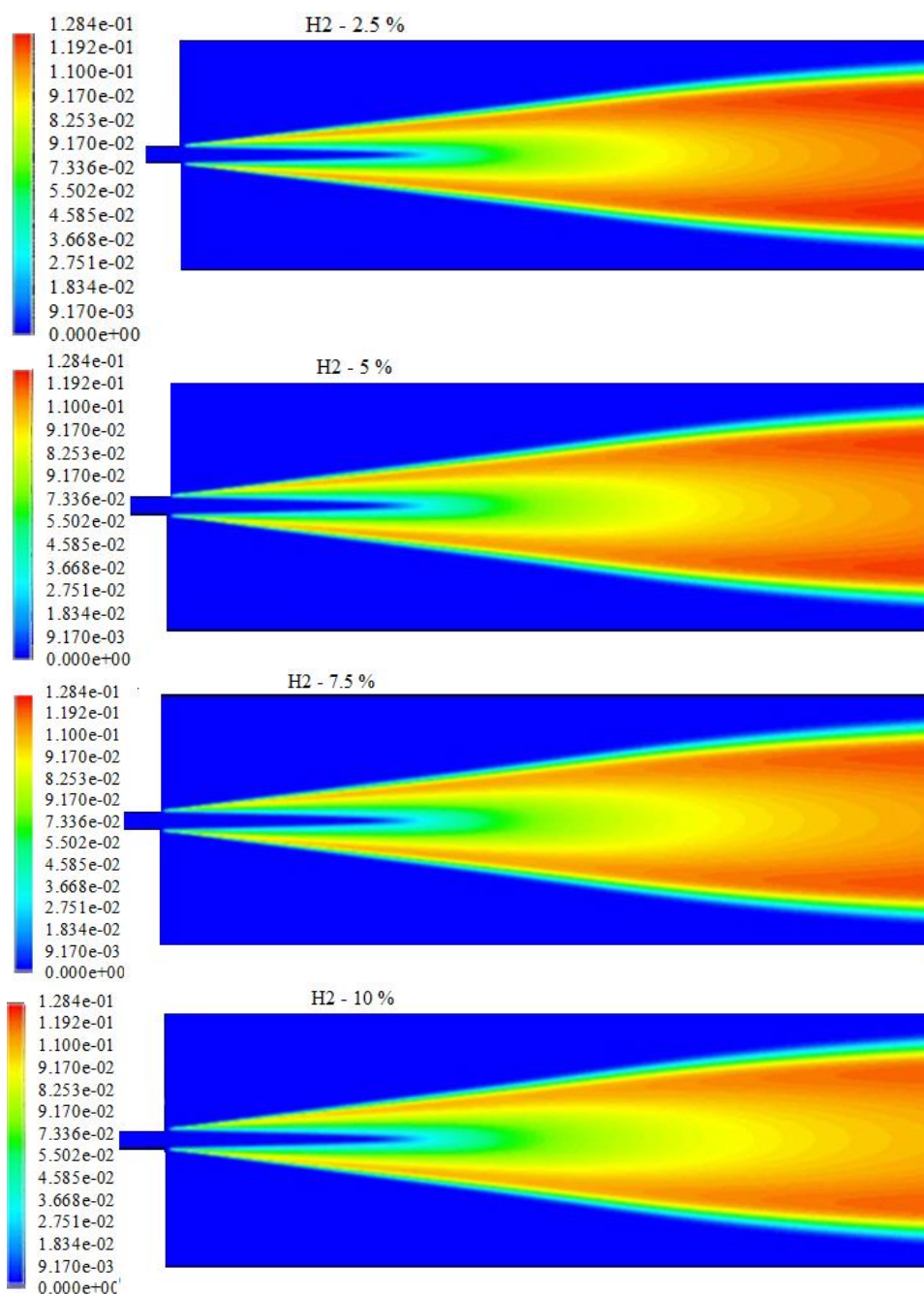
به منظور مقایسه احتراق متان - هیدروژن و متان - هوا، به احتراق متان با هوا پرداخته می‌شود. در این بخش متان، اکسیژن، دی-اکسیدکربن، آب و نیتروژن پنج گونه شرکت کننده در واکنش هستند.

در این حالت چون با ترکیبی از دو واکنش مواجه هستیم، به گونه‌های شرکت کننده در واکنش، متان و دی‌اکسیدکربن اضافه

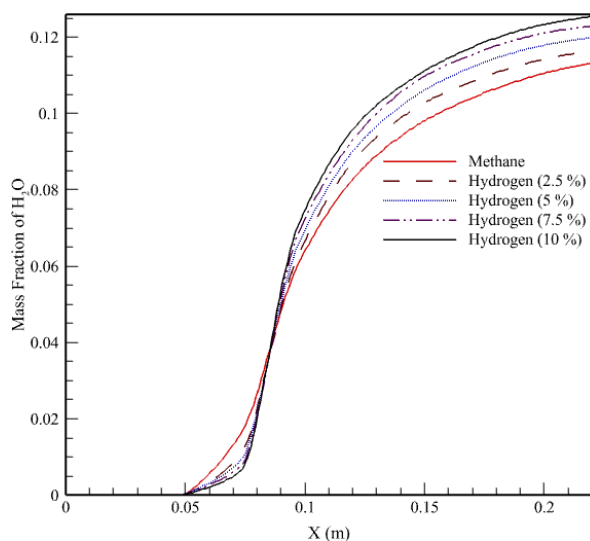
شده است. در نواحی با طیف رنگی قرمز مقدار کمیت بیشتر است و با افزایش درصد هیدروژن ورودی مقدار کربن دی اکسید کمتر شده است. همچنین نشان می دهد که افزایش هیدروژن علاوه بر پایدار کردن شعله موجب کاهش روند پیشروی فرایند احتراق در مراحل ابتدایی و میانی خواهد شد. با توجه به اثر اختلالی افزودن هیدروژن بر روند ابتدایی احتراق، موجب کاهش کسر مولی مونواکسید کربن و کربن دی اکسید در مراحل بعدی می شود.

احتراق مدل سازی شده است. هدف اصلی بررسی تأثیر اضافه کردن هیدروژن بر عملکرد سوخت است؛ که نمونه های مورد بررسی به ترتیب متان خالص، ۲/۵ درصد هیدروژن و ۹۷/۵ درصد متان، ۵ درصد هیدروژن و ۹۵ درصد متان، ۷/۵ درصد هیدروژن و ۹۲/۵ درصد متان و در پایان ۱۰ درصد هیدروژن و ۹۰ درصد متان می باشد.

در شکل (۹) تغییرات کسر جرمی کربن دی اکسید برای درصدهای مختلف هیدروژن در ورودی سوخت نمایش داده

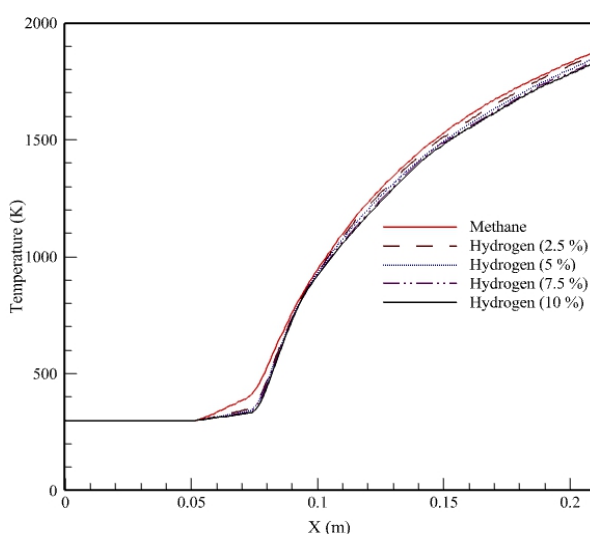


شکل ۹ تغییرات کسر جرمی کربن دی اکسید برای درصدهای مختلف هیدروژن



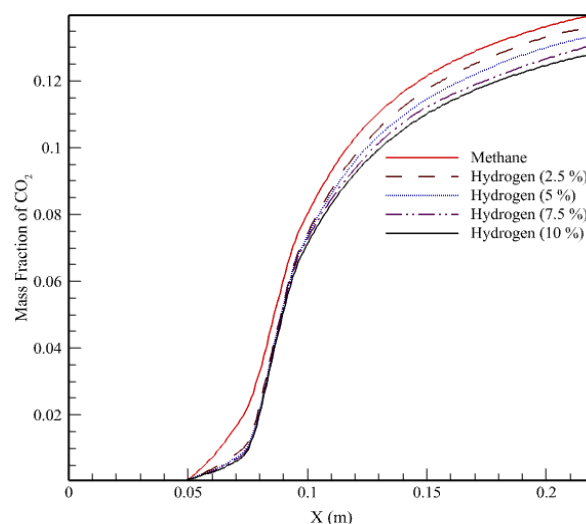
شکل ۱۱ تغییرات کسر جرمی آب برای درصد‌های مختلف هیدروژن

تغییرات دما در شکل (۱۲) برای درصد‌های مختلف هیدروژن، در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه، ترسیم شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار دما در محفظه افزایش داشته است. با افزایش درصد هیدروژن از حالت متان خالص تا حالتی که میزان هیدروژن ۷/۵ درصد است، تغییرات دما خیلی محسوس نیست اما با افزایش مقدار هیدروژن ورودی تا ده درصد نسبت به حالت‌های قبلی تغییرات دما محسوس‌تر بوده و مقدار دمای شعله افزایش یافته است.



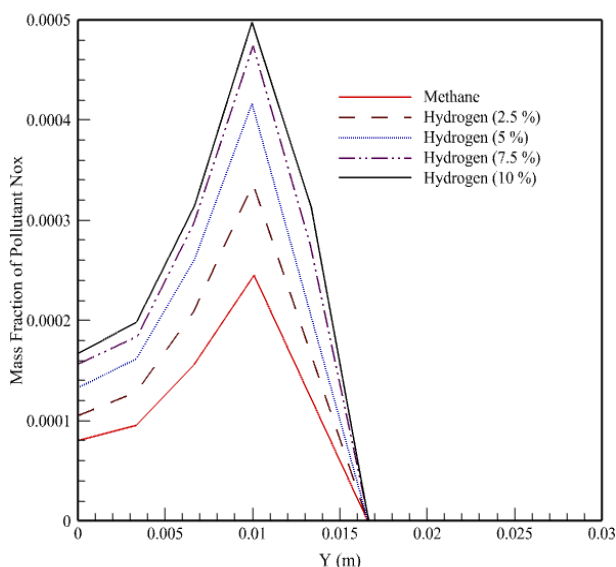
شکل ۱۲ تغییرات دما در طول خط محوری برای درصد‌های مختلف هیدروژن

در شکل (۱۰) نمودار مقادیر مربوط به کسر جرمی کربن‌دی‌اکسید برای درصد‌های مختلف هیدروژن در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار کربن‌دی‌اکسید تولید شده کاهش یافته است. در واقع افزایش درصد هیدروژن باعث پایین آمدن نرخ کلی کربن شده و در نتیجه میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید کاهش یافته است. در ناحیه ورودی نازل تغییرات نداشته و از ۰/۱ متر به بعد مقادیر اختلاف بیشتری با هم پیدا می‌کنند. هر چه مقدار درصد هیدروژن در ورودی زیادتر شده تغییرات کاهش کربن‌دی‌اکسید هم کمتر شده است.

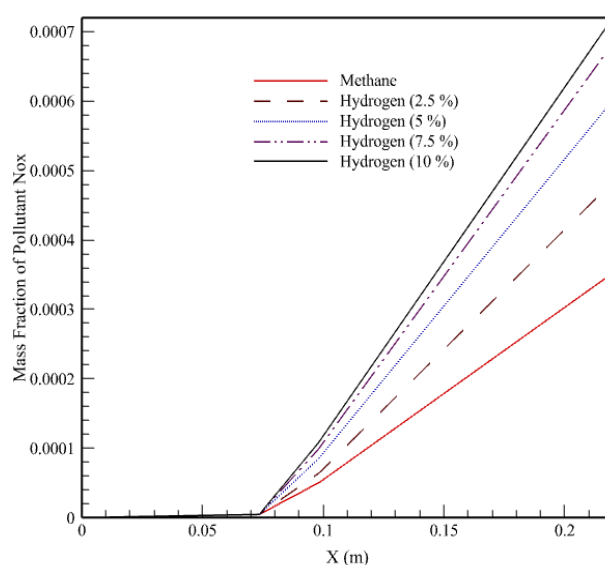


شکل ۱۰ تغییرات کسر جرمی کربن‌دی‌اکسید در طول خط محوری برای درصد‌های مختلف هیدروژن

نمودار مقادیر مربوط به تغییرات کسر جرمی آب برای درصد‌های مختلف هیدروژن در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه ترسیم شده است. مطابق شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار آب تولید شده افزایش یافته است. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود از ابتدا تا ۰/۰۵ یعنی ورودی محفظه احتراق میزان تغییرات صفر است و از ۰/۰۵ تا ۰/۱ تغییرات کمتر است ولی از ۰/۱ به بعد مقادیر اختلاف بیشتری با هم پیدا می‌کنند و با افزایش مقدار درصد هیدروژن در ورودی تغییرات افزایش آب تولید شده تقریباً روند ثابتی دارد.



شکل ۱۴ تغییرات کسر جرمی در طول خط شعاعی برای درصدهای مختلف هیدروژن



شکل ۱۳ تغییرات کسر جرمی NOx در طول خط محوری برای درصدهای مختلف هیدروژن

معین گاز طبیعی و هیدروژن برای یافتن نسبت بهینه هیدروژن به گاز طبیعی و بررسی ویژگی‌های احتراق مانند ارزش حرارتی، دمای احتراق، طول شعله و میزان آلاینده‌گی برای تزریق هیدروژن موجود در صنایع به شبکه گاز شهری می‌باشد. به این منظور، معادلات جرم، مومنتوم، انرژی و ذرات در محفظه احتراق به کمک نرم‌افزار فلوینت و با در نظر گرفتن سوخت ترکیبی از متان و درصدهای مختلف هیدروژن در ورودی، واکنش احتراق مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد:

۱. با افزودن هیدروژن میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید به دلیل کاهش نرخ کلی کربن کاهش یافته است.
۲. با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار آب تولید شده افزایش یافته است.
۳. با افزودن هیدروژن، مقدار NOx تولید شده در محفظه افزایش داشته است.
۴. افزودن هیدروژن بر ساختار شعله نیز تأثیرگذار است و باعث کشیدگی شعله شده است.
۵. در حالت ۲/۵ درصد هیدروژن در ورودی، میزان گرمای واکنش نسبت به متان خالص کاهش پیدا کرده است؛ اما به تدریج و با افزایش درصد هیدروژن، گرمای واکنش افزایش یافته است.

مقادیر مربوط به کسر جرمی NOx در شکل (۱۳) برای درصدهای مختلف هیدروژن، در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه، ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار NOx تولید شده در محفظه افزایش داشته است. مطابق نمودار از زمانی که شعله شکل گرفته و احتراق انجام شده است NOx تولید شده است و هر قدر میزان هیدروژن ورودی افزایش یافته است تغییرات افزایش NOx تولید شده، کمتر شده است.

نمودار مقادیر مربوط به کسر جرمی NOx در شکل (۱۴) برای درصدهای مختلف هیدروژن، در طول خط شعاعی تعریف شده داخل محفظه، ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار NOx تولید شده در محفظه افزایش داشته است. افزایش انتشار NOx به این علت است که با افزایش هیدروژن دما زیاد شده و اصلی‌ترین عامل در تشکیل NOx دما است، تمامی عواملی که سبب کاهش حداکثر دمای شعله و در نتیجه کاهش دمای محفظه احتراق می‌شود، عواملی مؤثر در کاهش انتشار NOx هستند.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش شبیه‌سازی احتراق مخلوط با نسبت‌های

تقدیر و تشکر

واژه نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
تزریق هیدروژن	injection hydrogen	
گاز طبیعی	natural gas	
محفظه احتراق	combustion chamber	سوختارگاه، سوختگاه احتراق
کسر جرمی	mass fraction	
طول شعله	flame length	
پایداری شعله	flame sustainability	
پارامترهای موثر	effective parameters	
میزان آلاینده‌گی	pollution level	

مراجع

- [1] R. Mahadevan and J. Asafu-Adjaye, "Energy consumption, economic growth and prices: A reassessment using panel VECM for developed and developing countries," *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2481-2490, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.08.019>
- [2] O. Jahanian and S. Jazayeri, "A Comprehensive study on natural gas HCCI engine response to different initial conditions via a thermo-kinetic engine model," *Oil & Gas Science and Technology*, 2009. <https://doi.org/10.2516/OGST%2F2011133>
- [3] M. Poor Ebrahimi and N. Shayegan, "Study of the role of adding hydrogen to natural gas on the performance parameters," *Internal combustion engines*, 7th Student Conference on Mechanical Engineering, 2013. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/236596>
- [4] A. Shahnazari, "Prioritizing energy recovery technologies from municipal solid waste (case study of Mashhad city)," *Environmental Research and Technology*, vol. 5, no. 7, 2019.
- [5] X. Zhu et al., "Effect of CO₂/CH₄ ratio on biogas reforming with added O₂ through an unique spark-shade plasma," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 25, pp. 13902-13908, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.040>
- [6] A. C. C. Chang and K.-Y. Lee, "Biogas reforming by the honeycomb reactor for hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 7, pp. 4358-4365, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.018>

- [7] K. Collier et al., "Untreated Exhaust Emissions of a Hydrogen-Enriched CNG Production Engine Conversion," *SAE Technical Paper*, 1996. <https://doi.org/10.4271/960858>
- [8] F. Ma et al., "Combustion and emission characteristics of a port-injection HCNG engine under various ignition timings," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 816-822, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.09.047>
- [9] K. Zhao et al., "Effects of hydrogen addition on methane combustion," *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 11, pp. 1142-1147, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.005>
- [10] N. Donohoe et al., "Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures," *Combustion and Flame*, vol. 161, pp. 1432-1443, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.12.005>
- [11] Z. Dulger, "Numerical modeling of heat release and flame propagation for methane-fueled internal combustion engines with hydrogen addition," Doctoral dissertation, University of Miami, 1991.
- [12] R. Kamali and A. R. Binesh, "A CFD study of dimensional scaling effect on the combustion of hydrogen-air mixture in micro-scale chambers with same shape aspect," *Proceedings of the 6th WSEAS international conference on System science and simulation in engineering*, 2007, pp. 231-236.
- [13] H. Burbano et al., "Effects of hydrogen addition to methane on the flame structure and CO emissions in atmospheric burners," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 13, pp. 3410-3415, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.04.020>
- [14] S. El-Ghafour et al., "Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 2556-2565, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.049>
- [15] J. Wang et al., "Effect of hydrogen addition on early flame growth of lean burn natural gas-air mixtures," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 13, pp. 7246-7252, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.004>
- [16] K. V. Shivaprasad et al., "Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine," *Procedia Technology*, vol. 14, pp. 141-148, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.019>
- [17] M. K. Büyükakın and S. Öztuna, "Numerical investigation on hydrogen-enriched methane combustion in a domestic back-pressure boiler and nonpremixed burner system from flame structure and pollutants aspect," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 60, pp. 35246-35256, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.117>
- [18] V. S. Nuotio-Antar, "Equations governing fluid flow and heat transfer," in *Fundamentals of Low Gravity Fluid Dynamics and Heat Transfer*, CRC Press, 2019, pp. 19-30.
- [19] J. R. Howell and R. Siegel, "Thermal radiation heat transfer. Volume 3 Radiation transfer with absorbing," in *Emitting, and Scattering Media*, 1971.
- [20] A. Dolai et al., "Ravikrishna, Investigation of syngas combustion in a novel ultra-low emission 20-kW two-stage combustor," *Fuel*, vol. 340, p. 127497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127497>

- [21] M.-m. Huang et al., "Effect of fuel injection velocity on Mild combustion of syngas in axially-staged combustor," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 485-492, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.033>



Analysis of Magneto Hydrodynamic Flow with Wall Injection Using Fractional Derivative

Research Article

Mohammad Tolami¹, Akbar Nazari-Golshan², Seyed Salman Nourazar³ 

 [10.22067/jacsm.2025.91367.1309](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.91367.1309)

Abstract-- The aim of this study is to investigate the injection of mutable velocity flow from the walls into the magneto hydrodynamic flow. A dominant term of tangential velocity is considered and the remaining terms are ignored and the first order derivative with respect to r is replaced by a fractional derivative. The equation is transformed into a nonlinear ordinary differential equation with fractional derivative using the similarity transformation method and solved using semi-analytical and numerical methods. The results show that increasing Re causes a significant increase in the values of the dimensionless velocity and radial velocity in the center of the channel, while a slight decrease is observed in the regions closer to the walls, but in the regions very close to the walls it is almost unchanged. Increasing Ha leads to a significant decrease in the maximum velocity. the velocity vector lines at fixed radial positions become more uniform. Increasing the Ha also leads to the appearance of two smaller maximum velocities in the vicinity of the channel walls.

Keywords: Terms-- Convergent and Divergent Channel, Fractional Derivative, Injection, Jeffrey-Hamel Flow, Magneto Hydrodynamic Flow, Semi-Analytical Method

1. Introduction

The effects of injection and suction are substantial on flow characteristics, including boundary layer behavior, flow separation, stability management, drag reduction, and processes of heat and mass transfer. It is well-established that suction plays a vital role in sustaining boundary layer stability. On the other hand, injection may promote the rapid development of instabilities. Both strategies are effective in curtailing flow separation and drag. Injection can be utilized to enhance temperature and, conversely, can act as a thermal insulator by forming an insulating layer along the walls. In the realm of fluid mechanics, fractional derivatives serve as an effective means for the examination of magnetohydrodynamic flows and their related chemical reactions. This instrument is crucial for investigating phenomena including free convection, the influence of thermal radiation, the dynamics of porous media modeling, nonlocal and memory effects in

turbulence, boundary layer phenomena, and nanoscale heat transfer, which enhances prediction accuracy [1].

The initial analytical solutions for flow in convergent-divergent channels were provided by researchers Jeffery and Hamel [2], [3]. The study of Jeffrey-Hamel flow is significant for understanding flow instabilities, mass transfer processes, and injection effects. The objective of this research is to conduct an analytical examination of the influence of fractional derivative and magnetic fields and variable velocity flow injection from the channel wall on the velocity distribution within a diverging channel. The contributions of this study include: the application of variable velocity for the injected flow, the transformation of integer derivatives into fractional derivatives within the governing equations, an exploration of the impact of varying the order of the fractional derivative, the utilization of similarity transformations to convert partial differential equations into ordinary differential equations, and the implementation of a relatively obscure semi-analytical method for flow analysis.

2. Governing relations

The divergent channel in polar coordinates features an opening angle of $\alpha = 0.7 \text{ rad}$ and a radius that ranges from $r = 1$ to $r = 4$. The primary flow enters radially, while the secondary flow is introduced from the channel walls. The fundamental assumptions of this analysis are outlined as follows:

1. The flow is characterized as two-dimensional, steady, and incompressible, with the effects of gravity being disregarded.
2. The radial velocity v_r is deemed more significant than the tangential velocity v_θ . In the momentum equations, the prevailing term v_θ is taken into account, while the other terms are omitted. The variability of the injection velocity throughout the channel is acknowledged; this contrasts with earlier studies that presumed it to be constant.

* Manuscript received December 28, 2024, Revised March 17, 2025, Accepted July 12, 2025.

¹ Instructor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

² Corresponding author. Associate Professor, Physics Department, Shahed University, Tehran, Iran,
Email: anazariGolshan@yahoo.com.

³ Professor, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

By implementing these assumptions and removing the pressure variable, the momentum equations in magnetohydrodynamic flow are reformulated into a higher-order partial differential equation:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial v_r}{\partial \theta} \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_r \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} \right. \\ & \left. - \frac{\partial v_r}{\partial r} v_\theta - v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) = v \left(\frac{\partial^3 v_r}{\partial r^2 \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 v_r}{\partial \theta^3} + \right. \\ & \left. \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial \theta} \right) - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (1)$$

where v represents the kinematic viscosity, ρ denotes the density, σ signifies the electrical conductivity, and B_0 indicates the strength of the magnetic field. By substituting the first-order derivative concerning r with the Caputo fractional derivative of order β (${}_0D_r^\beta$) in the momentum equation and applying the subsequent dimensionless similarity transformations:

$$\eta = \frac{\theta}{\alpha}, \quad \psi = r^2 v_w F(\eta) \quad (2)$$

In this context, η represents the dimensionless angular position, F denotes the dimensionless function associated with the momentum equation, v_w signifies a constant value, and ψ is the stream function, for which we express:

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = \frac{r}{\alpha} v_w F', \quad v_\theta = -{}_0D_r^\beta \psi = -v_w F {}_0D_r^\beta r^2 \quad (3)$$

Using the Caputo fractional derivative relation of the power function [4]:

$${}_0D_r^\gamma r^a = \frac{\Gamma(a+1)}{\Gamma(a-\gamma+1)} r^{a-\gamma} \quad (4)$$

And by applying the dimensionless parameters of the Reynolds number and the Hartmann number, which are

defined as $Re = \frac{r^2 v_w}{v}$ and $Ha = r B_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}$, respectively, the following final relationship is obtained:

$$\begin{aligned} & F^{(IV)} + 2\alpha Re F'' F' - \\ & \frac{\Gamma(2)\alpha}{\Gamma(2-\beta)} \left(2 - \frac{2}{(2-\beta)} \right) Re r^{1-\beta} F'' F' + \\ & (\alpha^2 \Gamma(2) r^{-\beta+1} \left(\frac{r^{1-\beta}}{\Gamma(2-2\beta)} - \frac{1}{\Gamma(2-\beta)} \right) + \\ & \alpha^2 (1 - Ha^2)) F'' - \frac{4\alpha^3 \Gamma(2)}{\Gamma(2-\beta)} Re r^{1-\beta} F F' = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

The secondary flow is introduced at an angle relative to the channel walls and in the opposite direction of the

primary flow. The boundary conditions are articulated as follows:

$$\begin{cases} \eta = 0 \rightarrow F = -\frac{v_\theta}{2rv_w} = -1, \quad F' = -1 \\ \eta = 1 \rightarrow F = -\frac{v_\theta}{2rv_w} = 1, \quad F' = -1 \end{cases} \quad (6)$$

To make the radial velocity non-dimensional, the tangential velocity at the initial point of the channel walls is used as a reference value:

$$\hat{v}_r = \frac{v_r}{V_{\theta w}|_{r=1}} \quad (7)$$

3. Resolving of Equation

The adaptive fraction technique is employed to address ordinary differential equation. Initially, the linear component of the differential equation is resolved, followed by substituting the variables with polynomial fractional functions [1], [5]. Numerical solutions are obtained using Matlab software.

4. Validation

The presence of correlation and consistency between the numerical and analytical solutions substantiates the credibility of the current analytical approach. In Figure 1, the ratio of the flow velocity within the pipe to the velocity at the center of the pipe is illustrated using the experimental findings of Takeuchi et al. alongside the numerical analysis results from Goa et al. across various Hartmann numbers [6]. It is noted that as the Hartmann number increases, the velocity profile tends to flatten, with the exception of regions close to the pipe walls. This pattern mirrors the trend depicted in Figure 5 of the current study concerning the radial velocity of the flow within the diverging channel. Considering the strong correlation between the analytical and numerical solutions presented in this study, as well as the resemblance of the behavior observed for the radial velocity profile in the diverging channel to the experimental and numerical results of the velocity profile within the pipe in [6], the validity of the current analysis is affirmed.

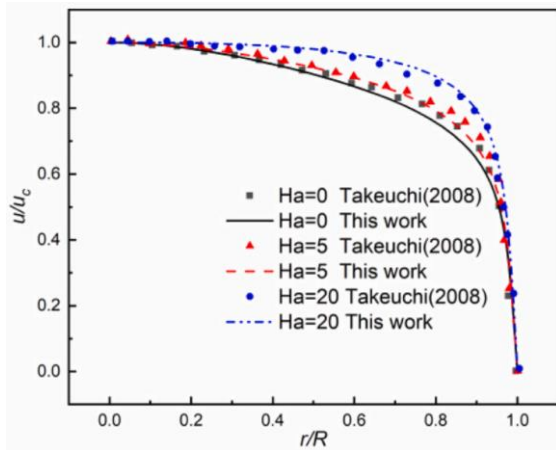


Fig. 1. Experimental results of Takeuchi et al. and numerical results of Guo et al. for the flow velocity inside the tube to the tube center velocity for different Hartmann numbers [6]

5. RESULTS

Figure 2 illustrates that as the Reynolds number rises, there is a notable increase in $\hat{v}_r$ at the center of the channel, whereas a minor decrease is noted in areas closer to the walls, with the regions adjacent to the walls remaining nearly unchanged. Figure 3 indicates that an increase in β produces effects on the variable $\hat{v}_r$ that are similar to those observed with an increase in the Reynolds number. Generally, the effect of increasing the Hartmann number is contrary to that of increasing the Reynolds number. As indicated in (3), the radial velocity is associated with the derivative of function F . As the Hartmann number increases, Figure 4 shows that curve F tends to become linear, leading to the observation in Figure 5 of a nearly constant dimensionless radial velocity, except in the vicinity of the walls. This figure also reveals that an increase in the Hartmann number enhances $\hat{v}_r$ near the walls while concurrently diminishing this value at the center of the channel. The reduction in velocity at the center of the channel with an increasing Hartmann number is attributed to the Lorentz force, which impedes fluid motion, particularly in the channel's center [7]. The increase in velocity near the walls can be explained by the principle of mass conservation. Overall, the increase in β exerts a similar influence on flow behavior as the increase in the Reynolds number. From a practical perspective, this finding is significant; rather than altering β , which poses challenges, one can anticipate the effects of varying β by adjusting the Reynolds number.

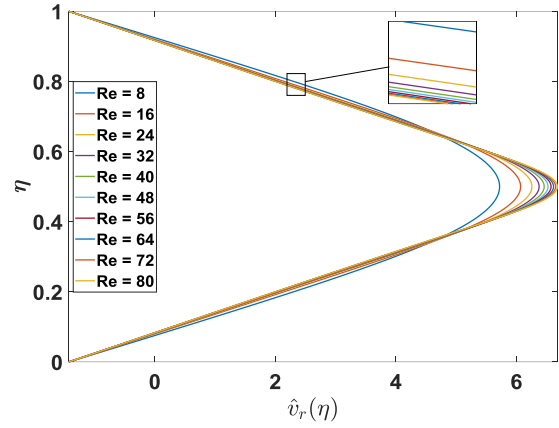


Fig. 2. Changes in the variable $\hat{v}_r$ depending on the parameter Re under the condition $Ha=1, \beta=1$

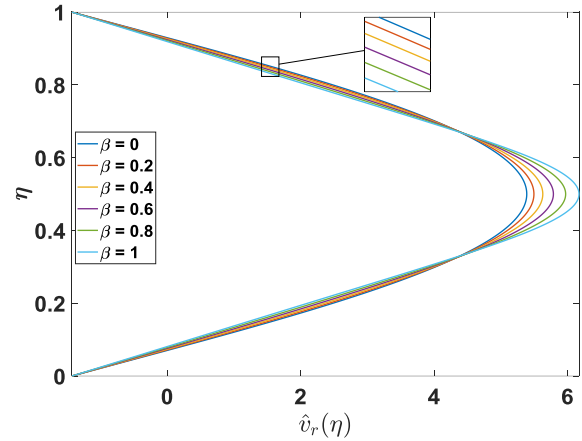


Fig. 3. Variations of the variable $\hat{v}_r$ in terms of the parameter β under the condition $Re=20, Ha=1$

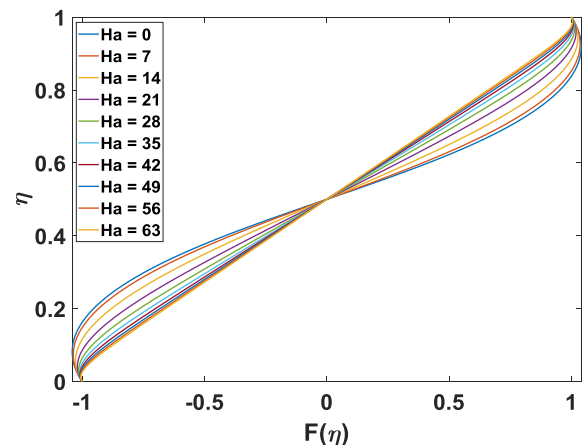


Fig. 4. Changes in the variable F according to the parameter Ha in the condition $Re=20, \beta=1$

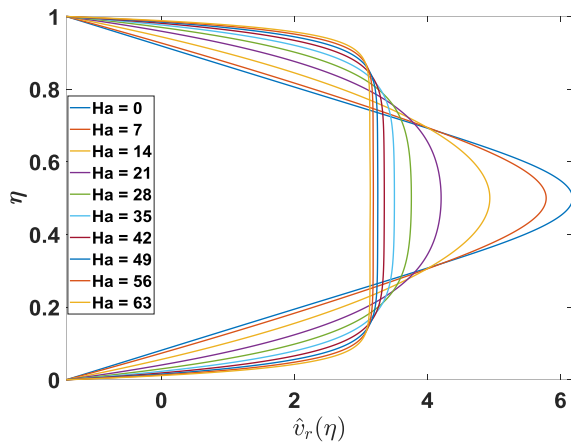


Fig. 5. Changes in the variable $\hat{v}_r$ depending on the parameter Ha under the condition $Re=20, \beta=1$

6. Conclusion

With an increase in the Hartmann number, the radial velocity profile within the diverging channel tends to flatten, except in areas near the walls. This observation aligns with both experimental and numerical findings regarding the velocity profile within pipes as reported in other researches. These instances highlight the efficacy of the current analytical approach in assessing flow characteristics. The principal conclusions of this study can be outlined as follows:

- An increase in the Reynolds number results in a notable rise in the dimensionless radial velocity at the channel's center, while a minor reduction is noted in areas closer to the walls; however, regions very near the walls remain largely unaffected.
- Elevating the order of the fractional derivative in the momentum equation produces effects similar to those observed with an increase in the Reynolds number on the flow dynamics.
- A rise in the Hartmann number typically induces a behavior that is contrary to that observed with an increase in the Reynolds number. Specifically, an increase in the Hartmann number results in a marked decrease in the maximum radial velocity at the center of the channel and contributes to the flattening of the radial velocity profile in this area.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the contributions of Y. Farjami and M. R. Najafi for assist in performing and programming the analytical solution method.

References

- [1] M. Tolami, A. Nazari-Golshan, and S. S. Nourazar, "Impact of fractional derivative on the distribution of concentration injected from the walls in diverging channel," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 164, pp. 108932, 2025/05/01, 2025. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108932.

- [2] G. B. Jeffery, "L. The two-dimensional steady motion of a viscous fluid," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 29, no. 172, pp. 455-465, 1915/04/01, 1915. doi: 10.1080/14786440408635327.
- [3] G. Hamel, "Spiralförmige Bewegungen zäher Flüssigkeiten," *Mathematische Annalen*, vol. 84, no. 1, pp. 148-148, 1921/03/01, 1921. doi: 10.1007/BF01458700.
- [4] I. Podlubny, *Fractional Differential Equations: An Introduction to Fractional Derivatives, Fractional Differential Equations, to Methods of Their Solution and Some of Their Applications*: Academic Press, 1998. eBook ISBN: 9780080531984.
- [5] P. B. Ghaleh, A. A. Khayyat, Y. Farjami, and A. Abedian, "Approximate analytical solutions of an axially moving spacecraft appendage subjected to tip mass," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 228, no. 9, pp. 1487-1497, 2014/07/01, 2013. doi: 10.1177/0954410013494140.
- [6] J. Guo, Y. Chen, J. Hu, Z. Xu, and C. Ma, "Numerical study on the flow and heat transfer of molten salt in a horizontal pipe applied transverse magnetic field," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 192, pp. 108416, 10/01, 2023. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108416.
- [7] S. M. Živojin, D. D. Nikodijević, B. D. Blagojević, and S. R. Savić, "MHD flow and heat transfer of two immiscible fluids between moving plates," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 34, no. 3-4, pp. 351-372, 2010. doi: 10.1139/tcsme-2010-0021.



تحلیل جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی همراه تزریق جریان از دیوارها با استفاده از مشتق کسری*

مقاله پژوهشی

سید سلمان نورآذر^(۳)اکبر نظری گلشن^(۲)محمد تولمی^(۱)

10.22067/jacsm.2025.91367.1309

چکیده هدف این مطالعه بررسی تزریق جریان با سرعت تغییرپذیر از دیوارها به جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی است. در این مطالعه یک جمله غالب سرعت مماسی لحاظ گردیده و از باقی جملات صرفنظر شده است. مشتق مرتبه اول نسبت به x با مشتق کسری جایگزین گردیده است. معادله حاکم با استفاده از روش تبدیل تشابهی، به یک معادله دیفرانسیل معمولی غیر خطی با مشتق کسری تبدیل و با استفاده از روشهای نیمه تحلیلی و عددی حل شده است. نتایج حاصل بیانگر این است که افزایش عدد رینولدز باعث افزایش قابل توجهی در مقادیر سرعت بدون بعد و سرعت شعاعی بی‌بعد در مرکز کانال می‌شود در حالی که یک کاهش جزئی در نواحی نزدیک‌تر به دیوارها مشاهده می‌شود اما در نواحی خیلی نزدیک دیوارها تقریباً بدون تغییر است. افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش قابل توجه در حداکثر سرعت می‌گردد. خطوط بردار سرعت در موقعیت‌های شعاعی ثابت، بکناخت‌تر می‌گردند. افزایش عدد هارتمن همچنین منجر به ظهور دو سرعت بیشینه کوچکتر در مجاورت دیوارهای کانال می‌شود.

واژه‌های کلیدی جریان جفری-همل، کانال همگرا و واگرا، تزریق، جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی، مشتق کسری، روش نیمه تحلیلی

مقدمه

کرده‌اند. یافته‌های المالکی و همکاران [1]، گائو [2]، فریدریش و کلورک [3] و کانت و همکاران [4] نشان می‌دهد که مکش با به تاخیر انداختن گذار جریان و کاهش ناپایداری‌های ثانویه، نقش مهمی در پایداری لایه مرزی ایفا می‌کند. از سوی دیگر، تزریق به عنوان ناپایدار کننده جریان با تغییر پروفیل‌های سرعت شناخته شده است که می‌تواند رشد ناپایداری‌ها را تسهیل کند. علاوه بر این، نقش تزریق و مکش در مدیریت جدایش جریان به طور کامل بررسی شده است. مطالعات شو و همکاران [5]، دبایسی و همکاران [6]، رایلی [7] و سیله و همکاران [8] نشان می‌دهد که هر دو روش می‌توانند به طور موثر جدایش جریان را کاهش دهند؛ البته در سطوح مومنتوم پایین‌تر، مکش با افزایش جریان نزدیک دیوار عموماً عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. استفاده از

تزریق و مکش تاثیر مهمی بر ویژگی‌های جریان دارند که شامل رفتار لایه مرزی، مدیریت جدایش و پایداری جریان، کاهش پسا و همچنین بهبود فرآیندهای انتقال گرما و جرم است. مکش به عنوان یک عامل کلیدی در حفظ پایداری لایه مرزی شناخته می‌شود. تزریق می‌تواند به تسریع رشد ناپایداری‌ها کمک کند. با این حال، هر دو روش قادرند به طور مؤثری جدایش جریان را کاهش دهند و تأثیر قابل توجهی در کاهش نیروی پسا داشته باشند. همچنین، تزریق می‌تواند به منظور افزایش دما به کار رود و از سوی دیگر، با ایجاد یک لایه عایق حرارتی در امتداد دیوارها، به عنوان عایق حرارتی عمل کند. در موضوع کنترل لایه مرزی، محققان مختلفی تأثیر تزریق و مکش را بر پایداری جریان بررسی

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۰/۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۲۱ می‌باشد.

(۱) مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه شاهد، تهران.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

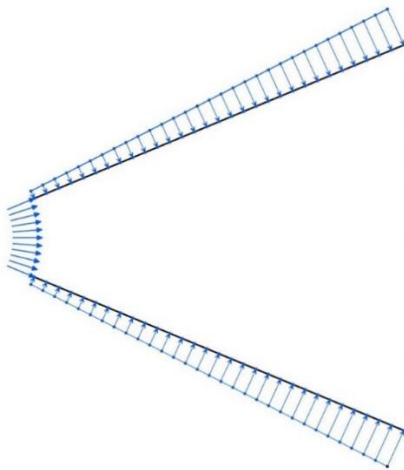
روشهای تزریق و مکش اثرات قابل توجهی در کنترل نیروی پسا دارد. همانطور که اندرسون [9] و شلیختینگ و گریستن [10] اشاره کردند مکش می تواند به طور موثری با به تاخیر انداختن جدایش لایه مرزی، نیروی پسا را کاهش دهد. در مقابل، استفاده نادرست از تزریق می تواند منجر به افزایش درگ به دلیل تسریع جدایش لایه مرزی شود؛ همانطور که توسط کوئت و چو [11] و لیسمن [12] نشان داده شده است. علاوه بر این، استراتژی های تزریق با موفقیت برای افزایش انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفته اند. کیتاگاوا و همکاران [13] شواهدی ارائه می دهند که تزریق حباب های میلی متری در نزدیکی دیوارهای گرم شده به طور قابل توجهی ضرایب انتقال حرارت را با بهبود اختلاط عمود بر دیوار افزایش می دهد. علاوه بر کاربردهای شناخته شده، دامنه کنترل احتراق با استفاده از روش های تزریق افزایش یافته است. تحقیقات کوکجان و رایتز [14] و جهانگیریان و همکاران [15] نشان داده اند که روش های تزریق می توانند بر فاز احتراق تأثیر بگذارند؛ انتشار گازهای مضر را کاهش دهند و انتقال حرارت به دیواره های محفظه احتراق را کاهش دهند. سلجاک و همکاران [16] مفهوم رقیق سازی انتخابی مکانی (Spatially Selective Dilution) را برای مدیریت موثر انتشار گرما معرفی کردند. علاوه بر این، کاهش نویز آیرودینامیکی از طریق تزریق جریان جرمی مورد بررسی قرار گرفته است. سونگ و همکاران [17] و هافستاینسون و همکاران [18]، به این نتیجه رسیدند که تزریق می تواند به طور قابل توجهی هم صدای حفره زایی (Cavitation) و هم نویز ناشی از شوک را در جریان های مافوق صوت کاهش دهد. تزریق و مکش نقش اساسی در کنترل جریان های مافوق صوت دارند. تحقیقات اشمیت و همکاران [19] و وانگ و همکاران [20] نشان داد که تزریق منجر به تشکیل شوک های مایل (Oblique Shocks) و لایه های مرزی آشفته می شود در حالی که مکش به تثبیت قطارهای شوک (Shock Trains) کمک می کند. علاوه بر این، تحقیق در مورد خنک سازی فیلم توسط چانگ و همکاران [21] و لیو و همکاران [22] نشان داده است که تزریق، یک لایه عایق حرارتی را در امتداد دیوارها ایجاد می کند که در محیط هایی با درجه حرارت بالا ضروری است. در مهندسی شیمی، مهندسی محیط زیست و داروسازی کاربرد تزریق به کاربردهای انتقال جرم و اختلاط سیال گسترش می یابد [23-55]. استفاده از مشتقات کسری در مکانیک سیالات، کاربردهای

زیادی دارد. مشتقات کسری به عنوان ابزاری برای تحلیل جریان های هیدرودینامیکی مغناطیسی و واکنش های شیمیایی مرتبط با آن به کار می روند. این ابزارها در بررسی پدیده هایی نظیر همرفت آزاد، تأثیر تشعشعات حرارتی، مدل سازی دینامیک محیط های متخلخل، تأثیرات غیرمحلی و اثرات حافظه در آشفتنگی، همچنین پدیده های لایه مرزی و انتقال حرارت در مقیاس نانو نقش مهمی ایفا می کنند. استفاده از مشتقات کسری به بهبود دقت پیش بینی ها منجر می شود. به عنوان مثال، اشتیاق و همکاران [56] و احمد و همکاران [57] از مشتقات کسری برای بررسی رفتارهای سیال مغناطیسی و پدیده همرفت آزاد استفاده کردند. همچنین عباس و همکاران [58] و ریاض و همکاران [59] تأثیر تشعشعات حرارتی و واکنش های شیمیایی در جریان های هیدرودینامیکی مغناطیسی را با استفاده از مشتقات کسری بررسی کردند. علاوه بر این، مشتقات کسری برای مدل سازی دینامیک محیط های متخلخل و جریان های آشفته استفاده شده اند. یانگ و همکاران [60] و ژو و همکاران [61] مدل های کسری مربوط به جریان دارسی و غیردارسی را استخراج کردند. عباس و همکاران [58] و سوزوکی و همکاران [62] از مشتقات کسری برای توضیح تأثیرات غیرمحلی و اثرات حافظه در آشفتنگی استفاده نمودند. میلانوف و راسموسن [63] از سینتیک کسری برای تبیین مکانیسم های پراکندگی تلاطم بهره گرفتند. علاوه بر این، مشتقات کسری برای مطالعه پدیده های لایه مرزی استفاده شده است و همانطور که در تحقیق احمد و همکاران [57] نشان داده شده است؛ آنها توزیع سرعت، غلظت و دما را از طریق حساب کسری بهبود بخشیدند. ریاض و همکاران [64] جریان های هیدرودینامیکی مغناطیسی را بر روی صفحات ریگا (Riga Plates) بررسی کردند؛ در حالی که شهریم و همکاران [65] دینامیک جریانات روی صفحات شتابدار را بررسی نمودند. استفاده از مشتقات کسری در انتقال حرارت در مقیاس نانو نمایش دقیق تری از اثرات حافظه حرارتی ارائه می دهند [66-68]. جریان جفری-همل دینامیک سیال را در کانال های همگرا و واگرا تحلیل می کند. این مدل کاربرد قابل توجهی در بررسی ناپایداری های جریان، فرآیندهای انتقال جرم و پیامدهای تزریق پیدا کرده است. بیتالو و همکاران [69]، انتقال حرارت و دینامیک جریان یک نانوسیال هیبریدی را در کانال های همگرا یا واگرا مطالعه کردند. بودجملین و همکاران [70] به بررسی جریان

و $r = 4m$ می‌باشد. برای تحلیل از مختصات قطبی استفاده می‌شود. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است؛ جریان اصلی شعاعی است در حالی که جریان ثانویه از دیوارهای کانال وارد می‌شود. مفروضات اساسی این تحلیل به شرح زیر است:

۱. جریان به صورت دو بعدی، پایا و تراکم ناپذیر تعریف و از اثرات گرانش صرفنظر شده است.

۲. مولفه سرعت شعاعی v_r در مقایسه با مولفه مماسی v_θ اهمیت بیشتری دارد. در معادلات تکانه، جمله غالب شامل v_θ لحاظ می‌شود و دیگر جملات آن نادیده گرفته می‌شوند. تغییرپذیری سرعت تزریق در سراسر کانال در نظر گرفته شده است؛ برخلاف مطالعات قبلی که آن را ثابت فرض می‌کردند.



شکل ۱ هندسه مساله

با اعمال مفروضات و حذف فشار، معادلات تکانه در جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی به یک معادله دیفرانسیل جزئی مرتبه بالاتر تبدیل می‌شوند:

$$\left(\frac{\partial v_r}{\partial \theta} \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_r \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{\partial v_r}{\partial r} v_\theta - v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) = v \left(\frac{\partial^3 v_r}{\partial r^2 \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 v_r}{\partial \theta^3} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial \theta} \right) - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \quad (1)$$

در رابطه فوق با جایگزین کردن مشتق مرتبه اول نسبت به r با مشتق کسری از مرتبه b که به صورت OD_r^b نمایش داده می‌شود به دست می‌آوریم:

فشار-محور یک نانوسیال غیرنیوتنی در یک کانال همگرا یا واگرا پرداختند. در هر دو تحقیق، جریان کاملاً شعاعی در نظر گرفته شده و معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم با استفاده از یک تبدیل تشابهی مناسب به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل و سپس حل شده است. اونیانگو و همکاران [71] و هم‌لاین و همکاران [72] جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی پایای دو بعدی و غیر قابل تراکم جفیری همل همراه با مکش و دمش از دیوارها را بررسی کردند. اونیانگو و همکاران دمش روی یک دیوار و مکش از دیوار دیگر را حل کردند؛ اما هم‌لاین و همکاران محدودیتی از نظر نوع مکش یا دمش روی دیوارها قرار ندادند. اونیانگو و همکاران سرعت در راستای θ را در هر x و هم‌لاین و همکاران سرعت در راستای y در کل جریان را ثابت فرض نمودند. معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم با استفاده از یک تبدیل تشابهی مناسب به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل و سپس حل شده است. اونیانگو و همکاران [73] در یک تحقیق مشابه دیگر، معادله غلظت را هم در نظر گرفته و مساله را به صورت عددی حل کردند.

هدف از این مطالعه بررسی تحلیلی اثر میدان مغناطیسی و تزریق جریان با سرعت تغییرپذیر از دیوار بر توزیع سرعت در یک کانال واگرا است. نوآوری‌های مطالعه حاضر عبارت است از: اعمال سرعت تغییرپذیر پذیر جریان تزریقی، تبدیل مشتق صحیح به مشتق کسری در معادله حاکم و بررسی تاثیر تغییر مرتبه مشتق کسری، نحوه استفاده از تبدیل تشابهی (Similarity Transformation) برای تبدیل معادله دیفرانسیل جزئی به معمولی و استفاده از یک روش نیمه تحلیلی کمتر شناخته شده برای تحلیل جریان. در این تحقیق تاثیر پارامترهای عدد رینولدز، عدد هارتمن و مرتبه مشتق کسری بر ویژگی‌های جریان بررسی می‌شود.

این مقاله در چندین بخش ساختار یافته است. در بخش روابط حاکم، به معرفی مسئله و استخراج معادله حاکم پرداخته شده است. بخش روش تحلیلی جزئیات فرآیند استخراج راه حل تحلیلی و روشهای حل معادله را تشریح می‌کند. بخش اعتبار سنجی، اعتبار سنجی تحقیق فعلی را بررسی می‌کند. بخش نتایج، مفاهیم نمودارهای بدست آمده را مورد بحث قرار می‌دهد. در نهایت، بخش جمع بندی، پژوهش حاضر را با تفسیر نتایج کلیدی به پایان می‌رساند.

روابط حاکم

کانال واگرا با زاویه باز شدن $\alpha = 0.7 \text{ rad}$ و شعاع بین $r = 1m$

طبق رابطه دیویسون-اسکس (Relation Davison-Essex)

داریم:

$${}_0D_r^\gamma r^a = \frac{\Gamma(a+1)}{\Gamma(a-\gamma+1)} r^{a-\gamma} \quad (13)$$

با استفاده از رابطه (۱۳) و به کارگیری رابطه $\Gamma(z+1) = z\Gamma(z)$

و اعمال پارامترهای بدون بعد عدد رینولدز و عدد هارتمن

که به صورت $Re = \frac{r^2 v_w}{\nu}$ و $Ha = rB \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}$ تعریف می‌شود که در

آن ν نشان دهنده ویسکوزیته سینماتیکی است. عدد هارتمن

بیانگر تاثیر میدان مغناطیسی بر جریان سیال رسانای الکتریکی

می‌باشد. رابطه (۱۲) به صورت نهایی زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} & F^{(IV)} + 2\alpha Re F''' F - \\ & \frac{\Gamma(2)\alpha}{\Gamma(2-\beta)} \left(2 - \frac{2}{(2-\beta)}\right) Re r^{1-\beta} F'' F' + \\ & (\alpha^2 \Gamma(2) r^{-\beta+1} \left(\frac{r^{1-\beta}}{\Gamma(2-2\beta)} - \frac{1}{\Gamma(2-\beta)}\right) + \\ & \alpha^2 (1 - Ha^2) F'' - \frac{4\alpha^3 \Gamma(2)}{\Gamma(2-\beta)} Re r^{1-\beta} F' F = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

جریان ثانویه با زاویه نسبت به دیوارهای کانال و مخالف

جهت جریان اصلی تزریق می‌شود. شرایط مرزی به صورت زیر

بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \eta = 0 \rightarrow F = -\frac{v_0}{2rv_w} = -1, \quad F' = -1 \\ \eta = 1 \rightarrow F = -\frac{v_0}{2rv_w} = 1, \quad F' = -1 \end{cases} \quad (15)$$

هنگامی که بر روی یک متغیر نماد $\wedge$ قرار گیرد؛ به این معنی

است که متغیر بی‌بعد شده است. فرآیند بی‌بعد سازی از سرعت

مماسی در ابتدای دیوار کانال ($r=1$) به عنوان مقادیر مرجع

استفاده می‌نماید:

$$\hat{v}_r = \frac{v_r}{V_{\theta w}|_{r=1}} \quad (16)$$

$$\hat{v}_\theta = \frac{v_\theta}{V_{\theta w}|_{r=1}} \quad (17)$$

$$\hat{V} = \frac{|V|}{V_{\theta w}|_{r=1}} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial v_r}{\partial \theta} {}_0D_r^\beta v_r + v_r {}_0D_r^\beta \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \right. \\ & \left. \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - v_\theta {}_0D_r^\beta v_r - v_r {}_0D_r^\beta v_\theta\right) = \nu ({}_0D_r^{2\beta} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \\ & \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 v_r}{\partial \theta^3} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{1}{r} {}_0D_r^\beta \frac{\partial v_r}{\partial \theta}) - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (2)$$

$V_{\theta w1}$ و $V_{\theta w2}$ به ترتیب سرعت مماسی تزریق را در

دیواره‌های پایین و بالایی نشان می‌دهند. روابط $V_{\theta w1} = 2rv_{w1}$

و $V_{\theta w2} = 2rv_{w2}$ برقرار است و v_{w1} و v_{w2} مقادیر ثابت هستند.

تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} v_w = v_{w1} \text{ if } |v_{w1}| \geq |v_{w2}| \\ v_w = v_{w2} \text{ if } |v_{w2}| \geq |v_{w1}| \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{\theta w} = \max[|V_{\theta w1}|, |V_{\theta w2}|] \quad (4)$$

تبدیل‌های تشابهی بی‌بعد زیر اعمال می‌شوند:

$$\eta = \frac{\theta}{\alpha} \quad (5)$$

$$\psi = r^2 v_w F(\eta) \quad (6)$$

y تابع جریان می‌باشد. داریم:

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = \frac{r}{\alpha} v_w F' \quad (7)$$

$$v_\theta = -{}_0D_r^\beta \psi = -{}_0D_r^\beta (r^2 v_w F) = -v_w F {}_0D_r^\beta r^2 \quad (8)$$

مشتقات نسبت به θ از طریق روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{d}{d\eta} \frac{d\eta}{d\theta} = \frac{1}{\alpha} \frac{d}{d\eta} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial \theta} = \frac{r}{\alpha^2} v_w F'' \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} = \frac{r}{\alpha^3} v_w F''' , \quad \frac{\partial^3 v_r}{\partial \theta^3} = \frac{r}{\alpha^4} v_w F^{(4)} \quad (11)$$

با گنجاندن روابط فوق در معادله (۲)، به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} & \frac{r}{\alpha^2} v_w F'' {}_0D_r^\beta \left(\frac{r}{\alpha} v_w F'\right) + \frac{r}{\alpha} v_w F' {}_0D_r^\beta \left(\frac{r}{\alpha^2} v_w F''\right) \\ & - \frac{1}{r\alpha} v_w F' \frac{r}{\alpha^2} v_w F'' {}_0D_r^\beta r^2 - 2v_w F \frac{r}{\alpha^3} v_w F''' - \\ & (-2rv_w F) {}_0D_r^\beta \left(\frac{r}{\alpha} v_w F'\right) - \frac{r}{\alpha} v_w F' {}_0D_r^\beta (-2rv_w F) \\ & = \nu ({}_0D_r^{2\beta} \left(\frac{r}{\alpha^2} v_w F''\right) + \frac{1}{r^2} \frac{r}{\alpha^4} v_w F^{(IV)} + \\ & \frac{1}{r^2} \frac{r}{\alpha^2} v_w F'' - \frac{1}{r} {}_0D_r^\beta \left(\frac{r}{\alpha^2} v_w F''\right)) - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} \frac{r}{\alpha^2} v_w F'' \end{aligned} \quad (12)$$

$$L(F_L(\eta)) = 0 \quad (20)$$

جواب معادله (۲۰) را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$F_L(\eta) = \sum_{i=1}^m c_i f_i(\eta) \quad (21)$$

به منظور یافتن پاسخ معادله (۱۹)، معادله (۲۱) را در نظر گرفته و به جای متغیر h یک تابع کسری چند جمله‌ای جایگزین می‌گردد:

$$F(\eta) = \sum_{i=1}^m c_i f_i \left(\frac{\sum_{j=0}^{l_1} p_{ij} \eta^j}{\sum_{k=0}^{l_2} q_{ik} \eta^k} \right) \quad (22)$$

برای تعیین ضرایب p_{ij} و q_{ik} ، معادله (۲۲) در معادله (۱۹) درج می‌گردد و با استفاده از رویکرد بهینه سازی، خطای حاصل به حداقل رسانده می‌شود. در نهایت، ضرایب c_i با برآورده نمودن شرایط مرزی محاسبه می‌شود.

در اینجا از نرم افزار متلب که روش تفاضل محدود را در ترکیب با فرمول سه مرحله ای لوباتو به کار می‌گیرد استفاده شده است تا جواب‌های عددی معادله (۱۴) محاسبه شود. متعاقباً متغیرهای $\hat{v}_\theta$ ، $\hat{v}_r$ و $\hat{V}$ از مقدار F محاسبه گردیدند.

اعتبار سنجی

نتایج تحلیلی و عددی در شکل‌های (۲) تا (۴) نشان داده شده است. اختلاف بین پاسخهای تحلیلی و عددی با استفاده از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (Mean Square Error Root) بررسی گردیده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_A - f_N^2} \quad (23)$$

f_A و f_N به ترتیب بیانگر حل‌های تحلیلی و عددی است. متغیر n تعداد نقاط تحلیل را در بازه $0 \leq \eta \leq 1$ بیان می‌کند که در اینجا برابر ۱۰۱ می‌باشد. مقادیر RMSE برای F ، $\hat{v}_r$ و $\hat{V}$ در $Re = 20, Ha = 2, Sc = 2, \beta = 0.8, \xi = 0.8$ بدست آمده است و به ترتیب 1.42724×10^{-4} ، 0.00101 و 8.73780×10^{-4} می‌باشد. همبستگی قوی و سازگاری در نتایج مشاهده شده بین راه‌حل‌های عددی و تحلیلی بر قابلیت روش تحلیلی برای پیش‌بینی دقیق جریان تأکید می‌کند.

در شکل (۵) نسبت سرعت جریان داخل لوله به سرعت مرکز

ثابت بودن مخرج در معادلات (۱۶) تا (۱۸) بیانگر این است که تغییرات مشاهده شده در متغیرهای بدون بعد $\hat{v}_\theta$ ، $\hat{v}_r$ و $\hat{V}$ مستقیماً بیانگر تغییرات مربوط در متغیرهای v_θ ، v_r و V می‌باشد.

روش تحلیلی

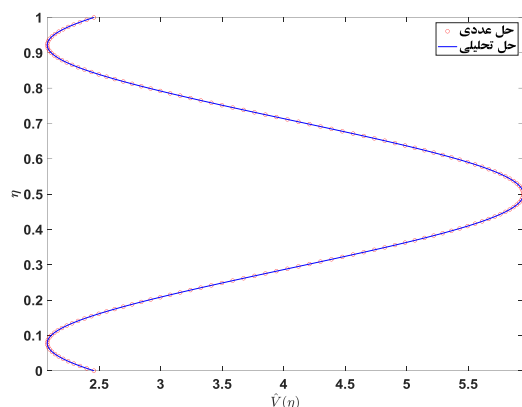
حل عددی معادله دیفرانسیل معمولی با روشهای مختلف، به سادگی در دسترس می‌باشد. با این وجود حل تحلیلی مزایایی دارد که حل عددی فاقد آن می‌باشد. از جمله مزایای حل تحلیلی موارد زیر می‌باشد:

۱. امکان بررسی دقیق تأثیر پارامترهای مختلف مساله بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های متعدد
۲. امکان دستیابی به روابط صریح بین پارامترها و متغیرهای جریان که برای طراحی بهینه سیستم‌ها مفید است
۳. استفاده به عنوان مرجع برای اعتبارسنجی حل‌های عددی
۴. امکان استخراج حالت‌های حدی و رفتار مجانبی سیستم
۵. کاهش خطاهای محاسباتی که در روش‌های عددی به دلیل گسسته‌سازی و تقریب رخ می‌دهد

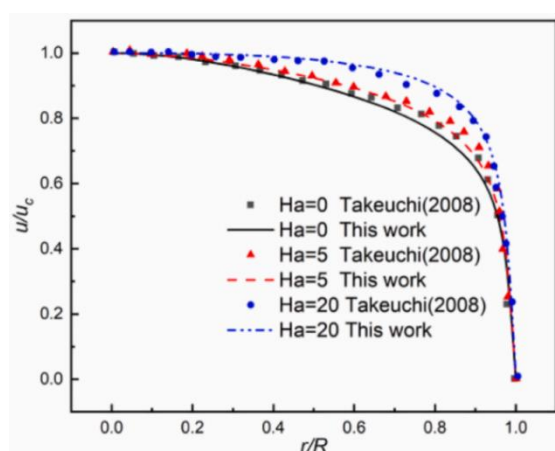
با توجه به مزایای فوق، بدست آوردن حل تحلیلی مساله به درک فیزیکی بهتر مخصوصاً به منظور طراحی بهینه یک سیستم کمک می‌کند. در اینجا از روش کسر تطبیقی (Adaptive Fraction Method) (AFM) [74-76] برای حل تحلیلی معادله دیفرانسیل معمولی استفاده می‌شود. این روش با حل بخش خطی معادله دیفرانسیل شروع می‌شود و متعاقباً متغیرها را با تابع کسری مشتمل بر چند جمله‌ای جایگزین می‌کند. ضرایب اولیه این چند جمله‌ای‌ها در ابتدا برای مطابقت با معادله دیفرانسیل خطی انتخاب می‌شوند. به دنبال این، ضرایب نهایی از طریق یک استراتژی بهینه‌سازی که با مقادیر اولیه مرتبط با معادله دیفرانسیل خطی شروع می‌شود؛ با هدف کاهش واریانس بین معادله پاسخ و معادله دیفرانسیل غیرخطی به دست می‌آید. ضرایب ثابت مطابق با شرایط مرزی از پیش تعیین شده مشخص می‌شوند. معادله دیفرانسیل معمولی زیر را در نظر می‌گیریم:

$$H(F(\eta)) = L(F(\eta)) + N(F(\eta)) = 0 \quad (19)$$

H به عنوان یک عملگر، L به عنوان یک عملگر خطی و N به عنوان یک عملگر غیر خطی می‌باشد. در ابتدا بخش خطی معادله در نظر گرفته می‌شود:



شکل ۴ حل تحلیلی و عددی $\bar{V}$ در شرایط
 $Re = 20, Ha = 2, \beta = 0.8$



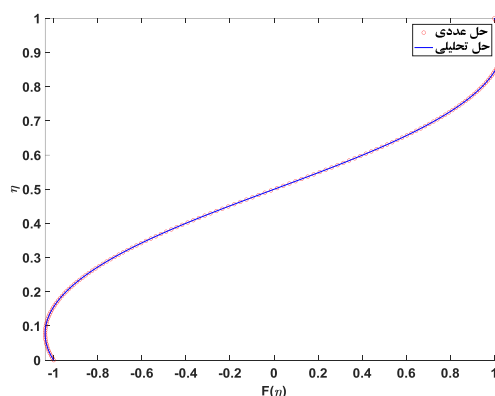
شکل ۵ نتایج تجربی تاکوچی و همکاران و نتایج تحلیل عددی گوا و همکاران برای سرعت جریان داخل لوله به سرعت مرکز لوله برای اعداد هارتمن مختلف [77]

نتایج

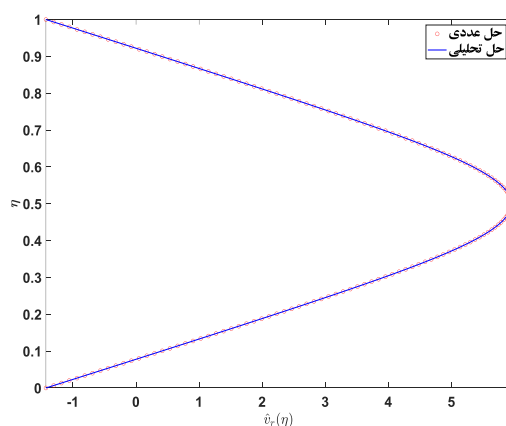
پارامترهای موثر بر مساله شامل Re ، Ha و b می‌باشد. بعلاوه، مساله شامل چندین متغیر بدون بعد F ، $\hat{v}_r$ ، $\hat{v}_\theta$ و $\hat{V}$ می‌باشد که به ترتیب تابع F ، سرعت شعاعی بدون بعد، سرعت مماسی بدون بعد و سرعت بدون بعد می‌باشند.

شکل (۶) نشان می‌دهد که به جز نواحی خیلی نزدیک به دیوارها و هسته مرکزی کانال، افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش جزئی در $|F|$ (و در نتیجه طبق رابطه (۸) افزایش در $|\hat{v}_\theta|$) می‌شود. شکل‌های (۷) و (۸) نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، افزایش قابل توجهی در $\hat{v}_r$ و $\hat{V}$ در مرکز کانال وجود دارد و در عین حال، یک کاهش جزئی در نواحی نزدیک‌تر به دیوارها مشاهده می‌شود اما در نواحی چسبیده به دیوارها تقریباً بدون تغییر است. در این دو شکل، پروفیل سرعت شعاعی بی

لوله با استفاده از نتایج تجربی تاکوچی و همکاران و نتایج تحلیل عددی گوا و همکاران در اعداد هارتمن مختلف رسم شده است [77]. مشاهده می‌شود با افزایش عدد هارتمن، پروفیل سرعت در به جز نواحی نزدیک دیواره‌های لوله به صورت تقریباً تخت در می‌آید. این روند مشابه روندی است که در شکل (۱۳) تحقیق حاضر برای سرعت شعاعی جریان داخل کانال واگرا مشاهده گردیده است. با توجه به تطابق خیلی خوب حل تحلیلی و عددی در تحقیق حاضر و مشابهت رفتار مشاهده شده برای پروفیل سرعت شعاعی در کانال واگرا در تحقیق حاضر با نتایج تجربی و عددی پروفیل سرعت داخل لوله در مرجع [77]، اعتبار تحلیل حاضر تایید می‌شود.

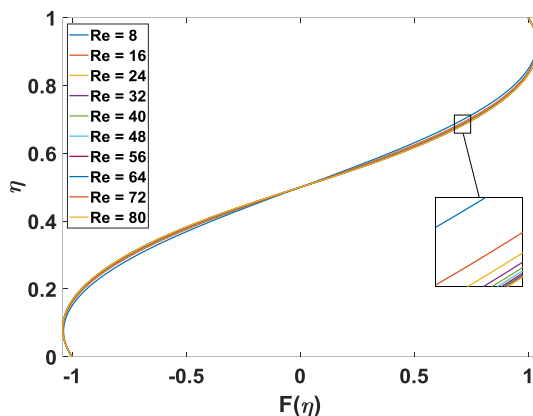


شکل ۶ حل تحلیلی و عددی تابع F در شرایط
 $Re = 20, Ha = 2, \beta = 0.8$

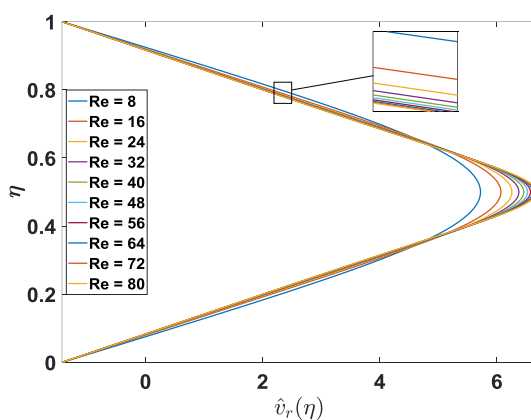


شکل ۷ حل تحلیلی و عددی $\hat{v}_r$ در شرایط
 $Re = 20, Ha = 2, \beta = 0.8$

رینولدز تاثیرات تغییر b را پیش‌بینی کرد. تجزیه و تحلیل اطلاعات ارائه شده در شکل‌های (۲۱) تا (۲۴) نشان می‌دهد که افزایش Ha معمولاً اثراتی برخلاف آنچه در هنگام افزایش Re مشاهده می‌شود ایجاد می‌کند. شکل (۲۱) نشان می‌دهد که با افزایش عدد هارتمن، خطوط کانتورهای سرعت مماسی بدون بعد مستقیم‌تر شده و از مرکز کانال فاصله می‌گیرند. علاوه بر این، شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نشان می‌دهد که با افزایش عدد هارتمن، کاهش قابل توجهی در هر دو مقدار حداکثر سرعت شعاعی بدون بعد و حداکثر سرعت بدون بعد ایجاد می‌شود. علاوه بر این در اعداد هارتمن بالا در موقعیت‌های شعاعی ثابت، خطوط کانتور یکنواخت‌تر می‌شوند. مطابق شکل (۲۳) در مقادیر به اندازه کافی بزرگ از اعداد هارتمن، دو سرعت بیشینه کوچک در نزدیکی دیوارهای کانال تشکیل می‌شود. شکل (۲۴) نشان می‌دهد که افزایش عدد هارتمن منجر به یکنواختی بردارهای سرعت بدون بعد می‌گردد.

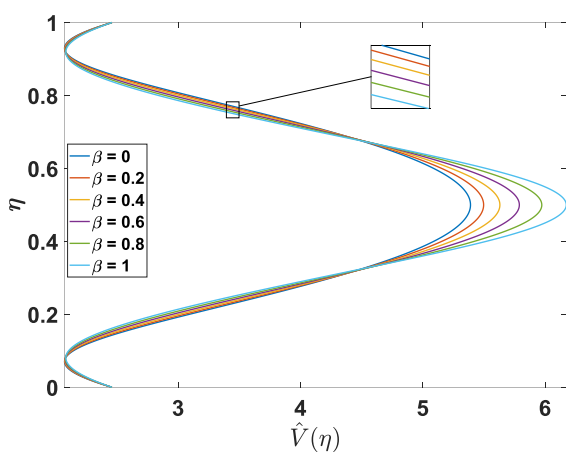


شکل ۶ تغییرات متغیر F برحسب پارامتر Re در شرایط $Ha=1, \beta=1$

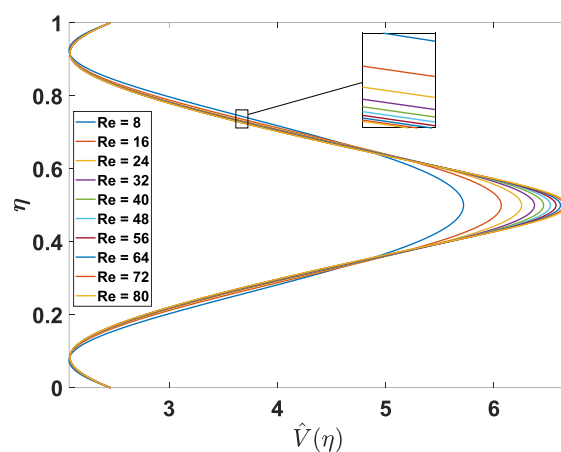


شکل ۷ تغییرات متغیر $\hat{v}_r$ برحسب پارامتر Re در شرایط $Ha=1, \beta=1$

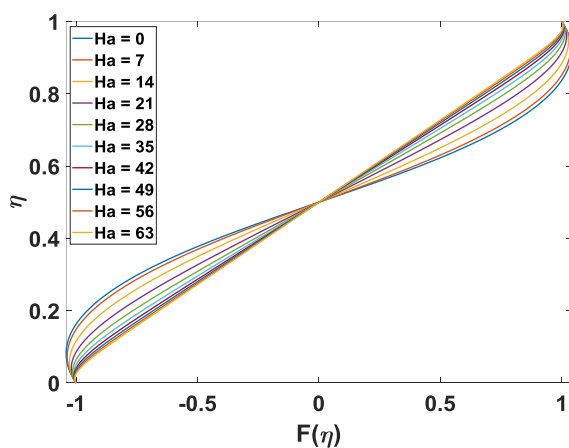
بعد V شکل و پروفیل سرعت بی بعد W شکل می‌باشد. بر طبق شکل‌های (۹) تا (۱۱) افزایش b همان تاثیر افزایش عدد رینولدز را بر متغیرهای F , $\hat{v}_r$, و $\hat{V}$ نشان می‌دهد. طبق اشکال (۱۲) تا (۱۴) به طور کلی افزایش عدد هارتمن رفتاری مخالف افزایش عدد رینولدز را به نمایش می‌گذارد. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش $|F|$ (و در نتیجه طبق رابطه (۸) کاهش در $|\hat{v}_r|$) می‌گردد. همانطور که در رابطه (۷) بیان شده است سرعت شعاعی با مشتق تابع F رابطه دارد. مطابق شکل (۱۲)، با افزایش عدد هارتمن، منحنی F به خط مستقیم نزدیک می‌شود بنابراین طبق انتظار، در شکل (۱۳) سرعت شعاعی بدون بعد تقریباً ثابتی به جز نزدیک دیوارها مشاهده می‌گردد. مطابق این شکل، افزایش عدد هارتمن باعث افزایش $\hat{v}_r$ نزدیک دیوارها می‌شود؛ در حالی که به طور همزمان این مقدار را در مرکز کانال کاهش می‌دهد. نیروی لورنتس (Force Lorentz) علت کاهش سرعت در مرکز کانال بر اثر افزایش عدد هارتمن می‌باشد که در مقابل حرکت سیال مخصوصاً در مرکز کانال مقاومت می‌کند [78]. افزایش سرعت نزدیک دیوارها بخاطر بقاء جرم می‌باشد. مطابق شکل (۱۴) افزایش عدد هارتمن باعث کاهش $\hat{V}$ در مرکز کانال و ناحیه خیلی نزدیک دیوارها می‌شود؛ در حالی که در منطقه واقع در بین این دو ناحیه، باعث افزایش آن می‌شود. این پدیده منجر به توزیع سرعت بدون بعد یکنواخت‌تر در ناحیه مرکزی کانال تا عدد هارتمن حدود ۲۸ می‌شود. با این حال، افزایش بیشتر در عدد هارتمن منجر به ظهور دو سرعت بیشینه نزدیک دیوارهای کانال می‌شود. بر طبق شکل (۱۵)، مشاهده می‌شود که افزایش Re منجر به تمایل جزئی خطوط کانتور سرعت مماسی بدون بعد به سمت مرکز کانال می‌شود. از سوی دیگر شکل (۱۶) نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر Re ، خطوط کانتور سرعت شعاعی بدون بعد به سمت مرکز کانال تغییر می‌کنند و برجستگی و تیزی بیشتری در راس مخروط کانتور ایجاد می‌شود. علاوه بر این، در مرکز کانال افزایش در حداکثر سرعت شعاعی بدون بعد مشاهده می‌شود. شکل (۱۷) بر تاثیر عدد رینولدز بر بردارهای سرعت بدون بعد تمرکز دارند. با افزایش عدد رینولدز، بردارها یک توزیع زنگوله شکل از خود نشان می‌دهند که با سرعت‌های بالاتر در مرکز و سرعت‌های پایین‌تر در حاشیه مشخص می‌شود. طبق شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) به طور کلی، افزایش b همان تاثیر افزایش عدد رینولدز بر رفتار جریان را نمایش می‌دهد. از نظر کاربردی این نتیجه مفیدی است و در عمل بجای تغییر b که دشوار می‌باشد می‌توان با تغییر



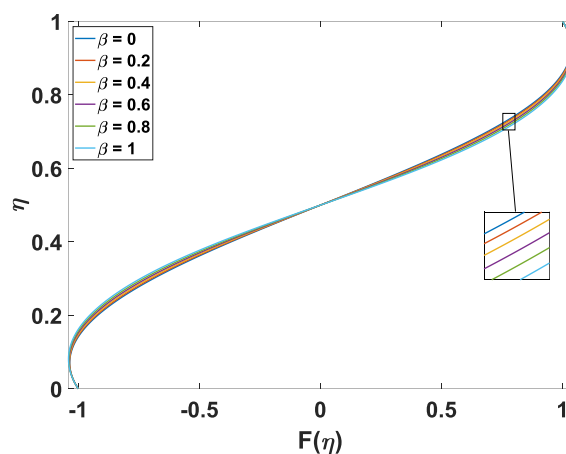
شکل ۱۱ تغییرات متغیر $\hat{V}$ برحسب پارامتر b در شرایط $Re=20, Ha=1$



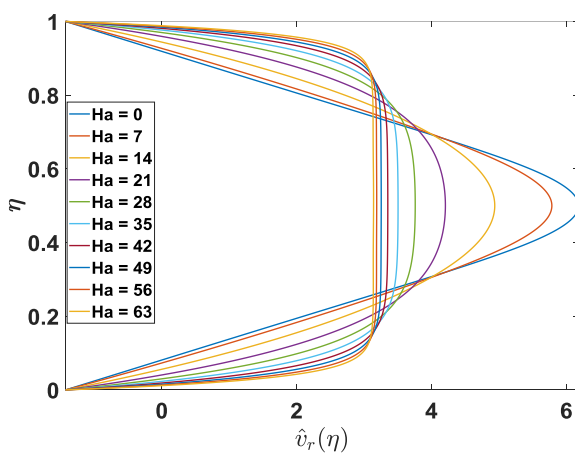
شکل ۸ تغییرات متغیر $\hat{V}$ برحسب پارامتر Re در شرایط $Ha=1, \beta=1$



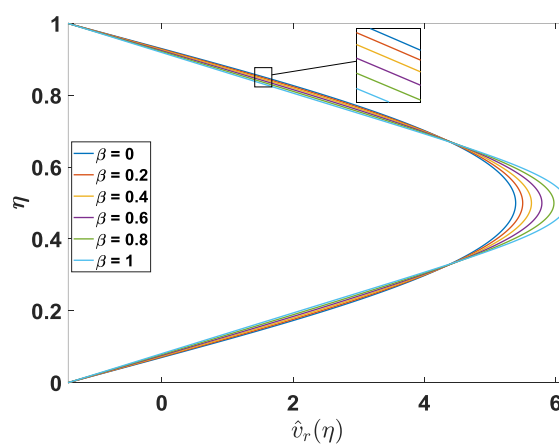
شکل ۱۲ تغییرات متغیر F برحسب پارامتر Ha در شرایط $Re=20, \beta=1$



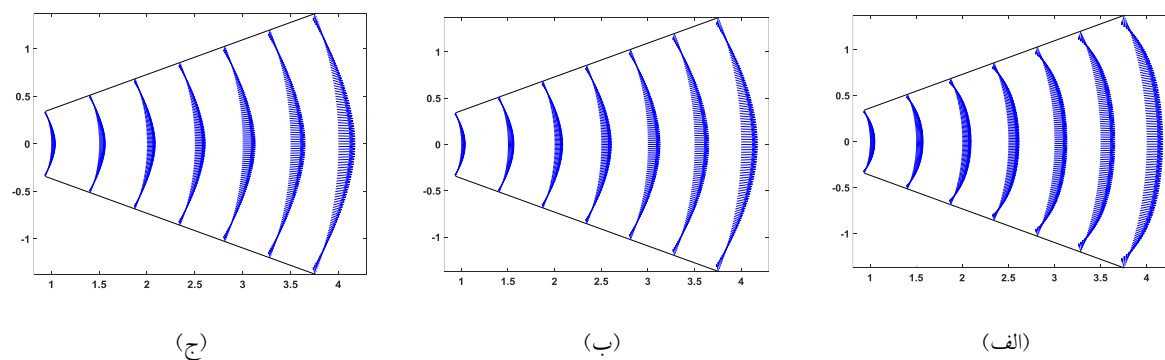
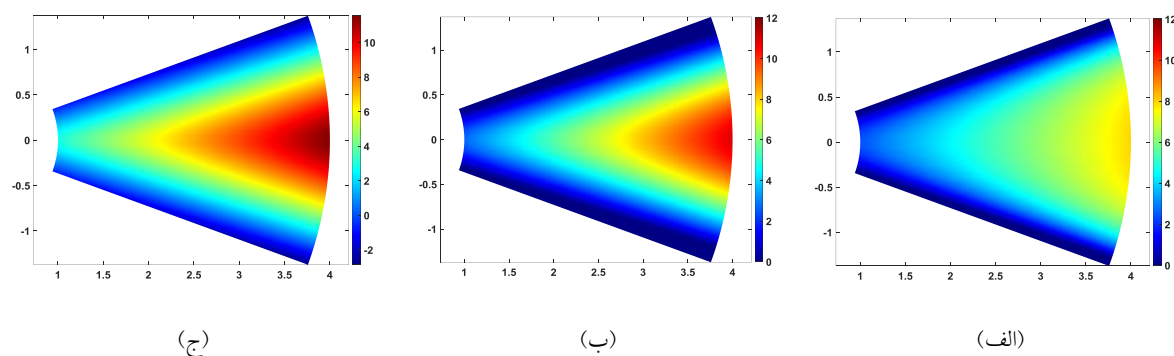
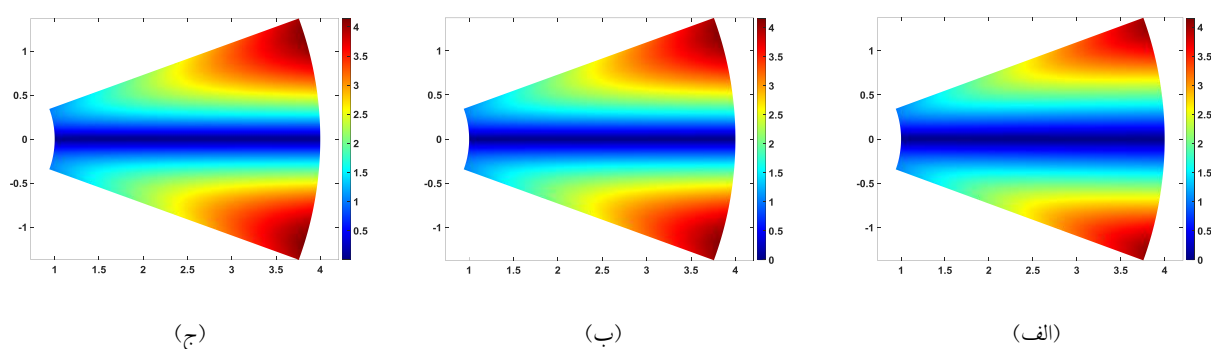
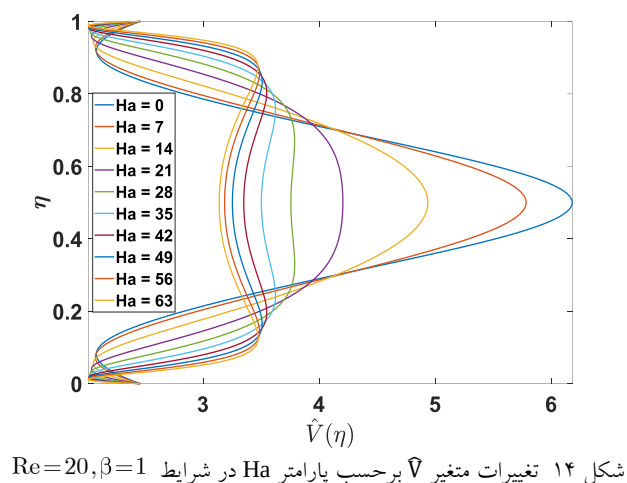
شکل ۹ تغییرات متغیر F برحسب پارامتر b در شرایط $Re=20, Ha=1$

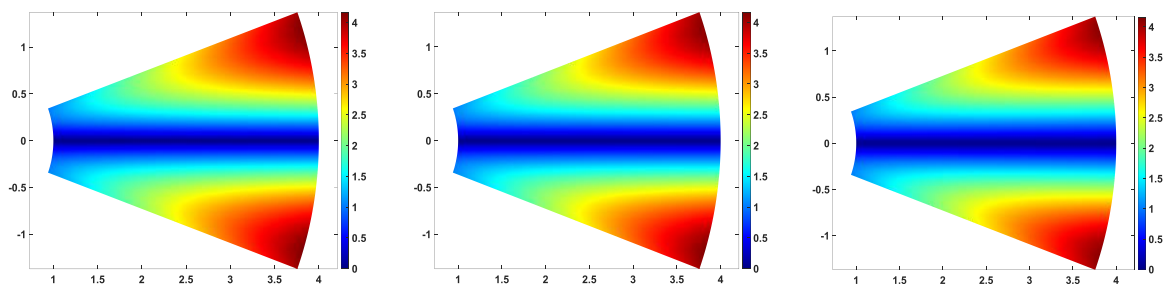


شکل ۱۳ تغییرات متغیر $\hat{v}_r$ برحسب پارامتر Ha در شرایط $Re=20, \beta=1$

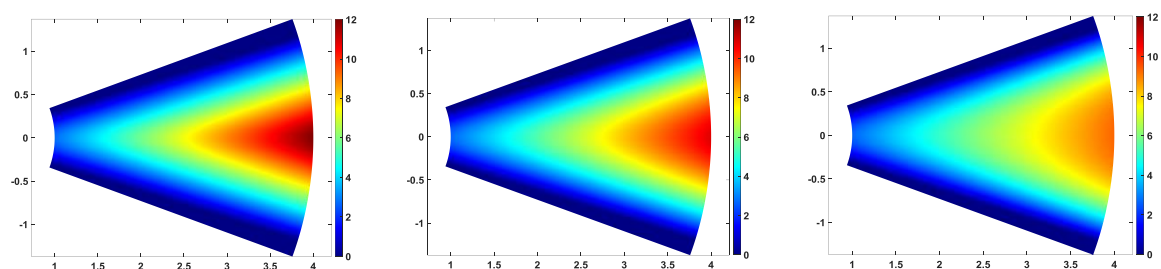


شکل ۱۰ تغییرات متغیر $\hat{v}_r$ برحسب پارامتر b در شرایط $Re=20, Ha=1$

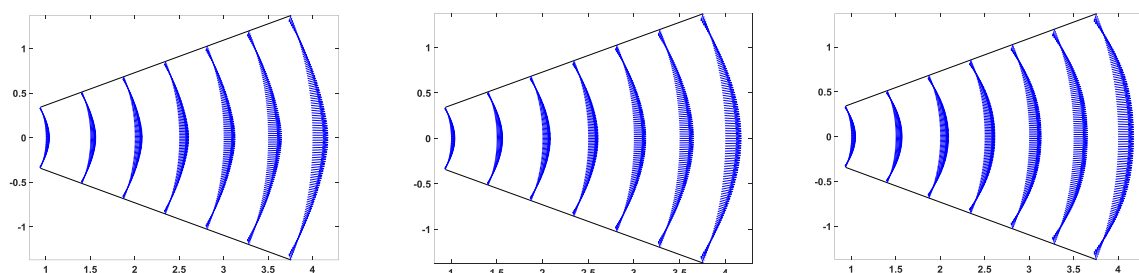




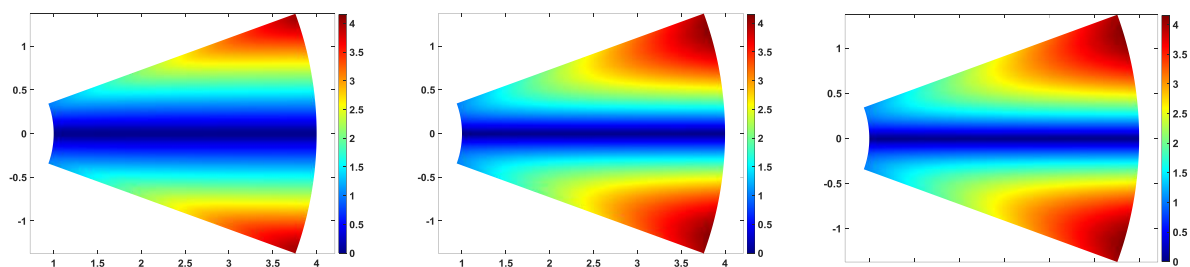
شکل ۱۸ کانتورهای $\hat{v}_\theta$ در شرایط $\text{Re}_{\text{in}} = 8, \text{Ha}_{\text{in}} = 5$ و (الف) $\beta = 0$ (ب) $\beta = 0.6$ (ج) $\beta = 1$



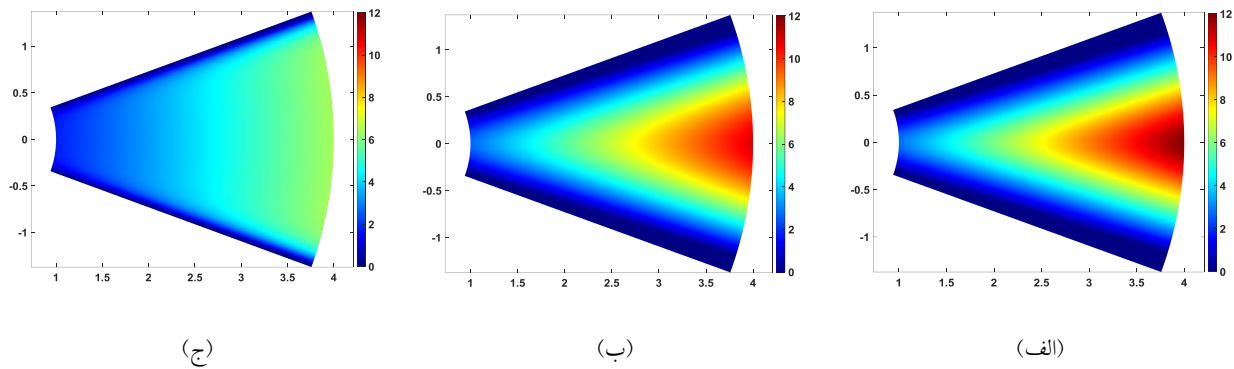
شکل ۱۹ کانتورهای $\hat{v}_r$ در شرایط $\text{Re}_{\text{in}} = 8, \text{Ha}_{\text{in}} = 5$ و (الف) $\beta = 0$ (ب) $\beta = 0.6$ (ج) $\beta = 1$



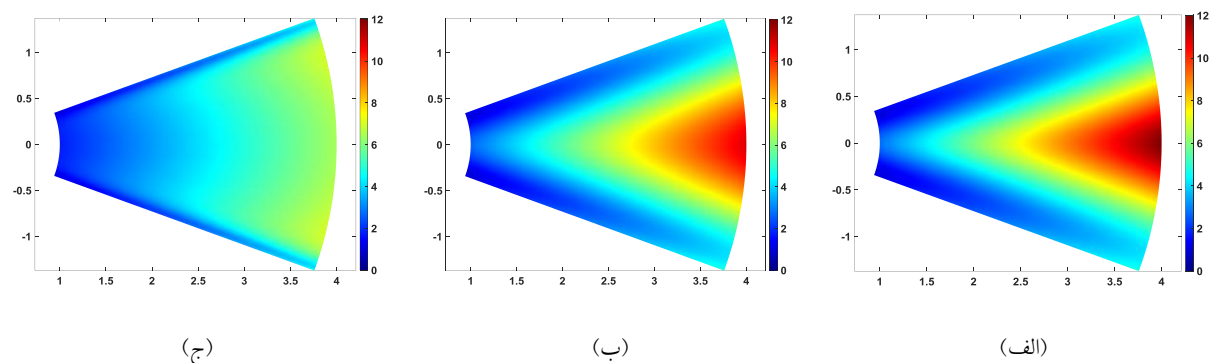
شکل ۲۰ بردارهای $\hat{V}$ در شرایط $\text{Re}_{\text{in}} = 8, \text{Ha}_{\text{in}} = 5$ و (الف) $\beta = 0$ (ب) $\beta = 0.6$ (ج) $\beta = 1$



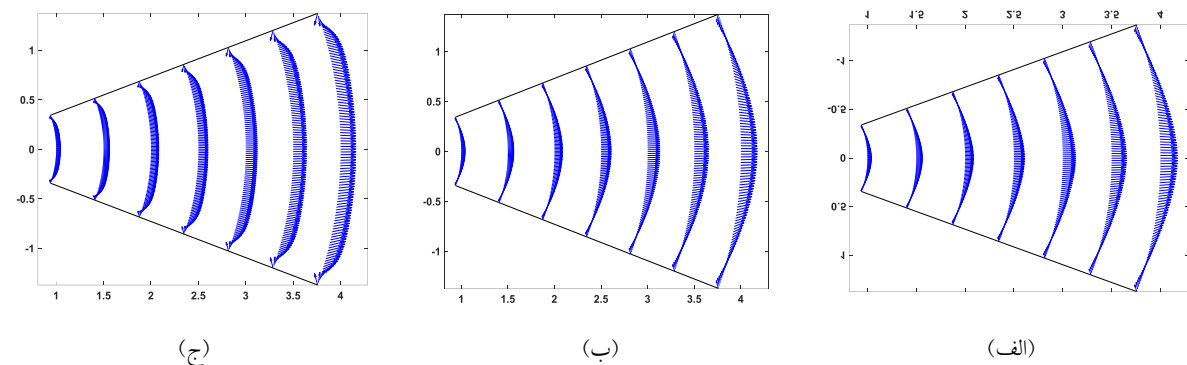
شکل ۲۱ کانتورهای $\hat{v}_\theta$ در شرایط $\text{Re}_{\text{in}} = 8, \beta = 0.6$ و (الف) $\text{Ha}_{\text{in}} = 0$ (ب) $\text{Ha}_{\text{in}} = 5$ (ج) $\text{Ha}_{\text{in}} = 25$



شکل ۲۲. کانتورهای $\hat{V}_r$ در شرایط $Re_{in} = 8, \beta = 0.6$ و (الف) $Ha_{in} = 0$ (ب) $Ha_{in} = 5$ (ج) $Ha_{in} = 25$



شکل ۲۳. کانتورهای $\hat{V}$ در شرایط $Re_{in} = 8, \beta = 0.6$ و (الف) $Ha_{in} = 0$ (ب) $Ha_{in} = 5$ (ج) $Ha_{in} = 25$



شکل ۲۴. بردارهای $\hat{V}$ در شرایط $Re_{in} = 8, \beta = 0.6$ و (الف) $Ha_{in} = 0$ (ب) $Ha_{in} = 5$ (ج) $Ha_{in} = 25$

جمع بندی

تغییرپذیر می‌باشد. با استفاده از روش تشابهی، معادله دیفرانسیل جزئی حاکم به یک معادله دیفرانسیل معمولی (ODE) تبدیل گردیده سپس با دو روش تحلیلی و عددی حل شده است. نتایج حاصل از هر دو روش، انطباق بالایی نشان می‌دهد. از طرفی با افزایش عدد هارتمن، پروفیل سرعت شعاعی در کانال واگرا بجز نواحی نزدیک به دیوارها به حالت تخت در می‌آید که با نتایج تجربی و عددی پروفیل سرعت داخل لوله در دیگر پژوهش‌ها مطابقت دارد. این موارد، بر اثربخشی روش تحلیلی حاضر در

کاربرد روشهای تزریق یا مکش بر روی سطوح با اهداف متعددی از جمله مدیریت لایه مرزی، کنترل جدایش جریان، کاهش درگ، افزایش انتقال حرارت، تنظیم احتراق، کاهش نویز آیرودینامیکی، کنترل جریان مافوق صوت، اجرای خنک‌سازی فیلم، تسهیل انتقال جرم و سیال انجام می‌شود. در این تحقیق تزریق جریان از دیوارهای کانال به جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی در کانال‌های واگرا بررسی شده است. سرعت مماسی در سراسر کانال

N	عملگر غیرخطی
P	فشار
P_{ij}, q_{ik}	ضرایب ثابت
Re	عدد رینولدز
Re_{in}	عدد رینولدز در ورودی کانال
r	مختصات شعاعی
$\vec{V}$	بردار سرعت
$V_{\theta w1}$	سرعت مماسی جریان تزریقی از دیوار پایینی
$V_{\theta w2}$	سرعت مماسی جریان تزریقی از دیوار بالایی
V_r	سرعت شعاعی
V_θ	سرعت مماسی
V_{w1}, V_{w2}	مقادیر ثابت

علامه یونانی

α	زاویه باز شدگی کانال
β	مرتبه مشتق کسری تکانه
η	موقعیت زاویه ای بی بعد
θ	مختصات مماسی
μ	لزجت دینامیکی
ν	لزجت سینماتیکی
ρ	چگالی
σ	رسانش الکتریکی
ψ	تابع جریان

بالانویس

$\wedge$	کمیت بی بعد شده
----------	-----------------

واژه نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
تبدیل تشابهی	similarity transformation	
روش کسر تطبیقی	adaptive fraction Method (AFM)	

تخمین خواص جریان تاکید می کند. یافته های اصلی مطالعه را می توان به صورت زیر تشریح کرد:

۱. افزایش عدد رینولدز: باعث افزایش قابل توجهی در مقادیر سرعت بدون بعد و سرعت شعاعی بی بعد در مرکز کانال می شود در حالی که یک کاهش جزئی در نواحی نزدیکتر به دیوارها مشاهده می شود اما در نواحی خیلی نزدیک دیوارها تقریباً بدون تغییر است. این منجر به توزیع زنگوله شکل بردارهای سرعت بدون بعد می شود و از طرفی منجر به تیزتر شدن رأس مخروط کانتورهای سرعت می گردد.
۲. افزایش مرتبه مشتق کسری معادله ممنتوم: همان تاثیر افزایش عدد رینولدز را بر جریان نمایش می دهد.
۳. افزایش عدد هارتمن: به طور کلی منجر به رفتاری بر خلاف جهت افزایش عدد رینولدز می گردد. افزایش عدد هارتمن باعث می شود خطوط کانتور سرعت مماسی بی بعد، مستقیم تر شده و از مرکز کانال دورتر شوند. همچنین بردارهای سرعت بدون بعد یکنواخت تر می شوند. علاوه بر این، با کاهش قابل توجهی در حداکثر سرعت بدون بعد و حداکثر سرعت شعاعی بدون بعد همراه است. خطوط کانتور سرعت شعاعی بی بعد، یکنواختی بیشتری را در موقعیت های شعاع ثابت نشان می دهند و دو سرعت بدون بعد بیشینه کوچک در نزدیکی دیوارها مشاهده می شود.

فهرست علامه انگلیسی

$\vec{B}$	میدان مغناطیسی
B_0	شدت میدان مغناطیسی
C_i	ضریب ثابت
${}_0D_r^\beta$	مشتق مرتبه β معادله تکانه در جهت r

F	تابع بی بعد معادله تکانه
F_L	جملات خطی ضابطه F
f_A	پاسخ تحلیلی
f_N	پاسخ عددی
H	عملگر
Ha	عدد هارتمن
L	عملگر خطی

	cavitation	حفره زایی
	convergent and divergent channel	کانال همگرا واگرا
	injection	تزریق

	root mean square error	ریشه میانگین مربعات خطا
	Lorentz Force	نیروی لورنتس
	magneto hydrodynamic flow	جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی
	fractional derivative	مشتق کسری
	semi-analytical method	روش نیمه تحلیلی

تقدیر و تشکر

نویسندگان از مشارکت‌های یعقوب فرجامی و محمد رسول نجفی برای کمک در اجرا و برنامه‌نویسی روش حل تحلیلی، صمیمانه قدردانی می‌کنند.

مراجع

- [1] M. Al-Malki, Z. Hussain, S. Garrett, and S. Calabretto, "Effects of parietal suction and injection on the stability of the Blasius boundary-layer flow over a permeable, heated plate," *Physical Review Fluids*, vol. 6, 2021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.113902>
- [2] P. Gao "Effects of wall suction/injection on the linear stability of flat Stokes layers," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 551, pp. 303-308, 2006. <https://doi.org/10.1017/S0022112005008554>
- [3] T. Friederich, and M. J. Kloker, "Control of the secondary cross-flow instability using localized suction," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 706, pp. 470-495, 2012. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.269>
- [4] R. Kant, N. Vinod, and U. Ghosh, "Stability and Control of the Flow in a Porous Channel," *IUTAM Bookseries*, pp. 419-437, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67902-6_36
- [5] Y. Y. Xu, X. Li, H. J. Tan, H. X. Huang, and Y. Zhang, "Compression Corner Shock Wave/Boundary Layer Interaction Flow Control Based on Local Particles Injection," *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, vol. 44, no. 2, 2023. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.2207089>
- [6] M. Debiasi, M. Herberg, Y. Zeng, H. M. Tsai, and S. Dhanabalan, "Control of Flow Separation in S-Ducts via Flow Injection and Suction," *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Aerospace Sciences Meetings: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-74>
- [7] N. Riley, "On the control of laminar flow separation," *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 57, no. 2, pp. 237-244, 2004. <https://doi.org/10.1093/qjmam/57.2.237>
- [8] R. Seele, C. Chen, C. Bhamburkar, and I. Wygnanski, "Some effects of blowing, suction and trailing edge bluntness on flow separation from thick airfoils; computations & measurements," p. 3357, 2011. <https://doi.org/10.2514/6.2011-3357>
- [9] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, fifth ed.: McGraw-Hill Education, 2011.
- [10] H. Schlichting, and K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*: Springer, 2017.

- [11] A. M. Kuethe, and C.-Y. Chow, *Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design*, Fifth edition ed.: John Wiley and Sons, 1998.
- [12] P. B. S. Lissaman, "Low-Reynolds-Number Airfoils," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 15, no. 1, pp. 223-239, 1983.
- [13] A. Kitagawa, P. Denissenko, and Y. Murai, "Effect of heated wall inclination on natural convection heat transfer in water with near-wall injection of millimeter-sized bubbles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 113, pp. 1200-1211, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.009>
- [14] S. L. Kokjohn, and R. D. Reitz, "Investigation of charge preparation strategies for controlled premixed charge compression ignition combustion using a variable pressure injection system," *International Journal of Engine Research*, vol. 11, no. 4, pp. 257-282, 2010. <https://doi.org/10.1243/14680874JER06409>
- [15] S. Jahangirian, A. Ghafourian, M. Abarham, and M. H. Saidi, "Effect of vortex flow on heat transfer to combustion chamber wall," vol. 4708, pp. 37-44, 2004. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-59550>
- [16] T. Seljak, U. Žvar Baškovič, and T. Kutrašnik, "Spatially selective dilution - A novel approach for heat release control in continuous combustion," *Journal of Environmental Management*, vol. 316, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115068>
- [17] Z. Song, D. Chang, H. Sun, X. Cheng, and H. Wang, "Suppression of flow-induced resonant cavity noise using mass flow injection," *Shengxue Xuebao/Acta Acustica*, vol. 48, no. 1, pp. 225-237, 2023. <https://dx.doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2023.01.030>
- [18] H. E. Hafsteinsson, L. E. Eriksson, N. Andersson, D. R. Cuppoletti, E. Gutmark, and E. Prisell, "Supersonic jet noise reduction using steady injection and flapping injection," In 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2013, p. 2144. <https://doi.org/10.2514/6.2013-2144>
- [19] B. E. Schmidt, N. P. Bitter, H. G. Hornung, and J. E. Shepherd, "Injection into supersonic boundary layers," *AIAA Journal*, vol. 54, no. 1, pp. 161-173, 2016. <https://doi.org/10.2514/1.J054123>
- [20] Z. Wang, J. Chang, Y. Li, and C. Kong, "Investigation of shock wave control by suction in a supersonic cascade," *Aerospace Science and Technology*, vol. 108, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106382>
- [21] J. Chang, Y. Du, S. Zheng, X. Duan, and Y. Liu, "Performance analysis of different influencing factors on film cooling and the internal relations with vortex structures," *AIP Advances*, vol. 9, no. 7, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5110726>
- [22] Z. Liu, W. Zhang, Y. Xie, Y. Ding, and Z. Feng, "Experimental Study on Influence of Mid-Passage Gap Leakage on Turbine Endwall Film Cooling Characteristics," *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University*, vol. 57, no. 5, pp. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.22044/jsfm.2025.15521.3928>
- [23] N. Balcazar-Arciniega, J. Rigola, and A. Oliva, "DNS of Mass Transfer in Bi-dispersed Bubbly Flows in a Vertical Pipe," *ERCOTAC Series*, pp. 55-61, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47028-8_9
- [24] A. K. Ray, *Coulson and Richardson's Chemical Engineering: Volume 2B: Separation Processes*, 2023.
- [25] H. Alvarez, "Teaching control into a mass transfer operations course," in 2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), Ibagué, Colombia, Oct. 2021, pp. 303-308.

<https://doi.org/10.1109/CCAC51819.2021.9633313>

- [26] F. A. Versteeg, F. Picchioni, and G. F. Versteeg, "On the mass transfer of supercritical fluids, specifically supercritical CO₂: An overview," *Chemical Engineering Journal*, vol. 493, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152521>
- [27] B. Özkaya, A. H. Kaksonen, E. Sahinkaya, and J. A. Puhakka, "Fluidized bed bioreactor for multiple environmental engineering solutions," *Water Research*, vol. 150, pp. 452-465, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.061>
- [28] P. Le Cloirec, S. Giraudet, N. Cimetiere, P. F. Biard, A. Couvert, and D. Wolbert, "Process modeling and environmental engineering," *Actualite Chimique*, no. 450, pp. 19-24, 2020.
- [29] A. Sharifi Haddad, H. Hassanzadeh, J. Abedi, and Z. Chen, "Impact of adsorption on mass transfer in fractured reservoirs," in *SPE Canada Heavy Oil Conference*, Calgary, AB, Canada, June 2012, SPE-157863-MS. <https://doi.org/10.2118/157863-MS>
- [30] J. Fan, S. Li, Z. Wu, and Z. Chen, "Diffusion and mixing in microfluidic devices," *Microfluidics for Pharmaceutical Applications: From Nano/Micro Systems Fabrication to Controlled Drug Delivery*, pp. 79-100, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812659-2.00003-X>
- [31] W. Y. Liu, W. Wang, X. J. Ju, Z. Liu, R. Xie, and L. Y. Chu, "Functional microparticles from multiscale regulation of multiphase emulsions for mass-transfer intensification," *Chemical Engineering Science*, vol. 231, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116242>
- [32] S. Shaheen, M. B. Arain, N. Ijaz, F. Z. Duraihem, and J. Hu, "Insights into metachronal propulsion's influence on Ellis fluid flow across tri-layers amid dynamic thermal transport: Theoretical study," *ZAMM Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, 2024. <https://doi.org/10.1002/zamm.202300977>
- [33] L. Reid, "An Introduction to Biomedical Computational Fluid Dynamics," *Advances in Experimental Medicine and Biology*, pp. 205-222, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76951-2_10
- [34] P. J. Cullen, *Food Mixing: Principles and Applications*, 2009.
- [35] J. Y. Oldshue, "Agitation," *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design, and Equipment: Third Edition*, pp. 109-133, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-2553-3.00007-6>
- [36] M. Farid, "Heat and Mass Transfer in Food Processing," *Handbook of Farm Dairy and Food Machinery*, pp. 367-390, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814803-7.00017-8>
- [37] Q. Yuan, X. Zhou, F. Zeng, K. D. Knorr, and M. Imran, "Investigation of concentration-dependent diffusion on frontal instabilities and mass transfer in homogeneous porous media," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 96, no. 1, pp. 323-338, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814803-7.00017-8>
- [38] M. A. Miranda, A. K. Yegya Raman, D. M. Lavenson, H. J. Subramani, S. A. Mohammad, and C. P. Aichele, "Gas Evolution Rates in Supersaturated Water-in-Oil Emulsions at Elevated Pressures," *Energy and Fuels*, pp. 8176-8183, 2019.
- [39] T. Kajiwara, and Y. Nakayama, "Capturing the efficiency of a melt-mixing process for polymer processing," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 44, no. 11, pp. 831-839, 2011. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01568>

- [40] N. Balcázar, O. Antepará, J. Rigola, and A. Oliva, "DNS of Drag-Force and Reactive Mass Transfer in Gravity-Driven Bubbly Flows," *ERCOFTAC Series*, pp. 119-125, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42822-8_16
- [41] B. Sundén, "On computational heat transfer in industrial applications," in Proc. ASME Heat Transfer Summer Conference, Minneapolis, MN, USA, July 2013, p. HT2013-V003T21A013. <https://doi.org/10.1115/HT2013-17289>
- [42] J. D. Ramsey, and K. Bell, "Applications: Heat exchangers for the process and energy industries," *CRC Handbook of Thermal Engineering, Second Edition*, pp. 459-500, 2017.
- [43] R. Herrmann-Heber, S. F. Reinecke, and U. Hampel, "Dynamic aeration for improved oxygen mass transfer in the wastewater treatment process," *Chemical Engineering Journal*, vol. 386, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122068>
- [44] D. S. N. Bharghava, T. Jana, and M. Kaushik, "A survey on synthetic jets as active flow control," *Aerospace Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 435-451, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42401-024-00301-5>
- [45] M. Krstić, "Mixing control for jet flows," *Combustion Processes in Propulsion: Control, Noise, and Pulse Detonation*, pp. 87-96, 2005.
- [46] A. Meyer, B. M. Sloyan, K. L. Polzin, H. E. Phillips, and N. L. Bindoff, "Mixing variability in the Southern Ocean," *Journal of Physical Oceanography*, vol. 45, no. 4, pp. 966-987, 2015. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0110.1>
- [47] C. Aepli, M. Berg, O. A. Cirpka, C. Holliger, R. P. Schwarzenbach, and T. B. Hofstetter, "Influence of mass-transfer limitations on carbon isotope fractionation during microbial dechlorination of trichloroethene," *Environmental Science and Technology*, vol. 43, no. 23, pp. 8813-8820, 2009. <https://doi.org/10.1021/es901481b>
- [48] A. Vailati, H. Bataller, M. M. Bou-Ali, M. Carpineti, R. Cerbino, F. Croccolo, S. U. Egelhaaf, F. Giavazzi, C. Giraudet, G. Guevara-Carrion, D. Horváth, W. Köhler, A. Mialdun, J. Porter, K. Schwarzenberger, V. Shevtsova, and A. De Wit, "Diffusion in liquid mixtures," *npj Microgravity*, vol. 9, no. 1, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41526-022-00246-z>
- [49] N. Ghasem, "Mass transfer modeling in nanofluids: Theoretical basics and model development," *Nanofluids and Mass Transfer*, pp. 247-271, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823996-4.00009-4>
- [50] C. Kleinstreuer, and Z. Xu, "Mathematical modeling and computer simulations of nanofluid flow with applications to cooling and lubrication," *Fluids*, vol. 1, no. 2, 2016. <https://doi.org/10.3390/fluids1020016>
- [51] J. Z. Jiang, S. Zhang, X. L. Fu, L. Liu, and B. M. Sun, "Review of gas-liquid mass transfer enhancement by nanoparticles from macro to microscopic," *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, vol. 55, no. 8, pp. 2061-2072, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02580-7>
- [52] J. X. Duan, L. Y. Zhu, and Z. B. Wang, "Research Progress of Liquid Heterogeneous Mixing Process," *Petrochemical Equipment*, vol. 50, no. 1, pp. 47-52, 2021. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2021.01.009>
- [53] B. N. Arzamasov, and V. N. Simonov, "Circulation method for depositing diffusion coatings," *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 52, no. 9-10, pp. 403-407, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9291-9>
- [54] A. Brun, H. Dihang, and L. Brunel, "Film formation of coatings studied by diffusing-wave spectroscopy," *Progress in Organic Coatings*, vol. 61, no. 2-4, pp. 181-191, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.09.041>

- [55] M. S. Tirumkudulu, and V. S. Punati, "Solventborne Polymer Coatings: Drying, Film Formation, Stress Evolution, and Failure," *Langmuir*, vol. 38, no. 8, pp. 2409-2414, 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c03124>
- [56] B. Ishtiaq, S. Nadeem, and J. Alzabut, "Thermal analysis of magnetized Walter's-B fluid with the application of Prabhakar fractional derivative over an exponentially moving inclined plate," *Physics of Fluids*, vol. 35, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0179491>
- [57] S. Ahmad, S. Ul Haq, F. Ali, I. Khan, and S. Eldin, "Free convection channel flow of couple stress casson fluid: A fractional model using Fourier's and Fick's laws," *Frontiers in Physics*, vol. 11, pp. 1031042, 2023. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1031042>
- [58] S. Abbas, Z. Nisa, M. Nazar, M. Amjad, H. Ali, and A. Jan, "Application of Heat and Mass Transfer to Convective Flow of Casson Fluids in a Microchannel with Caputo-Fabrizio Derivative Approach," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08351-1>
- [59] R. Reyaz, A. Q. Mohamad, Y. Lim, M. Saqib, and S. Shafie, "Analytical Solution for Impact of Caputo-Fabrizio Fractional Derivative on MHD Casson Fluid with Thermal Radiation and Chemical Reaction Effects," *Fractal and Fractional*, vol. 6, pp. 38, 2022. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6010038>
- [60] S. Yang, H. W. Zhou, and W. G. Ren, "A Unified Fractional Derivative Model for Darcian and Non-Darcian Flow in Porous Media," in *ISRM International Symposium - EUROCK 2020*, 2020, pp. ISRM-EUROCK-2020-019.
- [61] H. W. Zhou, and S. Yang, "Fractional derivative approach to non-Darcian flow in porous media," *Journal of Hydrology*, vol. 566, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.039>
- [62] J. Suzuki, M. Gulian, M. Zayernouri, and M. D'Elia, "Fractional Modeling in Action: a Survey of Nonlocal Models for Subsurface Transport, Turbulent Flows, and Anomalous Materials," *Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling*, vol. 5, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42102-022-00085-2>
- [63] A. Milovanov, and J. Rasmussen, "Turbulence spreading by resonant wave-wave interactions: A fractional kinetics approach," *Physical Review E*, vol. 109, 2024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.109.045105>
- [64] R. Reyaz, A. Q. Mohamad, Y. Lim, and S. Shafie, "Analytical Treatment for Accelerated Riga Plate on Fractional Caputo-Fabrizio Casson Fluid," *CFD Letters*, vol. 15, pp. 114-131, 2023. <https://doi.org/10.37934/cfdl.15.4.114131>
- [65] M. Shahrim, A. Q. Mohamad, L. Jiann, M. Zakaria, S. Shafie, Z. Ismail, and A. Kasim, "Exact Solution of Fractional Convective Casson Fluid Through an Accelerated Plate," *CFD Letters*, vol. 13, pp. 15-25, 2021. <https://doi.org/10.37934/cfdl.15.4.114131>
- [66] A. Abouelregal, M. Marin, A. Foul, and S. S. Askar, "Coupled responses of thermomechanical waves in functionally graded viscoelastic nanobeams via thermoelastic heat conduction model including Atangana-Baleanu fractional derivative," *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.
- [67] A. Soleiman, A. Abouelregal, M. Fahmy, and H. M. Sedighi, "Thermomechanical Behavior of Functionally Graded Nanoscale Beams Under Fractional Heat Transfer Model with a Two-Parameter Mittag-Leffler Function," *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 48, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00698-y>

- [68] S. Ahmed, M. Mansour, E. Abdel-Salam, and E. Mohamed, "Effects of the Caputo fractional derivatives on convective flow in wavy vented enclosures filled with a porous medium using $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$ hybrid nanofluids," *Heat Transfer*, vol. 49, 2020. <https://doi.org/10.1002/htj.21699>
- [69] R. Baithalu, S. R. Mishra, and S. Panda, "Heat transfer and flow dynamics of methanol-based CuO and MgO hybrid nanomaterial in convergent and divergent channels: a Jeffery–Hamel flow study," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 149, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13914-x>
- [70] A. Boudjemline, I. Ahmad, S. Rehman, H. Ali, and N. ben khedher, "Jeffery–Hamel flow extension and thermal analysis of Oldroyd-B nanofluid in expanding channel," *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, vol. 48, 2022. <https://doi.org/10.1515/jnet-2022-0052>
- [71] O. Edward Richard, K. Mathew Ngugi, K. Mark, and U. Surindar Mohan, "Unsteady Jeffrey-Hamel Flow in the Presence of Oblique Magnetic Field with Suction and Injection," *Applied and Computational Mathematics*, vol. 9, no. 1, pp. 1-13, 2020.
- [72] S. Hamrelaine, F. Mebarek-Oudina, and M. Rafik, "Analysis of MHD Jeffery Hamel Flow with Suction/Injection by Homotopy Analysis Method," vol. 58, pp. 173-186, 2019.
- [73] O. Edward Richard, K. Mathew Ngugi, K. Mark, and U. Surindar Mohan, "Heat and Mass Transfer on MHD Jeffrey-Hamel Flow in Presence of Inclined Magnetic Field," *Applied and Computational Mathematics*, vol. 9, no. 4, pp. 108-117, 2020. <https://doi.org/10.11648/j.acm.20200904.11>
- [74] h. Ravanbod, M. Hajihasani, Y. Farjami, and E. Norouzi, *Developing an Adaptive Fractional Model of a Magnetic Structure using Evolutionary Algorithm*, 2008. <https://doi.org/10.1109/ICCCYB.2008.4721403>
- [75] P. B. Ghaleh, A. A. Khayyat, Y. Farjami, and A. Abedian, "Approximate analytical solutions of an axially moving spacecraft appendage subjected to tip mass," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 228, no. 9, pp. 1487-1497, 2013. <https://doi.org/10.1177/0954410013494140>
- [76] A. K. Sahoo, and S. Chakraverty, "Curriculum Learning-Based Artificial Neural Network Model for Solving Differential Equations," pp. 129-145, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4713-0_6
- [77] J. Guo, Y. Chen, J. Hu, Z. Xu, and C. Ma, "Numerical study on the flow and heat transfer of molten salt in a horizontal pipe applied transverse magnetic field," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 192, pp. 108416, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108416>
- [78] S. M. Živojin, D. D. Nikodijević, B. D. Blagojević, and S. R. Savić, "MHD flow and heat transfer of two immiscible fluids between moving plates," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 34, no. 3-4, pp. 351-372, 2010. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2010-0021>

Force and Stress Analysis of the Pin of an Induction Furnace Pusher: The Effect of Radial and Axial Clearance between the Involved Members and the Length of the Pin Support

Research Article

Mohamad Sadegh Mirjalili¹, Mohammad Jafari Gelooyak² , Mohsen Soltani³

 [10.22067/jacsm.2025.88795.1276](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.88795.1276)

Abstract: In this paper, the investigation and analysis of a pin in the pusher of the induction furnace was carried out numerically. First, by simulation of the pusher mechanism in MATLAB's SimScape/SimMechanics toolbox, the force on the pin was calculated in the worst-case condition of the device. Then, the pin was simulated and analyzed in the finite element software Abaqus. The obtained results showed that with the increase in axial and radial clearance, the maximum amount of stress and the area with high stress distribution intensity in the pin increased. Also, the increase in axial clearance causes the stress distribution to be drawn to the supports. With the increase in radial clearance, the arc forming the contact area of the pin and supports decreases and the loads are concentrated at the lower area and will have an effect of impact loading. Also, increasing the length of the involved support for zero radial clearance has no effect on the stress distribution on the pin. Therefore, excessive length only results in additional costs.

Keywords: Pin, Stress analysis, Radial clearance, Axial clearance, Finite element

1. Introduction

Insufficient knowledge and inadequate research regarding pin dimensions, axial clearance, and length of the involved support cause the pin to fail under the applied loads, ultimately resulting in structural damage. Generally, through proper analyses, the most suitable dimensions and clearances for pins can be obtained to reduce maintenance and repair costs while extending the service life of structures. Grant et al. established through parametric studies that for specific geometry ratios, such as width-to-hole diameter greater than 4, there is minimal variation in maximum circumferential stress [1]. Additionally, Aslam et al. demonstrated that the boundary element method provides a robust alternative for capturing steep stress gradients in lugs where displacements and tractions are represented independently [2].

Despite valuable research conducted in the field of pins, no comprehensive study has been performed to date on pin force analysis, pin stress analysis, investigation of

the effects of axial clearance between the involved support and the loaded member, the effect of radial clearance between the pin and engaged members, and the effect of length of the involved support. While research exists for longitudinal loads, Strozzi et al. have provided critical interpolating expressions for maximum equivalent stress in lugs specifically subject to inclined or off-axis loading [3]. Furthermore, Antoni and Gaisne expanded the field by developing analytical models that utilize Fourier series to evaluate stress distributions in lugs featuring complex bush fittings and elastoplastic expansion [4]. Therefore, this paper addresses the force and stress analysis of pins installed in the induction furnace pusher.

2. Simulation

In this paper, the pin located at the connection point between the stick and connecting rod in the pusher of the induction furnace was subjected to a static force analysis under the most critical operating conditions. The pin has a diameter of 70 millimeters and a length of 275 millimeters. The length of the surrounding support is 100 millimeters, positioned at a distance of 2.5 millimeters from the middle support. In addition, the middle support exerts a load of 174,000 newtons on the pin over a length of 70 millimeters. Figure 1 shows the actual image of the analyzed pin.

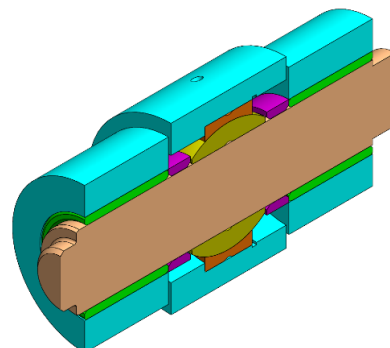


Fig. 1. Actual Image of the Analyzed Pin

* Manuscript received July 05, 2024, Revised July 28, 2025, Accepted September 21, 2025.

¹ M.S Graduate, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

² Corresponding author: Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Email: m.jafari@yazd.ac.ir.

³ PhD graduate, Hoshyar Drayat Rahvar Machine Company (HIDRAM), Yazd, Iran.

3. Results and Discussion

It is initially assumed that the pin has only axial clearance and its radial clearance is considered to be zero for the pin simulation analysis,. Subsequently, the effects of axial clearance and length of the involved support are investigated. Finally, the performed analyses are repeated with radial clearance included, and its effects are examined.

By analyzing the pin specified in Figure 1 using the static solver of ABAQUS finite element analysis software, the stress flow in the pin can be observed in Figure 2. Figure 2 shows the stress distribution in the pin for zero radial clearance and 2.5 millimeter axial clearance. It can be seen from the figure that the maximum stress value is 69.6 MPa. To examine stress variations, a line was drawn 4 millimeters below the upper surface of the pin from the location of maximum stress according to Figure 2-b. The stress flow along this path was investigated for all different conditions of axial clearances, radial clearances and length of the involved support.

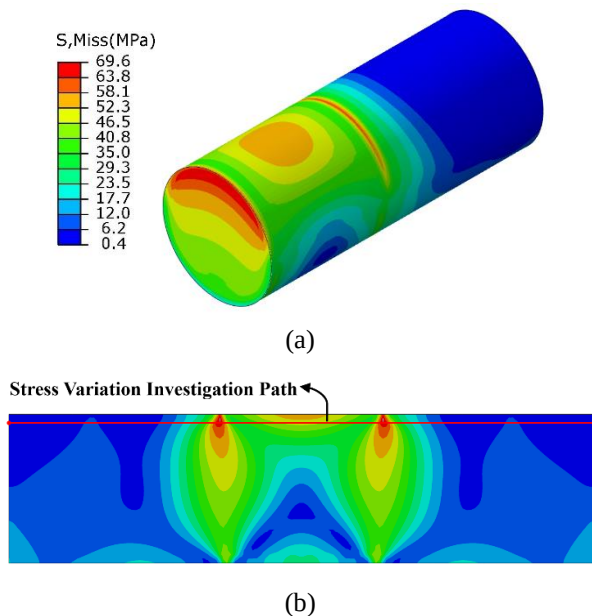


Fig. 2. a) Stress distribution in cross-section of the pin with 2.5 axial clearance and without radial clearance and b) Stress distribution in longitudinal section of the pin

The variation of von Mises stress along the pin length for variable support lengths can be observed in Figure 3. This figure confirms that the longitudinal stress flow in the pin is independent of the surrounding support lengths. The maximum von Mises stress will not change with increasing involved support length.

Subsequently, the effect of axial clearance on the stresses applied to the pin is investigated. Figure 4 shows the variation of von Mises stress along the pin length for variable axial clearance. This figure confirms that the longitudinal stress flow in the pin is dependent on the axial clearance. An increase in axial clearance leads to an increase in the stress within the pin. This observed stress concentration is supported by Li et al., who introduced a calculated width coefficient to modify the standard Hertz

stress model for higher accuracy in clearance-fit designs [5]. The non-linear complexities introduced by such clearances can be normalized using a dimensionless load factor, which describes how the stress field asymptotically approaches a receding contact state [6].

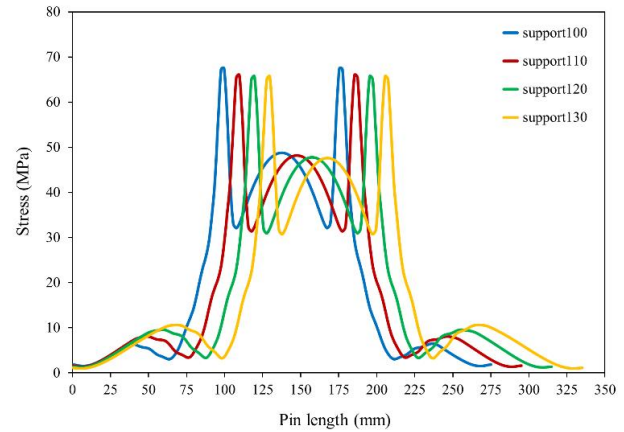


Fig. 3. Von Mises stress variations for zero radial clearance, fixed axial clearance and variable support length

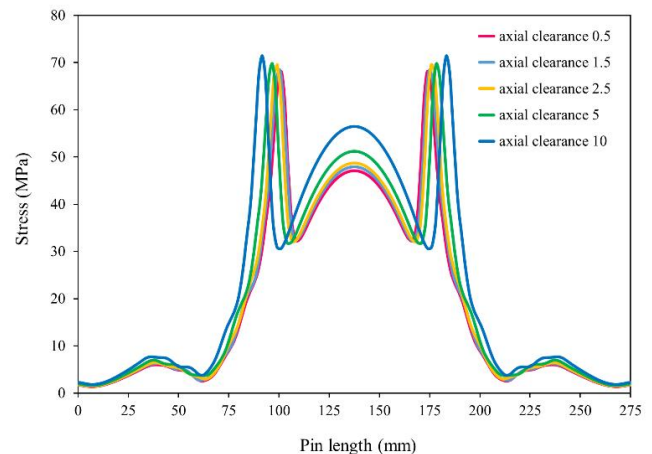


Fig. 4. Von Mises stress variations for zero radial clearance and variable axial clearance

Figure 5 shows the variation of maximum von Mises stress at a constant radial clearance of 0.5 and variable axial clearance. As can be observed from this figure, the maximum stresses increase with increasing the radial clearance compared to the condition without radial clearance, and the stress distribution extends further into the side supports. The extension of stress flow into the side supports becomes more pronounced with increasing axial clearance. In addition, an increase in axial clearance leads to an increase in stress that is greater than the increase in stress in the state without radial clearance.

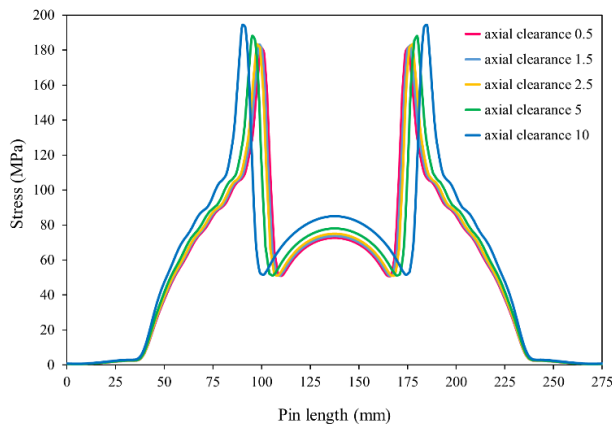


Fig. 5. Von Mises stress variations for 0.5 mm radial clearance and variable axial clearance

Figure 6 shows the variation of maximum von Mises stress at a constant axial clearance of 2.5 mm and variable radial clearance. As can be observed from this figure, the maximum stresses increase with increasing radial clearance, but the extent of this increase decreases with increasing clearance. As radial clearance increases, the arc forming the contact area between the pin and the bearing supports decreases, and the loads are applied with greater concentration at the corner points of the side supports. Radi and Strozzi's 2D analytical solutions confirm that these clearances result in distinct "pressure bumps" at contact extremities rather than point forces, matching your observation of concentrated loads at corner points [7]. Similarly, Marouani and Hassine proposed parabolic distribution models for these contact regions, allowing designers to promptly approximate contact pressure under varying load angles [8].

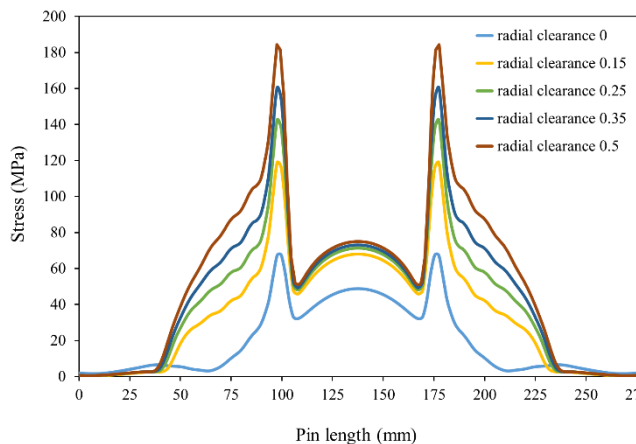


Fig. 6. Von Mises stress variations for constant axial clearance of 2.5 mm and variable radial clearance

4. Conclusion

The numerical analysis of the pin demonstrated that axial and radial clearances have a significant effect on stress distribution. An increase in axial clearance leads to an increase in stress and its transfer to the bearings, while radial clearance has a greater influence on stress changes than axial clearance, although the extent of this increase decreases with increasing radial clearance. It was also

found that bearing support length has no effect on stress when there is no radial clearance. Taking into account the interactions of both types of clearance, as well as design and manufacturing constraints, it is ultimately possible to achieve optimal stress by striking an appropriate balance between increasing axial clearance and reducing radial clearance, or vice versa. This insight can serve as a useful guide for optimizing pin design.

5. Reference

- [1] R. J. Grant, J. Smart, and P. Stanley, "A parametric study of the elastic stress distribution in pin-loaded lugs," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 29, no. 4, pp. 299-307, 1994. <https://doi.org/10.1243/03093247V294299>
- [2] A. Aslam, G. S. Sekhon, and R. Kumar, "Elastic Analysis of A Pin Loaded Lug," *Journal of Aircraft*, vol. 41, no. 2, pp. 365-371, 2004. <https://doi.org/10.2514/1.222>
- [3] A. Strozzi, A. Baldini, and M. Nascimbeni, "Maximum Equivalent Stress in a Pin-Loaded Lug Subject to Inclined Loading," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 41, no. 4, pp. 297-309, 2006. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA150>
- [4] N. Antoni and F. Gaisne, "Analytical modelling for static stress analysis of pin-loaded lugs with bush fitting," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35, no. 1, pp. 1-21, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.05.002>
- [5] Y. Li, R. Huang, S. Zhao, and J. Wang, "Contact pressure analysis of pin-loaded lug with clearance," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 6, 2022. <https://doi.org/10.1177/16878132221107475>
- [6] M. Ciavarella, A. Baldini, J. R. Barber, and A. Strozzi, "Reduced dependence on loading parameters in almost conforming contacts," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 48, no. 9, pp. 917-925, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.03.016>
- [7] E. Radi and A. Strozzi, "Advancing contact of a 2D elastic curved beam indented by a rigid pin with clearance," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 149, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104313>
- [8] H. Marouani and T. Hassine, "A stress distribution modelization of a neat fit pin-loaded hub," *World Journal of Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 414-421, 2018. <https://doi.org/10.1108/WJE-03-2017-0057>



تحلیل نیرویی و تنش پین پوشر کوره القائی: تأثیر لقی شعاعی و محوری بین اعضای درگیر و طول تکیه گاه پین*

مقاله پژوهشی

محسن سلطانی^(۳)محمد جعفری^(۲)محمدصادق میرجلیلی^(۱)

doi 10.22067/jacsm.2025.88795.1276

چکیده در این مقاله به بررسی و تحلیل یک پین در پوشر کوره القائی پرداخته شده است. ابتدا با شبیه سازی پوشر در محیط سیم مکانیک از نرم افزار متلب، نیروی وارد بر پین در بدترین حالت کاری دستگاه محاسبه گردید. سپس به شبیه سازی و تحلیل پین در نرم افزار المان محدود آباکوس پرداخته شد. اثر لقی محوری بین تکیه گاه و عضو تحت بارگذاری، اثر لقی شعاعی بین پین و عضوهای درگیر و اثر طول تکیه گاه، روی تنش های وارد بر پین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد که با افزایش لقی محوری و لقی شعاعی، مقدار بیشینه تنش در داخل پین افزایش می یابد. همچنین افزایش لقی محوری باعث می شود که توزیع تنش به داخل تکیه گاه ها کشیده شود. با افزایش لقی شعاعی، کماتی که سطح تماس پین و تکیه گاه ها را تشکیل می دهد کاهش می یابد و بارها در محل گوشه تکیه گاه های کناری با تمرکز بیشتری وارد می شوند و اثر ضربه ای خواهند داشت. همچنین افزایش طول تکیه گاه درگیر برای لقی شعاعی صفر تأثیری روی تنش های وارد بر پین ندارد، لذا بزرگ گرفتن بیش از حد آن، فقط باعث هزینه اضافی می شود.

واژه های کلیدی پین، تحلیل تنش، لقی شعاعی، لقی محوری، المان محدود.

مقدمه

وارد شده ارزیابی می شوند که آیا آن ها در طی کارکرد واقعی دستگاه می توانند تنش های وارد شده را تحمل کنند یا دچار شکست می شوند. تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه، نقش مهمی در تعیین استحکام قطعات در تولید محصول نهایی دارد که باعث می شود قطعات استفاده شده در محصول نهایی از لحاظ ایمنی مورد تأیید باشند و در طی عملکرد دستگاه در بحرانی ترین حالات، دچار شکست یا گسیختگی نشوند. اگر قطعه ای نتواند با موفقیت این مرحله را بگذراند و استحکام آن مورد تأیید نباشد، فرایند طراحی مجدداً تکرار می شود تا زمانی که از لحاظ تحلیل مورد تأیید قرار بگیرد. برای این منظور ممکن است جنس قطعه، ابعاد قطعه و لقی های آن تغییر کند. عدم دانش و تحقیق کافی نسبت به ابعاد پین، لقی محوری و طول تکیه گاه های درگیر سبب

پین وسیله ای است برای جلوگیری از جابه جایی نسبی بین قطعات و حفظ کردن وضعیت اجزای گردان که برای اتصال و انتقال حرکت مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع اتصال اجازه می دهد که شی در نقطه اتصال مفصل ها چرخش داشته باشد. اغلب دستگاه های مکانیکی که به طور معمول نیاز به خم شدن و یا باز کردن دارند از این اتصال استفاده می کنند؛ لذا پین جزو عضوهای پرکاربرد در ماشین آلات معدنی، راه سازی و حتی فولادی است.

برای تحلیل و بهینه سازی هر یک از پین های دستگاه های مختلف، بعد از به دست آوردن نیروهای وارد بر پین ها در بحرانی ترین حالات کاری، از لحاظ استحکام در برابر بارهای

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۶/۳۰ می باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

(۳) فارغ التحصیل دکتری، شرکت هوشیار درایت راهور ماشین، یزد، ایران

ایجاد سطح تماس کوچک‌تری می‌شود. در نهایت آن‌ها رابطه‌ای برای محاسبه حداکثر فشار تماسی تکیه‌گاه بر اساس مدل بارگذاری و توزیع تنش معرفی کردند [4]. استروزی و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی بیشینه تنش معادل الاستیک در پین تحت تأثیر بار، نسبت قطر سوراخ به عرض تکیه‌گاه و زاویه انتهایی تکیه‌گاه پرداختند و اثرات طول تکیه‌گاه و لقی اولیه میان پین و تکیه‌گاه را بررسی کردند. در نهایت یک عبارت درونیابی برای محاسبه بیشینه تنش معادل الاستیک به عنوان تابعی از نسبت قطر سوراخ به عرض تکیه‌گاه، زاویه انتهایی تکیه‌گاه و زاویه اعمال بار پیشنهاد دادند [5]. سیوارلا و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی بر روی پین یافتند که در تماس بدون اصطکاک پین با تکیه‌گاه، سطح تماس معمولاً یا کاهش می‌یابد و یا ثابت باقی می‌ماند در این صورت سطح تماس مستقل از بار است و میدان تنش و جابه‌جایی به طور خطی با پارامترهای بارگذاری تغییر می‌کند [6]. استروزی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی بیشینه تنش تماسی داخل پین پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که برای بارهایی با شیب صفر الی ۴۵ درجه، حداکثر تنش معادل خارج از منطقه تماس رخ می‌دهد و برای بارهای عرضی، حداکثر تنش معادل در نسبت‌های پایین قطر پین به عرض تکیه‌گاه در ناحیه تماس رخ می‌دهد و برای نسبت‌های بالا، حداکثر تنش معادل به سمت خارج از محل تماس حرکت می‌کند [7].

گرت و همکاران (۱۹۹۴) به بررسی اولیه عمر خستگی اتصالات پین پرداختند. آن‌ها اثر تغییر پهنای تکیه‌گاه، موقعیت پین نسبت به انتهایی تکیه‌گاه و لقی پین در تکیه‌گاه را بر روی حداکثر تنش محیطی در اطراف پین بررسی کردند. آن‌ها نسبت عرض تکیه‌گاه به قطر پین، فاصله مرکز سوراخ از انتهایی آزاد تکیه‌گاه به قطر پین و تداخل پین را بر روی بزرگی و موقعیت حداکثر تنش محیطی در اطراف سوراخ مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که تداخل پین و تکیه‌گاه یک اثر بسیار مهم بر روی حداکثر تنش دارد و برای نسبت‌های عرض تکیه‌گاه به قطر پین بیش از ۴ و نسبت‌های ارتفاع تکیه‌گاه به قطر پین بیش از ۳، تغییرات حداکثر تنش کم خواهد بود [8]. استریچ و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی یک پین تحت بارگذاری توسط کرنش‌سنج در مکان‌های زاویه‌ای متعدد پرداختند. آن‌ها آزمایش‌هایی برای شرایط تماسی روغنکاری شده و روغنکاری نشده به منظور بررسی اصطکاک انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که یک لقی

می‌شود که پین نتواند نیرویی را که بر آن وارد می‌شود، تحمل کند و بشکند یا پین در درازمدت در جای خود هرز می‌شود و جای خود را گشاد می‌کند که در نهایت به سازه آسیب می‌رساند و خسارات جانی و مالی را در پی دارد. به طور کلی با تحلیل‌های درست می‌توان مناسب‌ترین ابعاد و لقی‌ها را برای پین‌ها به دست آورد تا هزینه‌های تعمیر و نگهداری کاسته شود و عمر کارکرد سازه‌ها افزایش یابد.

اسلام و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی تکیه‌گاه با پین صلب درون آن پرداختند و توزیع تنش را در مرز سوراخ تکیه‌گاه به دست آوردند. آن‌ها مشاهده کردند که با تغییر زاویه اعمال نیرو، میزان تنش تغییر می‌کند و تنش در محدوده زاویه خاصی به بیشترین میزان خود می‌رسد سپس به سرعت کاهش می‌یابد و پس از آن دچار کاهش تدریجی می‌شود. آن‌ها همچنین اثر طول تماس پین را بررسی کردند و مشاهده کردند که افزایش لقی پین و تکیه‌گاه، زاویه تماس را کاهش می‌دهد. در حالی که افزایش بار، تمایل به افزایش زاویه تماس دارد [1]. رادی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی دوبعدی پین پرداختند و روابط غیر خطی بین بار اعمالی، زاویه تماس و توزیع فشار ایجاد شده را به دست آوردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که توزیع هرتزی برای سطوح با بار کم و ناحیه تماس کوچک صدق می‌کند در حالی که برای ناحیه‌های تماسی بزرگ و بارهای بیشتر، فشار در مرکز ثابت می‌ماند و بیشینه فشار در نزدیکی انتهایی زاویه تماس رخ می‌دهد [2]. طالبی قادیکلایی و همکاران (۲۰۲۴) پدیده شکست نرم در فرایند شکل‌دهی غلتکی یک‌مرحله‌ای را با استفاده از معیار موهر - کلمب اصلاح شده بررسی کردند و تأثیر پارامترهای فرایند شامل ضخامت، زاویه خم و شعاع گوشه بر توزیع آسیب را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که افزایش ضخامت ورق و زاویه خم منجر به افزایش سطح آسیب می‌شود، در حالی که افزایش شعاع خم موجب کاهش آسیب و تأخیر در وقوع شکست می‌گردد. این مطالعه با ارائه درک عمیق‌تری از مکانیک تغییر شکل و نحوه توزیع تنش در فرایندهای شکل‌دهی، اهمیت تحلیل دقیق اجزای مکانیکی تحت بارگذاری پیچیده را برجسته می‌سازد [3].

لی و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی سه مدل توزیع فشار وارد بر پین پرداختند و مشاهده کردند که فشار تماسی با افزایش ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد و لغزش سطح تماس منجر به

تکیه‌گاه‌ها را نشان دادند [14]. کامر و همکاران (۲۰۱۸) به تحلیل عملکردی مفصل بند انگشتی با استفاده از مواد مختلف پرداختند و مشاهده کردند که برای مواد فیبر کربنی و الیاف آلومینا تغییر شکل کلی مفصل کمتر است [15]. نظری و حسینی نیک (۲۰۲۵) به بررسی تأثیر پارامترهای سرعت، فشار و ضریب اصطکاک بر توزیع دما در سیستم‌های لغزشی خطی پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد پارامترهای عملیاتی تأثیر قابل توجهی بر رفتار حرارتی و مکانیکی سیستم‌های تماسی دارند و این رویکرد اهمیت کنترل دقیق پارامترهای طراحی در جلوگیری از شکست زودرس قطعات مکانیکی را برجسته می‌سازد [16].

با توجه به تحقیقات ارزشمند انجام شده در زمینه پین‌ها، تا کنون تحقیق جامعی در مورد تحلیل نیرویی پین، تحلیل تنش پین و بررسی اثرات لقی محوری بین تکیه‌گاه و عضو تحت بارگذاری، اثر لقی شعاعی بین پین و عضوهای درگیر و اثر طول تکیه‌گاه انجام نشده است؛ لذا در این مقاله به تحلیل نیرو و تنش پین قرار گرفته در سازه پوشر کوره القایی پرداخته می‌شود. اثرات طول تکیه‌گاه درگیر، لقی محوری و لقی شعاعی بر روی تنش‌های وارد بر پین بررسی می‌گردد؛ لذا در بخش مدل‌سازی در مورد مدل‌سازی پین، تحلیل نیرویی پین و شبیه‌سازی آن با نرم‌افزار المان محدود آباکوس بحث می‌شود. در بخش ارائه نتایج و بحث به بررسی نتایج شبیه‌سازی و تحلیل تنش وارد بر پین با در نظر گرفتن لقی بین دو عضو درگیر و تحلیل طول تکیه‌گاه درگیر در حالت‌های لقی شعاعی صفر و لقی شعاعی متغیر پرداخته می‌شود.

مدل‌سازی

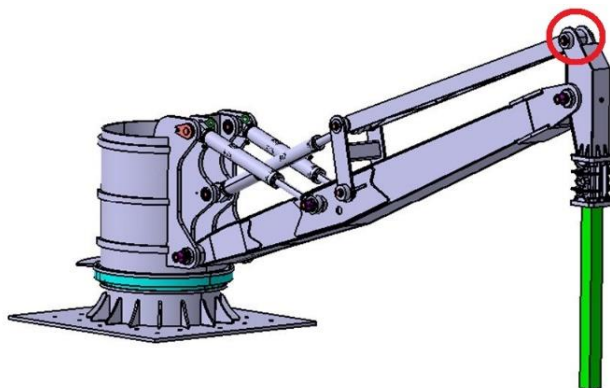
در این مقاله، پین موجود در محل اتصال قسمت استیک به شاتون در دستگاه پوشر کوره ذوب‌آهن القایی ساخته شده توسط شرکت دانش‌بنیان هیدرام مورد تحلیل نیروی استاتیکی در بحرانی‌ترین حالات کاری قرار گرفت. شکل (۱) پوشر کوره ذوب آهن القایی و موقعیت پین مورد نظر را نشان می‌دهد. برای محاسبه نیروی وارد بر پین، مکانیزم در محیط سیم مکانیک از توبلاکس سیم-اسکیپ نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. مطابق شکل (۲) در این محیط می‌توان به کمک بلوک‌های استاندارد، انواع مکانیزم‌ها را شبیه‌سازی کرد. در این محیط می‌توان مکانیزم‌ها را با ترکیبی از بلوک‌های فیزیکی نشان‌دهنده جرم‌ها و انواع قیود و اتصالات مدل‌سازی کرده و با قرار دادن انواع حسگر و عملگر روی اجرام

اولیه میان پین و سوراخ تکیه‌گاه منجر به ایجاد سطح کوچک‌تری در یک بار معین می‌شود که سبب تنش‌های بزرگ‌تری در تماس می‌شود. همچنین مشاهده کردند که در حالتی که بار با زاویه صفر درجه اعمال می‌شود اثرات اصطکاک در اطراف مرکز تماس بیشتر است و سبب می‌شود تنش محیطی و فشار تماسی کاهش یابد [9]. واردی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثرات لقی مفصل لولایی بر رفتار سینماتیکی ربات موازی صفحه‌ای 3RPR پرداختند و نشان دادند که وجود لقی در مفصل باعث افزایش قابل توجه مقادیر سرعت و شتاب، ایجاد خطاهای موقعیت‌یابی و انحراف مسیر می‌شود. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل دینامیکی آدامز، تأثیرات لقی را در دو حالت ایدئال (بدون لقی) و واقعی (با لقی) مقایسه کردند و مشخص کردند که لقی مفصل منجر به تولید ضربه، شوک و ارتعاشات در حین عملکرد مکانیزم می‌گردد [10].

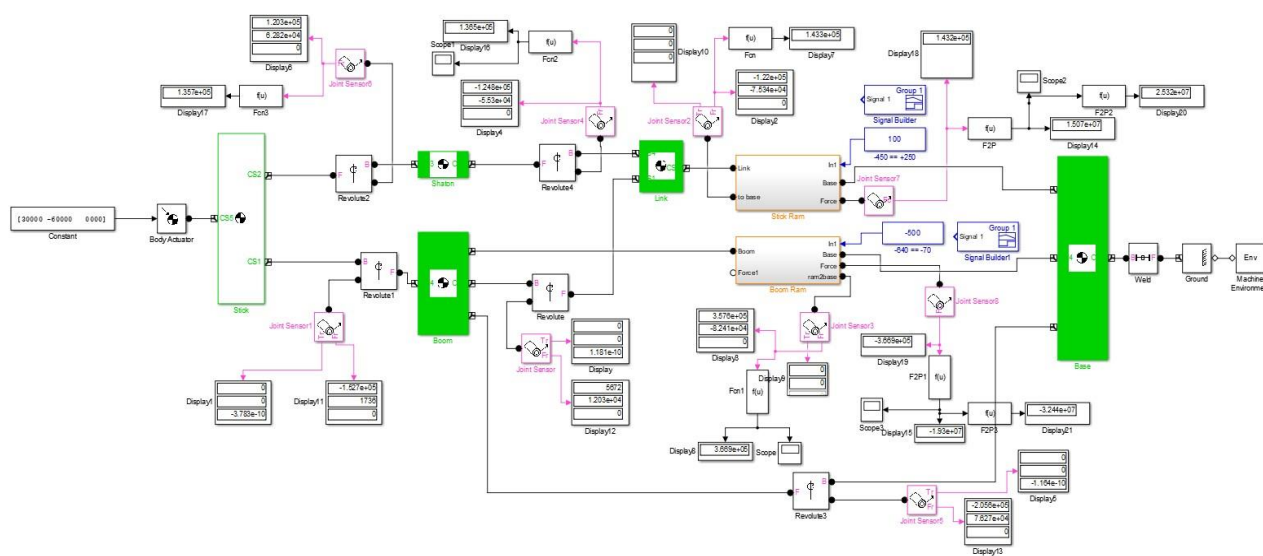
آنتونی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی تغییر شکل پین، بوش، تغییرات تنش‌های شعاعی و محیطی آن پرداختند و مشاهده کردند که محل حداکثر تنش در انطباق‌های مختلف یکسان باقی می‌ماند [11]. ماروآنی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی مجموعه پین و بوش تحت نیروهای شعاعی متفاوت پرداختند و مشاهده کردند که توزیع فشار وارد به تکیه‌گاه در امتداد سطح تماس توسط نیروهای وارد تحت زاویه‌های مختلف از صفر الی ۱۸۰ درجه، یک توزیع سهموی است و نتایج برای تمامی زاویه‌های دیگر معتبر است و طول سطح تماس با تقریب π خواهد بود. در ادامه آن‌ها توزیع فشار را برای زاویه‌های مختلف بارگذاری با نیروی ثابت محاسبه کردند و در قالب چندین نمودار ارائه دادند [12]. داتی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی علت شکست پین تراکتور پرداختند و پین‌هایی با جنس‌های متفاوت و قطرهای یکسان را در شرایط نیرویی یکسان مورد بررسی قرار دادند و اثر تغییر جنس پین را بر تنش برشی به دست آوردند. آن‌ها اثر قطر را نیز بررسی کردند و مشاهده کردند که با افزایش قطر پین، تغییر شکل کلی پین، تنش‌های معادل و تنش‌های برشی کاهش می‌یابد [13]. مارمورینی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تداخل بوش و شاتون پرداختند و مشاهده کردند که اگر مقدار تداخل از حدی کاهش یابد سبب شل شدن بوش در شاتون می‌شود. آن‌ها با تهیه نمودارهایی امکان تعیین تداخل اولیه برای کاهش شل شدن بوش در تکیه‌گاه را دادند و حداکثر تنش الاستیک ایجاد شده در

طرف کارفرما تعیین می‌شود) و مقایسه نیروهای وارد شده بر پین اتصال استیک به شاتون برای حالت‌های کاری مختلف، نشان داده شد که بیشینه نیروی وارد بر این پین در بدترین شرایط ۱۷۴۰۰۰ نیوتن است.

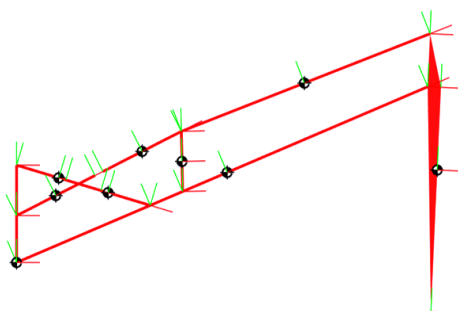
یا اتصالات در هر نقطه دلخواه، مفاصل مختلف را تحریک کرد و نیروهای اعمالی روی اجزای مکانیزم را در حین کار محاسبه کرد. با توجه به بار مطلوب فشاری ۷۰ کیلونیوتن توسط بیلست سر پوش (این مقدار، نیروی مورد نیازی است که پوشر باید توان اعمال آن را داشته باشد. این نیرو با توجه به نوع کارکرد پوشر از



شکل ۱ پوشر کوره ذوب القایی آهن



(الف)



(ب)

شکل ۲ نحوه پیاده‌سازی پوشر در محیط سیم مکانیک از تولباکس سیم‌اسکیپ نرم‌افزار متلب برای تحلیل نیرو: (الف) مدل بلوک دیاگرام و (ب) مدل استخوان‌بندی مکانیزم

دست آوردن نیرو و گشتاور تکیه‌گاهی می‌توان مقدار بیشینه تنش فون میزس در پین را به کمک فرمول‌های (۱)، (۲) و (۳) محاسبه کرد.

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (۱)$$

$$\tau_{avg} = \frac{V}{\pi r^2} \quad (۲)$$

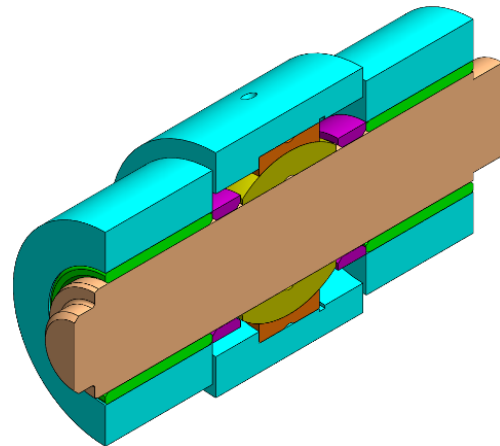
$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau_{avg}^2} \quad (۳)$$

در روابط بالا σ تنش عمودی ناشی از گشتاور خمشی، M گشتاور تکیه‌گاه، d قطر پین، τ_{avg} تنش برشی متوسط، V نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه، r شعاع پین و σ_v تنش فون میزس است. در ادامه به جزئیات شبیه‌سازی المان محدود پین پرداخته می‌شود. جنس ماده استفاده شده برای شبیه‌سازی پین، مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است. همچنین برای شبکه‌بندی المان محدود از المان‌های پیوسته مکعبی ۸-نود با انتگرال‌گیری کاهش یافته (C3D8R) استفاده می‌شود. بعد از بررسی وابستگی نتایج به مش، ۱۸۰۰۰۰ المان برای شبیه‌سازی استفاده شد. تماس میان پین و تکیه‌گاه‌ها با ضریب اصطکاک ۰/۰۵ در نظر گرفته شد که از روش پنالتی برای شبیه‌سازی تماس پین و تکیه‌گاه‌ها استفاده گردیده است. شکل (۴) پین مش‌بندی شده را نشان می‌دهد. شکل (۵) شرایط مرزی و بارگذاری وارد بر پین را نشان می‌دهد. با استفاده از نیروهای به دست آمده از نرم‌افزار متلب، نیروی ۱۷۴۰۰۰ نیوتن بر پین وارد گردید. برای شرایط مرزی، کلیه درجات آزادی دو تکیه‌گاه کناری بسته شد. برای تکیه‌گاه وسط، تنها درجه آزادی جابه‌جایی در راستای عمود بر محور پین به منظور قابلیت جابه‌جایی بر اثر اعمال نیرو باز و مابقی درجات آزادی بسته در نظر گرفته شد. برای تحلیل تنش از حلگر استاتیکی نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد.

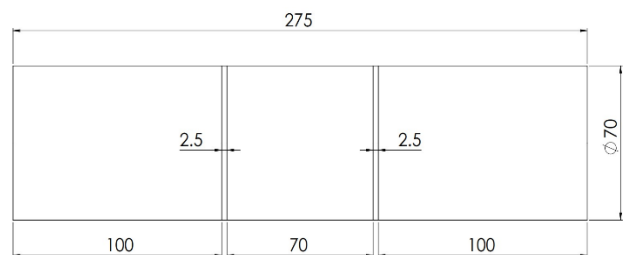
جدول ۱ مشخصات ماده استفاده شده برای شبیه‌سازی پین

Yield strength (N/mm ²)	Young's modulus (N/mm ²)	Poisson's ratio	Density (Kg/m ³)
۳۵۵	۲۱۰۰۰۰	۰/۳	۷۸۵۰

پین مورد نظر دارای قطر ۷۰ میلی‌متر و طول ۲۷۵ میلی‌متر است. طول تکیه‌گاه‌های درگیر اطراف آن ۱۰۰ میلی‌متر است که با ۲/۵ میلی‌متر لقی از تکیه‌گاه وسط قرار گرفته‌اند. همچنین تکیه‌گاه وسط، بار ۱۷۴۰۰۰ نیوتن را در طول ۷۰ میلی‌متر به پین وارد می‌کند. در شکل (۳) تصویر واقعی و شماتیک پین تحلیل شده نمایش داده شده است.



(الف)

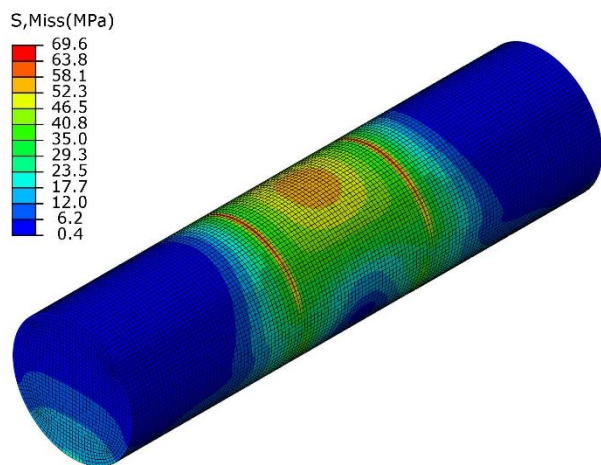


(ب)

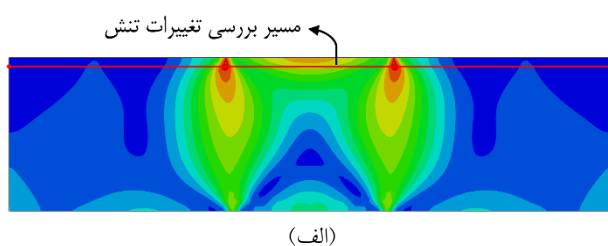
شکل ۳ (الف) تصویر واقعی پین و (ب) تصویر شماتیک پین

برای تحلیل تئوری تیر، فرض می‌شود پین تنها لقی محوری دارد و لقی شعاعی آن صفر در نظر گرفته شده است. اثرات لقی محوری و طول تکیه‌گاه درگیر بررسی می‌شوند. پین با لقی شعاعی صفر همانند تیری با تکیه‌گاه دو سرگیردار است زیرا تکیه‌گاه‌ها جلوی جابه‌جایی و چرخش پین را می‌گیرند. بنابراین به دلیل اینکه پین نمی‌تواند آزادانه بچرخد و جابه‌جا شود، به صورت یک تیر دوسرگیردار با طول ۷۵ میلی‌متر معادل‌سازی می‌شود که بار گسترده‌ای با شدت ۲۴۸۵/۷ N/m روی آن وارد می‌شود. این معادل‌سازی به این دلیل است که با تقریب دانسته بتوان نتایج تئوری را با نتایجی که از نرم‌افزار المان محدود آباکوس به دست آورده می‌شود مقایسه کرد. با ساده‌سازی و به

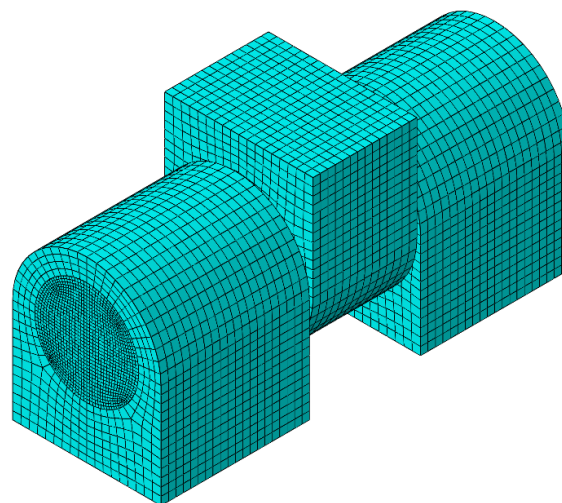
افزایش تعداد المان تا ۱۸۰۰۰۰ المان بررسی شده است و مشاهده گردید افزایش تعداد المان تأثیری بر روی بیشینه تنش فون میزس نخواهد داشت و میزان بیشینه تنش مقدار 69.6 MPa باقی خواهد ماند. برای بررسی دقیق‌تر توزیع تنش در پین، جریان تنش در برش طولی و عرض پین با در نظر گرفتن لقی محوری 2.5 و لقی شعاعی صفر مطابق شکل (۷) نمایش داده شده است. از نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که بیشینه تنش در پین در محل شروع تکیه‌های کناری است. در ادامه برای بررسی تغییرات تنش مطابق شکل (۷-الف) خطی به فاصله 4 میلی‌متر پایین‌تر از سطح بالایی پین از محل ماکزیمم تنش گذرانده شده و جریان تنش در طول این مسیر برای تمام حالت‌های مختلف لقی محوری، شعاعی و تکیه‌گاهی بررسی شده است. علت در نظر گرفتن این فاصله برای بررسی تنش آن است که تنش عمودی ناشی از گشتاور خمشی در بالا و پایین سطح مقطع پین بیشینه است و در وسط صفر می‌باشد. در حالی که تنش برشی ناشی از نیروی برشی در وسط سطح مقطع پین بیشینه است و در بالا و پایین صفر است. بنابراین بیشینه میزان تنش معادل برای این پین، میان وسط سطح مقطع پین و سطح بالایی آن در فاصله 4 میلی‌متر ایجاد می‌شود.



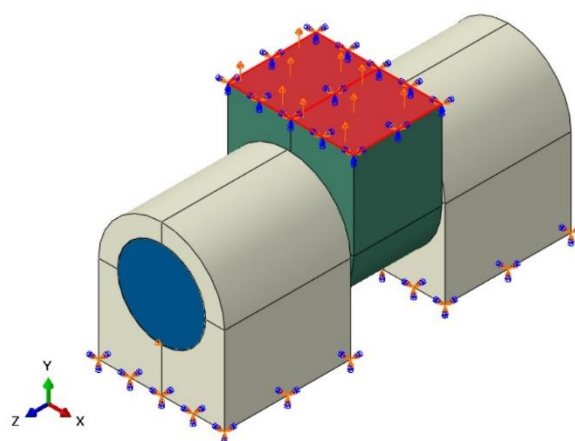
شکل ۶ توزیع تنش در پین با لقی محوری 2.5 و بدون لقی شعاعی



(الف)



شکل ۴ شبکه‌بندی قطعات برای شبیه‌سازی المان محدود



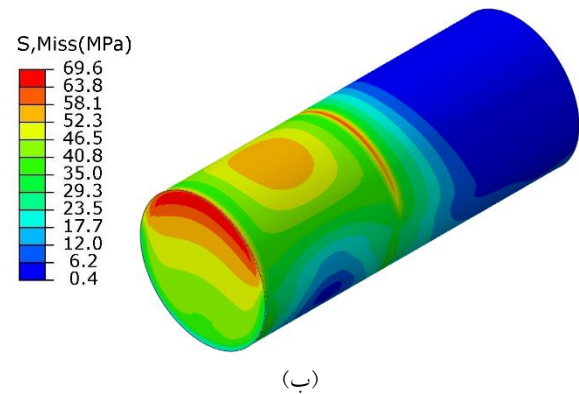
شکل ۵ بارگذاری و شرایط مرزی وارد بر پین

ارائه نتایج و بحث

برای تحلیل شبیه‌سازی پین، در ابتدا فرض می‌شود پین تنها لقی محوری دارد و لقی شعاعی آن صفر در نظر گرفته شده است. سپس اثرات لقی محوری و طول تکیه‌گاه درگیر بررسی می‌شوند. در نهایت تحلیل‌های انجام شده به همراه لقی شعاعی تکرار می‌شود و اثرات آن بررسی می‌شود.

با تحلیل پین با ابعاد مشخص شده در شکل (۵) توسط حلگر استاتیکی نرم‌افزار آباکوس، می‌توان جریان تنش در پین را مشاهده کرد. شکل (۶) توزیع تنش در پین برای لقی شعاعی صفر و لقی محوری 2.5 میلی‌متر را نشان می‌دهد. از شکل واضح است که مقدار بیشینه تنش برابر با 69.6 MPa است. نتایج حاصله وابسته به مش نیستند و اثر مش با کوچک‌تر کردن مش در پین و

آبکوس برای طول تکیه‌گاه متغیر قابل مشاهده است. از داده‌های موجود در این جدول مشخص است که طبق نتایج حاصل از تئوری و تحلیل‌های المان محدود، طول تکیه‌گاه‌های اطراف تأثیری بر مقدار تنش در داخل پین برای حالت لقی شعاعی صفر ندارد. شبیه‌سازی سه‌بعدی مسئله در المان محدود و در نظر گرفتن حالت سه‌بعدی تنش و جریان تنش و حل تئوری برای حالت ساده شده، علت تفاوت نتایج حاصل از تئوری و شبیه‌سازی است.



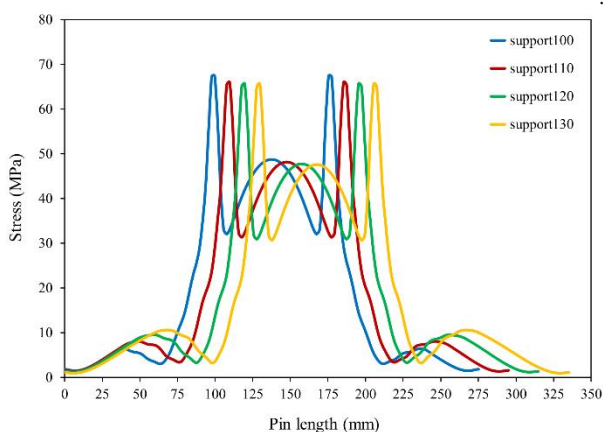
شکل ۷ (الف) توزیع تنش در برش طولی پین و (ب) توزیع تنش در برش عرضی پین با لقی محوری ۲/۵ و بدون لقی شعاعی

جدول ۲. بیشینه تنش فونمیزس برای طول تکیه‌گاه متغیر

طول تکیه‌گاه (mm)	نتایج حاصل از شبیه‌سازی (MPa)	نتایج حاصل از تئوری (MPa)	خطای نتایج
۱۰۰	۶۹٫۵۶	۵۲٫۲۶	۰٫۳۳
۱۱۰	۶۸٫۱۳	۵۲٫۲۶	۰٫۳
۱۲۰	۶۷٫۸۲	۵۲٫۲۶	۰٫۳
۱۳۰	۶۷٫۸۱	۵۲٫۲۶	۰٫۳

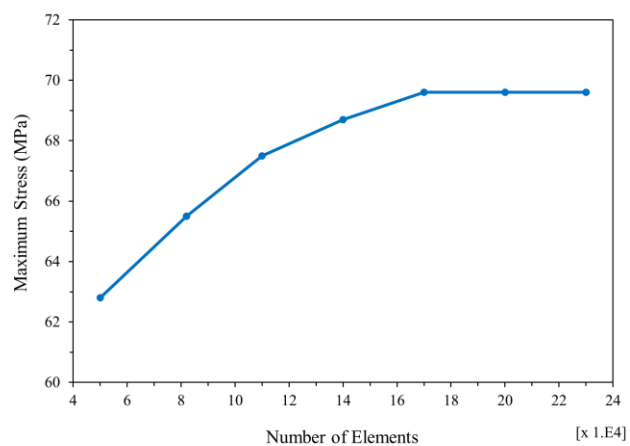
پس از تحلیل اولیه لازم است اثر مش بررسی شود تا نتایج حاصل، وابسته به مش نباشند. ابتدا از حداقل تعداد المان ۵۰۰۰۰ تحلیل انجام می‌شود سپس به ترتیب تعداد المان افزایش می‌یابد و در هر مرحله نتایج ثبت می‌شود. در شکل (۸) اثر مش بر بیشینه تنش قابل مشاهده است. همان طور که قابل مشاهده است با کوچک‌تر کردن مش پین و افزایش تعداد المان تا ۱۸۰۰۰۰، بیشینه تنش تغییری نخواهد کرد.

در شکل (۹) تغییرات تنش فونمیزس در طول پین (برای خط مسیر نشان داده شده در شکل (۷-الف) برای طول تکیه‌گاه متغیر قابل مشاهده است. این شکل بازهم مؤید این حرف است که جریان تنش طولی در پین وابسته به طول تکیه‌گاه‌های اطراف نیست.



شکل ۹. تغییرات تنش فونمیزس برای لقی شعاعی صفر و طول تکیه‌گاه متغیر

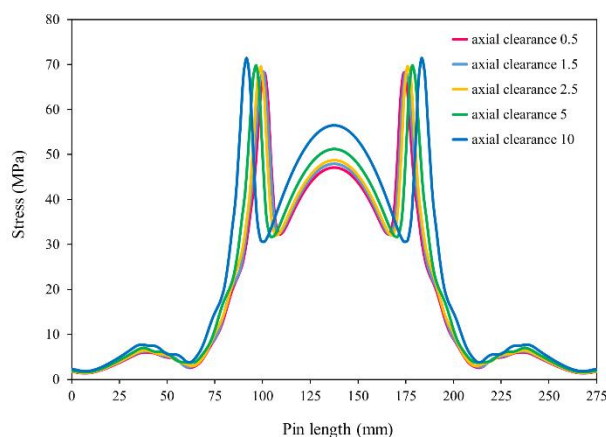
در ادامه به بررسی اثر لقی محوری بر تنش‌های وارد شده بر



شکل ۸. نمودار بیشینه تنش بر حسب تعداد المان

برای بررسی افزایش طول تکیه‌گاه، تغییری در طول تکیه‌گاه وسط ایجاد نمی‌شود و لقی بین تکیه‌گاه‌ها همان ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود و به ازای افزایش طول تکیه‌گاه اطراف، به اندازه دو برابر آن به مقدار طول پین افزوده می‌شود. در جدول (۲) نتایج بیشینه تنش فونمیزس به دست آمده از تئوری و

است و افزایش لقی محوری باعث افزایش تنش در پین می‌شود. برای واضح‌تر شدن اثر لقی محوری بر روی توزیع تنش در داخل پین، جریان تنش برای برش طولی دو حالت لقی محوری ۰/۵ و ۱۰ در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱۰ تغییرات تنش فونمیزس برای لقی شعاعی صفر و لقی محوری متغیر

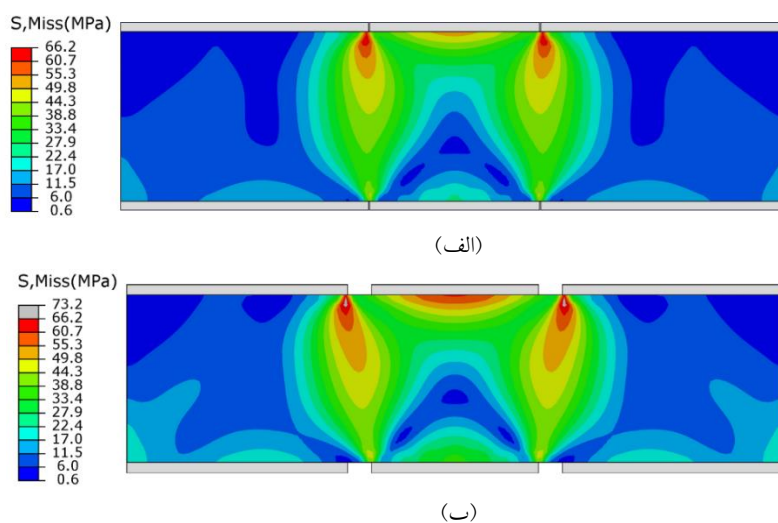
همان‌طور که از شکل‌های (۱۰) و (۱۱) قابل مشاهده است با افزایش لقی، علاوه بر اینکه تنش‌ها افزایش می‌یابند، جریان تنش به داخل تکیه‌گاه‌های کناری کشیده می‌شود. لذا همواره باید در طراحی سازه‌ها این نکته را در نظر گرفت که تا جایی که امکان دارد لقی محوری بین اجزا در کمترین مقدار ممکن باشد. یکی از اهداف کلی مقاله بررسی جریان تنش‌های سه‌بعدی در پین است که شبیه‌سازی المان محدود نسبت به تئوری به خوبی آن را نشان می‌دهد.

پین پرداخته می‌شود. برای بررسی افزایش لقی محوری، تغییری در طول پین ایجاد نمی‌شود و لقی بین تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد. متناسب با افزایش لقی، طول تکیه‌گاه‌های اطراف تغییر می‌کنند و کوچک‌تر می‌شوند؛ ولی تغییری در طول تکیه‌گاه وسط ایجاد نمی‌شود؛ بنابراین با افزایش لقی محوری، طول قسمت بین دو تکیه‌گاه در نظر گرفته شده افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود که مقادیر تنش فونمیزس افزایش پیدا کنند. در جدول (۳) نتایج بیشینه تنش فونمیزس به دست آمده از تئوری و آباکوس برای لقی محوری متغیر قابل مشاهده است. از داده‌های موجود در این جدول مشخص است که طبق نتایج حاصل از تئوری و تحلیل-های المان محدود، با افزایش لقی محوری، مقدار تنش در داخل پین برای حالت لقی شعاعی صفر افزایش می‌یابد.

جدول ۳ بیشینه تنش فونمیزس برای لقی محوری متغیر و لقی شعاعی صفر

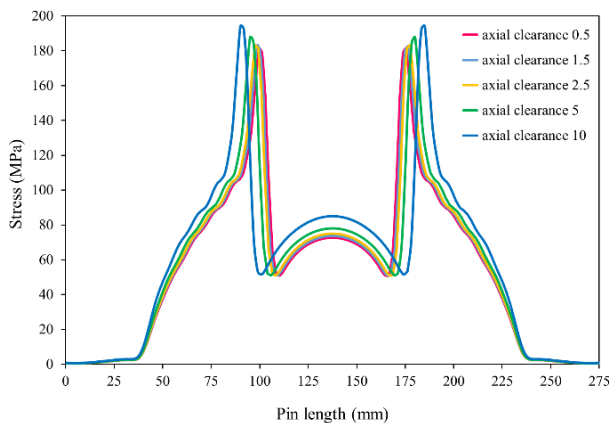
لقی محوری (mm)	نتایج حاصل از آباکوس (MPa)	نتایج حاصل از تئوری (MPa)	خطای نتایج
۰/۵	۶۶/۱۶	۴۹/۹۵	۰/۳۲
۱/۵	۶۸/۴۲	۵۱/۰۷	۰/۳۴
۲/۵	۶۹/۵۶	۵۲/۲۶	۰/۳۳
۵	۶۹/۷۸	۵۵/۵۳	۰/۲۶
۱۰	۷۱/۴۷	۶۳/۳۸	۰/۱۳

در شکل (۱۰) تغییرات تنش فونمیزس در طول پین برای لقی محوری متغیر قابل مشاهده است. این شکل باز هم مؤید این حرف است که جریان تنش طولی در پین وابسته به لقی محوری



شکل ۱۱ اثر افزایش لقی محوری بر جریان تنش در حالت لقی شعاعی صفر و لقی محوری (الف) نیم میلی‌متر و (ب) ۱۰ میلی‌متر

محوری موجب افزایش تنش می‌شود که شدت این افزایش در مقایسه با افزایش تنش در حالت بدون لقی شعاعی بیشتر است. در شکل‌های (۱۳) جریان تنش و تغییر شکل پین در محل گوشه تکیه‌گاه‌های کناری با فاکتور بزرگ‌نمایی ۲۰ در برش طولی پین با لقی شعاعی ۰/۵ و لقی محوری ۲/۵ قابل مشاهده است.

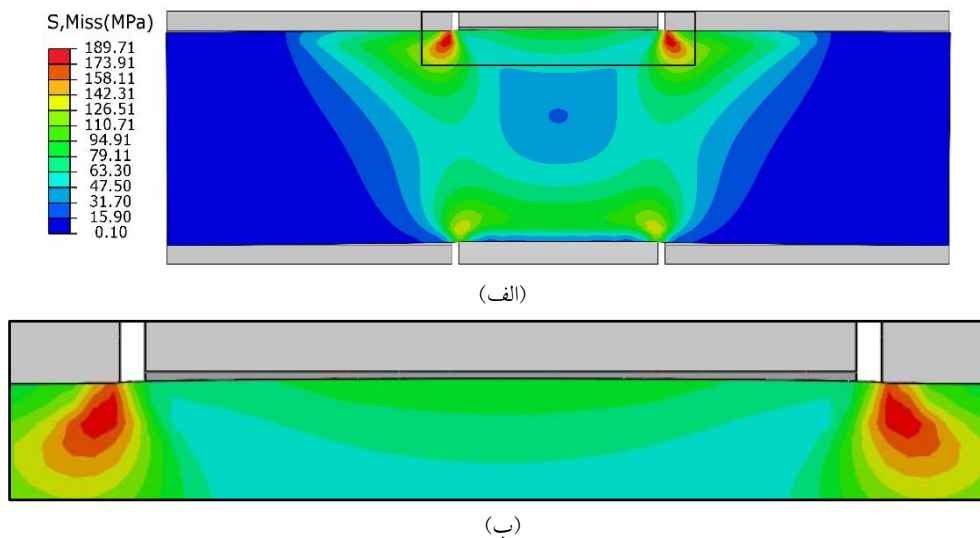


شکل ۱۲ تغییرات تنش فونمیزس برای لقی شعاعی ۰/۵ و لقی محوری متغیر

از آنجا که انطباق اکثر قطعات و اتصالات نیازمند تolerانس است، برای قراردادن پین در محل تکیه‌گاه‌ها نیازمند لقی شعاعی هستیم. از طرف دیگر به دلیل محدودیت تماس تکیه‌گاه‌ها به یکدیگر، لازم است لقی محوری را میان تکیه‌گاه‌ها رعایت کرد. به همین منظور در ادامه اثر تغییرات تنش فونمیزس بیشینه برای لقی شعاعی متغیر و لقی محوری متغیر به صورت مجزا بررسی شده است.

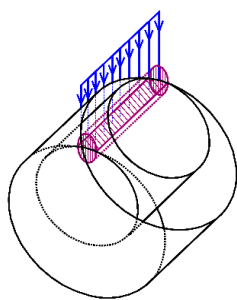
برای بررسی اثر تغییرات تنش فونمیزس بیشینه برای لقی شعاعی ثابت و لقی محوری متغیر، تغییری در طول پین ایجاد نمی‌شود و لقی شعاعی میان پین و تکیه‌گاه‌ها ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و لقی محوری میان تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد. متناسب با افزایش لقی، طول تکیه‌گاه‌های اطراف تغییر می‌کند و تغییری در طول تکیه‌گاه وسط ایجاد نمی‌شود. در شکل (۱۲) تغییرات تنش فونمیزس بیشینه برای لقی شعاعی ثابت ۰/۵ و لقی محوری متغیر قابل مشاهده است.

همان طور که از شکل (۱۲) قابل مشاهده است با اضافه شدن لقی شعاعی، بیشینه تنش‌ها نسبت به شکل (۱۰) افزایش می‌یابند و توزیع تنش به داخل تکیه‌گاه‌های کناری بیشتر کشیده شده است. همچنین با افزایش لقی محوری، این کشیدگی جریان تنش به داخل تکیه‌گاه‌های کناری بیشتر می‌شود. همچنین افزایش لقی



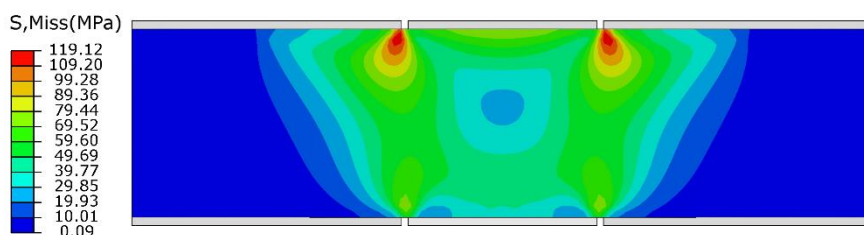
شکل ۱۳ (الف) توزیع تنش در پین با لقی شعاعی ۰/۵ و لقی محوری ۲/۵ و (ب) دفرمگی پین در محل مشخص شده

دستگاه‌ها جنس پین را سخت‌تر از تکیه‌گاه‌ها در نظر می‌گیرند اثر افزایش تمرکز تنش در تکیه‌گاه‌ها و گشاد شدن آن‌ها بیشتر خواهد بود. محدوده مشخص شده در شکل (۱۵) منطقه بحرانی در تمامی تحلیل‌ها است. این سطح قرمز با افزایش لقی شعاعی، از شکل هلالی که در لقی صفر دارد به سطح کوچک‌تری تبدیل می‌شود و سبب وارد شدن نیرو در مساحت کمتر و افزایش تنش می‌شود.

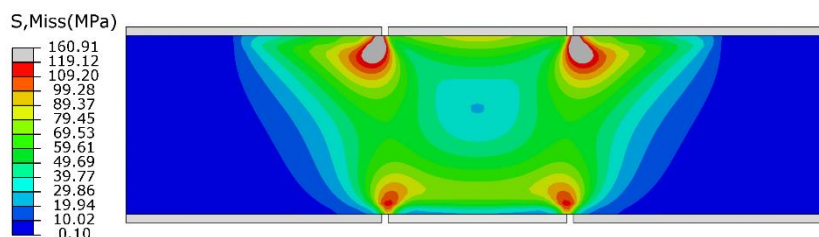


شکل ۱۵ محدوده بحرانی

در شکل (۱۶) اثر افزایش لقی شعاعی و افزایش تمرکز تنش در برش طولی و عرضی پین در محل گوشه تکیه‌گاه‌های کناری نمایش داده شده است. طبق شکل (۱۴) بیشینه تنش در حالت لقی‌های شعاعی ۰/۱۵، ۰/۳۵ و ۰/۵ برابر با ۱۱۹/۱۲، ۱۶۰/۹۱ و ۱۸۹/۷۱ مگاپاسکال می‌باشد که در شکل (۱۶) به منظور بررسی بهتر افزایش جریان تنش با افزایش لقی شعاعی، بیشینه تنش برای هر سه حالت روی عدد ۱۱۹ مگاپاسکال محدود شده است. توزیع تنش نشان داده شده در شکل برای لقی‌های شعاعی متغیر مؤید این نکته است که با افزایش لقی شعاعی، تنش‌ها با شدت بیشتری به پین وارد می‌شوند و اثر مخرب آن بیشتر است.

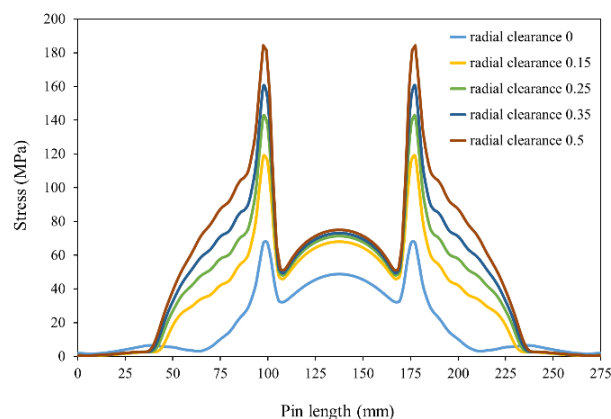


(الف)



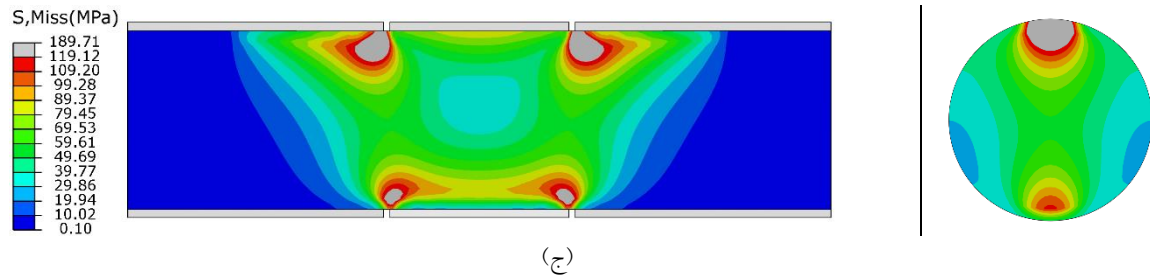
(ب)

برای بررسی اثر تغییرات تنش فونمیزس بیشینه در لقی محوری ثابت و لقی شعاعی متغیر، تغییری در طول پین و تکیه‌گاه‌ها ایجاد نمی‌شود و تنها لقی شعاعی میان پین و تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد. در شکل (۱۴) تغییرات تنش فونمیزس بیشینه برای لقی محوری ثابت ۲/۵ و لقی شعاعی متغیر قابل مشاهده است.



شکل ۱۴ تغییرات تنش فونمیزس برای لقی محوری ثابت ۲/۵ و لقی شعاعی متغیر

همان‌طور که از شکل (۱۴) قابل مشاهده است با اضافه شدن لقی شعاعی، بیشینه تنش‌ها افزایش می‌یابند ولی شدت این افزایش با ازدیاد لقی کاهش می‌یابد. با افزایش لقی شعاعی، کمانی که سطح تماس پین و تکیه‌گاه‌ها را تشکیل می‌دهد کاهش می‌یابد و بارها در محل گوشه تکیه‌گاه‌های کناری با تمرکز بیشتری وارد می‌شوند و اثر ضربه‌ای خواهند داشت. در نتیجه به پین و تکیه‌گاه‌ها تنش‌های بیشتری وارد می‌شود. به دلیل اینکه در اکثر



شکل ۱۶ توزیع تنش فون میزس برای لقی محوری ثابت و لقی شعاعی متغیر در برش‌های طولی و عرضی پین (الف) ۰/۱۵، (ب) ۰/۳۵ و (ج) ۰/۵

متغیر موجب افزایش تنش می‌شود و جریان تنش را به داخل تکیه‌گاه‌ها می‌کشاند. لذا تا جایی که امکان دارد لقی محوری بین اجزا در کمترین مقدار ممکن باشد.

۳. بیشینه تنش پین با اضافه شدن لقی شعاعی نسبت به حالت لقی شعاعی صفر به شدت افزایش می‌یابد.

۴. افزایش تنش داخل پین با افزایش لقی شعاعی رابطه مستقیم دارد ولی شدت افزایش سیر نزولی دارد.

۵. با دانستن اثر هر دو لقی و محدودیت‌های طراحی و ساخت می‌توان با افزایش لقی محوری و کاهش لقی شعاعی و بالعکس به یک بیشینه تنش بهینه در پین رسید.

برای نتیجه‌گیری بهتر در مورد اثر لقی محوری و لقی شعاعی بر روی تغییرات شدت تنش در پین، بیشینه تنش فون میزس بر حسب مگاپاسکال برای تمامی حالات بررسی شده در جدول (۴) نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که لقی شعاعی نسبت به لقی محوری اثر شدیدتری بر روی تغییرات تنش دارد و با افزایش لقی شعاعی تنش شدیدتر افزایش می‌یابد.

جدول ۴ بیشینه تنش فون میزس بر حسب مگاپاسکال برای لقی محوری و لقی شعاعی متغیر

لقی شعاعی (mm)	لقی محوری (mm)	صفر	۰/۵
۰/۵	۱۸۶/۹۹	۶۶/۱۶	۱۸۶/۹۹
۱/۵	۱۸۸/۲۶	۶۸/۴۲	۱۸۸/۲۶
۲/۵	۱۸۹/۷۱	۶۹/۵۶	۱۸۹/۷۱
۵	۱۹۳/۰۹	۶۹/۷۸	۱۹۳/۰۹
۱۰	۱۹۹/۸۸	۷۱/۴۷	۱۹۹/۸۸

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و تحلیل یک پین به صورت عددی پرداخته شد. اثر لقی محوری بین تکیه‌گاه و عضو تحت بارگذاری، اثر لقی شعاعی و اثر طول تکیه‌گاه بر روی تنش‌های وارد بر پین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌های انجام شده عبارتند از:

۱. افزایش طول تکیه‌گاه درگیر در حالت لقی شعاعی صفر بر روی تنش تأثیر ندارد.
۲. افزایش لقی محوری در حالت لقی شعاعی صفر و لقی شعاعی

مراجع

- [1] A. Aslam, G. S. Sekhon, and R. Kumar, "Elastic Analysis of A Pin Loaded Lug," Journal of Aircraft, vol. 41, no. 2,

- pp. 365-371, 2004. <https://doi.org/10.2514/1.222>
- [2] E. Radi and A. Strozzi, "Advancing contact of a 2D elastic curved beam indented by a rigid pin with clearance," International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 149, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104313>
- [3] H. Talebi-Ghadikolaee, H. Moslemi Naeini, V. Zal and F. Ahmadi Khatir, "Formability Study in Roll Forming Process: Insights into the Influence of Process Parameters on Damage Distribution," Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics, vol. 36, no. 2, pp. 115-128, 2024. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.84727.1207>
- [4] Y. Li, R. Huang, S. Zhao, and J. Wang, "Contact pressure analysis of pin-loaded lug with clearance," Advances in Mechanical Engineering, vol. 14, no. 6, 2022. <https://doi.org/10.1177/16878132221107475>
- [5] A. Strozzi, A. Baldini, and M. Nascimbeni, "Maximum Equivalent Stress in a Pin-Loaded Lug Subject to Inclined Loading," The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 41, no. 4, pp. 297-309, 2006. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA150>
- [6] M. Ciavarella, A. Baldini, J. R. Barber, and A. Strozzi, "Reduced dependence on loading parameters in almost conforming contacts," International Journal of Mechanical Sciences, vol. 48, no. 9, pp. 917-925, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.03.016>
- [7] A. Strozzi, A. Baldini, M. Giacomini, E. Bertocchi, and L. Bertocchi, "Maximum equivalent stress in a pin-loaded lug in the presence of initial clearance," The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 46, no. 8, pp. 760-771, 2011. <https://doi.org/10.1177/0309324711423587>
- [8] R. J. Grant, J. Smart, and P. Stanley, "A parametric study of the elastic stress distribution in pin-loaded lugs," The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 29, no. 4, pp. 299-307, 1994. <https://doi.org/10.1243/03093247V294299>
- [9] T. P. Stritch, "An investigation into the behaviour of thick pin-loaded joints under a bearing load," University of Limerick, 2022. [Online].
- [10] S. Varedi-Koulaei, M. Bamdad, and B. Fathi, "The Effects of Revolute Joint Clearance on the Kinematic Behavior of the 3RPR Planar Parallel Manipulator," Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics, vol. 31, no. 1, pp. 53-68, 2020. <https://doi.org/10.22067/fum-mech.v31i1.85234>
- [11] N. Antoni and F. Gaisne, "Analytical modelling for static stress analysis of pin-loaded lugs with bush fitting," Applied Mathematical Modelling, vol. 35, no. 1, pp. 1-21, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.05.002>
- [12] H. Marouani and T. Hassine, "A stress distribution modelization of a neat fit pin-loaded hub," World Journal of Engineering, vol. 15, no. 3, pp. 414-421, 2018. <https://doi.org/10.1108/WJE-03-2017-0057>
- [13] S. Datey, A. A. Rangari, A. A. Dongre, K. A. Paraskar, and S. V. Lidbe, "Analysis of Knuckle Joint used in Mahindra 575 DL," IJARIE, vol. 3, no. 2, pp. 1527-1538, 2017.
- [14] L. Marmorini, A. Baldini, E. Bertocchi, M. Giacomini, R. Rosi, and A. Strozzi, "On the loosening mechanism of a bush press-fitted in the small end of a connecting rod," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 226, no. 3, pp. 312-324, 2012. <https://doi.org/10.1177/0954407011417498>

- [15] M. Kumar and R. Kumar, "Enhancement of Structural Performance of Knuckle Joint with Composite Material using Ansys Structural," International Journal of Innovative Research and Scientific Studies, vol. 4, no. 12, pp. 886-890, 2018.
- [16] F. Nazari and H. Hosseini Nik, "Study the Effect of Speed, Pressure, and Friction Coefficient on the Distribution of Contact Stresses," Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics, vol. 37, no. 4, p. 45, 2025. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.90513.1294>

Numerical Simulation of Magnetic Drug Targeting Efficiency in Cerebral Arteries of Diabetic Patients Based on CT Image-Based Geometry Reconstruction*

Research Article

Mohammad Ali Gholipour Shahraki¹, Behzad Ghasemi² , Afrasiyab Raisi³, Morteza Bayareh⁴

 [10.22067/jacsm.2025.94646.1347](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.94646.1347)

Abstract: In this study, the efficiency of magnetic drug targeting (MDT) for patients with type 2 diabetes was investigated using numerical simulation. A patient-specific cerebral artery geometry was reconstructed based on CT images, and the blood flow was modeled as a non-Newtonian fluid. Key parameters, including blood viscosity, nanoparticle diameter, and magnetic field intensity, were analyzed for their effects on drug carrier capture efficiency. The results showed that increasing the nanoparticle diameter from 250 nm to 1000 nm enhanced the capture efficiency from about 33% to 61% in the fourth cardiac cycle. Moreover, increasing the magnetic field from 0.5 T to 1 T improved the capture efficiency up to 59%.

Keywords: Magnetic Drug Targeting, Type 2 Diabetes, Numerical Simulation, Non-Newtonian Blood, Drug Carrier Nanoparticles, Magnetic Field.

1. Introduction

Magnetic nanoparticles have been widely examined as delivery vehicles for targeted cancer treatment, due to improved bioavailability and less toxicity. The efficacy of MDT is highly impacted by hemodynamic conditions, which are altered in diabetic patients due to higher viscosity and unfavorable flow profiles. Past numerical and experimental studies have shown that the non-Newtonian features of blood can greatly influence the dynamics of the particles and vascular drug delivery in general [1,2]. Yet, few studies have sought to incorporate diabetic rheological models with patient-specific cerebral artery geometries. The aim of the present study is to use numerical methods to investigate MDT in diabetic arteries through examination of particle transport and capture efficiency using varying nanoparticle sizes and magnetic fields [3,4].

2. Governing equations

The continuity and Navier–Stokes equations for

incompressible flow were solved:

$$\nabla \cdot \vec{u}_b = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho_b \left(\frac{\partial \vec{u}_b}{\partial t} + \vec{u}_b \cdot \nabla \vec{u}_b \right) \\ = -\nabla \vec{p} \\ + \nabla (\mu(\dot{\gamma})(\nabla \vec{u}_b + (\nabla \vec{u}_b)^T)) \end{aligned} \quad (2)$$

where ρ_b , $\vec{u}_b$, $\vec{p}$, μ , and $\dot{\gamma}$ represent density, velocity, pressure, viscosity, and shear rate of blood.

In order to model blood as a non-Newtonian fluid, the Casson-Papanastasiou model was used and the equation governing the motion of a particle within the bloodstream was modelled based on Newton's second law [5]. The nanoparticles' CE is calculated using following formula:

$$CE = \frac{n_t - n_{out}}{n_t} \times 100 \quad (3)$$

where n_t is total number of injected nanoparticles, and n_{out} is particles captured outside the region of interest.

3. Results

This study used geometry which is a patient-specific reconstructed geometry of the brain artery bifurcation made with basilar artery (BA) (posterior) right (RP), and (posterior) left artery (LP)(Figure 1). In modeling the impact of the external magnetic field, a cylindrical region of radius R and length L was located next to the left posterior artery, which acted as a magnetic source domain for capturing magnetic nanoparticles. This allows for an investigation on hemodynamic behavior and particle trajectories while achieving physiologically relevant conditions.

Figure 2 presents an illustration of CE for nanoparticles

* Manuscript received July 27, 2025, Revised August 03, 2025, Accepted September 21, 2025.

¹ PhD Student, Falcoty of engineering, University of Shhrekord, Shahrekord, Iran.

² Corresponding Author: Proffesor, Falcoty of engineering, University of Shhrekord, Shahrekord, Iran.

Email: ghasemi@sku.ac.ir

³ Proffesor, Falcoty of engineering, University of Shhrekord, Shahrekord, Iran.

⁴ Proffesor, Falcoty of engineering, University of Shhrekord, Shahrekord, Iran.

with a fixed diameter of 750 nm between healthy (non-diabetic) individuals and diabetic individuals under varying magnetic field intensities. The results illustrate that at all magnetic intensities below 1.0 T, the CE for the non-diabetic condition is consistently above diabetic conditions. For example, at a magnetic field strength of 0.5T, CE was reported at 38.3% for the non-diabetic condition versus 28.5% for the diabetic patient, representing a difference of almost 10% in CE due to increased blood viscosity associated with diabetic conditions. As the magnetic strength increased, the gap between groups shrank, and at 1.0T, both groups eventually had the same CE of approximately 59%.

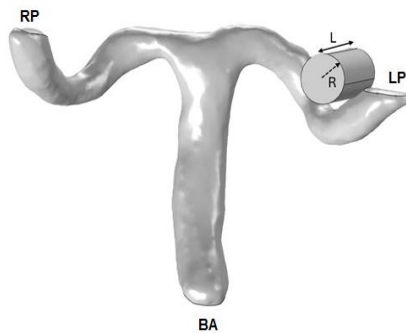


Fig. 1. Geometry used in present study.

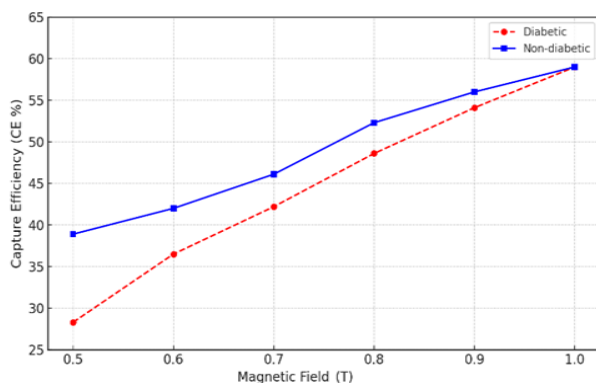


Fig. 2. Comparison of CE for diabetic and non-diabetic individuals at different magnetic intensities and $dp=750\text{nm}$.

Figure 3 depicts the change in CE across three different nanoparticle sizes (500, 750, and 1000 nm) at magnetic field strengths of 0.5 to 1.0 T. It is evident that CE steadily and substantially increases with magnetic field strength (for all sizes) as field strength rises. CE for 500 nm particles respectively increases from approximately 17.5% at 0.5T to nearly 40% at 1.0T, while CE for 750 nm particles increases from approximately 24% to 54% over the same range, and CE for 1000 nm particles respectively increases from approximately 33% to a little more than 56%. This behavior is indicative of a direct relationship between magnetic field strength and the respective magnetic forces acting upon the nanoparticles.

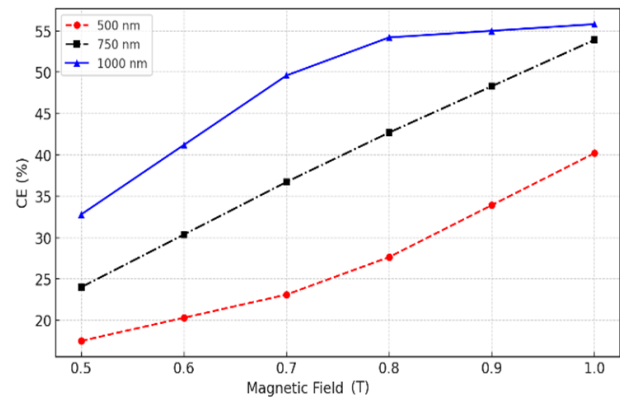


Fig. 3. Effect of magnetic field on CE.

4. Conclusion

This research numerically examined MDT in patient-specific brain arteries in both diabetic and non-diabetic cases, and included non-Newtonian blood rheology. The findings demonstrated that the higher viscosity of blood in diabetes reduced the capture efficiency, particularly at low magnetic field strengths, but this reduction can be offset by using a higher magnetic field strength. Particle size is also a significant factor since larger nanoparticles exhibit higher capture efficiencies under all conditions. In conclusion, these results highlight the need to account for pathological hemodynamics in the design of MDT and suggest that therapeutic efficacy can be significantly improved by ensuring the proper strength of magnet field and the proper size of particle.

References

- [1] R. L. Siegel, K. D. Miller, N. S. Wagle, A. Jemal, "Cancer statistics," CA: A Cancer Journal for Clinicians, vol. 73, pp. 17–48, 2023. <https://doi.org/10.3322/caac.21763>.
- [2] E. Mohebbi et al., "Iran Cancer Statistics in 2012 and projection of cancer incidence by 2035," Basic & Clinical Cancer Research, vol. 9, no. 3, pp. 3–22, 2017.
- [3] Z. Abbas and S. Rehman, An overview of cancer treatment modalities. Neoplasm, Rijeka: IntechOpen, 2018.
- [4] M. M. Selim et al., "A review of magnetic nanoparticles used in nanomedicine," APL Materials, vol. 12, p. 010601, 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0174561>
- [5] M. Datta et al., "CFD simulation of arterial hypotension in a left anterior coronary artery section with potential clinical relevance," Indian Chemical Engineer, vol. 66, pp. 337–348, 2024. <https://doi.org/10.1080/00194506.2024.2368510>



شبیه‌سازی عددی کارایی دارورسانی مغناطیسی در شریان مغزی بیماران دیابتی بر اساس بازسازی هندسه واقعی از تصاویر CT*

مقاله پژوهشی

مرتضی بیاره^(۴)افراسیاب ریسی^(۳)بهزاد قاسمی^(۲)محمد علی قلی پور شهرکی^(۱)

doi 10.22067/jacsm.2025.94646.1347

چکیده در این پژوهش، کارایی روش دارورسانی مغناطیسی برای بیماران مبتلا به دیابت نوع ۲ با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی می‌شود. برای این منظور، هندسه واقعی شریان مغزی بر اساس تصاویر سی‌تی‌اسکن بازسازی و جریان خون به صورت سیال غیرنیوتنی مدل‌سازی می‌گردد. اثر پارامترهای کلیدی مانند ویسکوزیته خون، قطر نانوذرات حامل دارو و شدت میدان مغناطیسی بر درصد جذب ذرات تحلیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که افزایش قطر نانوذرات از ۲۵۰ به ۱۰۰۰ نانومتر باعث افزایش راندمان جذب از حدود ۳۳٪ به ۶۱٪ می‌شود. همچنین افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۵/۰ به ۱ تسلا، راندمان جذب را تا ۵۹٪ افزایش می‌دهد. بررسی رفتار جریان خون در دو فاز دیاستول و سیستول نیز نشان می‌دهد که سرعت جریان و تنش برشی جداره در فاز سیستول بیشتر است و این تغییرات، طراحی بهینه میدان مغناطیسی را ضروری می‌سازد. نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که برای بهبود عملکرد دارورسانی مغناطیسی در بیماران دیابتی، باید ویژگی‌های غیرنیوتنی خون، اندازه نانوذرات و شدت میدان مغناطیسی به طور همزمان و بهینه در طراحی سیستم لحاظ شود.

واژه‌های کلیدی دارورسانی مغناطیسی، دیابت نوع ۲، شبیه‌سازی عددی، رفتار غیرنیوتنی خون، نانوذرات حامل دارو، میدان مغناطیسی.

مقدمه

مختلفی برای مقابله با این بیماری توسعه یافته‌اند که از جمله رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به جراحی، شیمی‌درمانی، پرتودرمانی و ایمونوتراپی اشاره کرد. هرچند شیمی‌درمانی متداول‌ترین شیوه درمانی است، اما به دلیل اثرگذاری سیستمیک، منجر به بروز عوارض جانبی گسترده در بافت‌های سالم می‌شود [3]. در این راستا، استفاده از فناوری نانو و به ویژه روش دارورسانی مغناطیسی (Magnetic Drug Targeting) به عنوان یک راهکار نوین، امکان تمرکز دارو در محل تومور و کاهش عوارض ناخواسته را فراهم کرده است. در این روش، نانوذرات مغناطیسی

سرطان به عنوان یکی از چالش‌های بزرگ سلامت عمومی در جهان، سالانه میلیون‌ها نفر را درگیر می‌کند و طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت، در سال ۲۰۲۰ حدود ۱۹٫۳ میلیون مورد جدید ابتلا و نزدیک به ۱۰ میلیون مرگ ناشی از آن ثبت شده است؛ پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ این آمار به بیش از ۲۸ میلیون مورد در سال برسد [1]. در ایران نیز با بیش از ۱۳۰ هزار مورد جدید سالانه، سرطان پس از بیماری‌های قلبی - عروقی، دومین عامل مرگ و میر به شمار می‌آید [2]. روش‌های درمانی

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۵/۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۶/۳۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

Email: behzadgh@yahoo.com

(۳) استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

(۴) استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

زیست‌سازگار که حامل دارو هستند، با اعمال میدان مغناطیسی خارجی به ناحیه هدف هدایت شده و در محل تومور انباشته می‌شوند؛ این ذرات معمولاً از جنس اکسید آهن با پوشش‌های پلیمری هستند که امکان تنظیم دقیق اندازه و سطح آن‌ها را برای عبور مؤثر از سیستم گردش خون و رسیدن به بافت هدف فراهم می‌آورد [4].

در پژوهش‌های پیشین کارایی روش دارورسانی مغناطیسی در درمان سرطان به خوبی نشان داده شده است. برای مثال، کمالی و کشاورز [5] مطالعه‌ای عددی در زمینه دارورسانی مغناطیسی در بدن انسان انجام دادند که در آن جریان خون به صورت پالس‌دار مدل‌سازی شد و حرکت نانوذرات مغناطیسی تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی شبیه‌سازی گردید. آن‌ها در این پژوهش، پارامترهایی مانند شدت میدان مغناطیسی، خواص فیزیکی ذرات و رفتار دینامیکی جریان خون را لحاظ کردند. نتایج نشان داد که مدل‌سازی دقیق جریان پالس‌دار در کنار طراحی مناسب میدان مغناطیسی، می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی انتقال دارو و افزایش کارایی روش دارورسانی مغناطیسی ایفا کند. در سال ۲۰۲۰، یکانی مطلق و بادفر [6] تحقیقی عددی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام دادند که هدف آن بررسی راندمان جذب نانوذرات مغناطیسی زیست‌سازگار Fe_3O_4 در جریان خون شریانی دارای تنگی بود. در این مطالعه، اثر میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان بر حرکت و جذب نانوذرات مورد ارزیابی قرار گرفت. عوامل متعددی از جمله شدت میدان مغناطیسی، مکان قرارگیری منبع میدان، اندازه ذرات، و عدد رینولدز جریان در مدل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش شدت میدان مغناطیسی و اندازه ذرات، میزان جذب نانوذرات افزایش می‌یابد؛ همچنین کاهش عدد رینولدز باعث بهبود تمرکز ذرات در ناحیه هدف می‌شود. این مطالعه نشان داد که روش دارورسانی مغناطیسی می‌تواند با طراحی دقیق میدان مغناطیسی به عنوان یک راهکار مؤثر در درمان هدفمند مورد استفاده قرار گیرد.

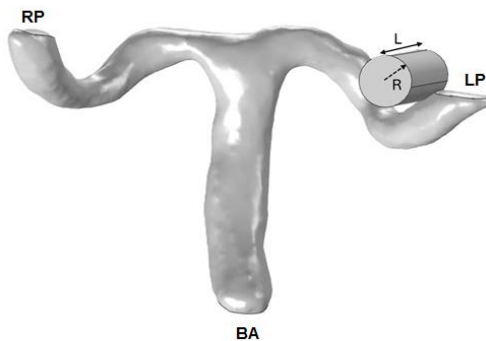
همچنین، مطالعات متعددی بر روی اثر پارامترهای مختلف اثرگذار بر روی کارایی روش دارورسانی مغناطیسی انجام شده است. اردلان و همکاران [7] در مطالعه‌ای عددی، اثر عوامل مختلف بر جذب نانوذرات در پایین‌دست یک تنگی موضعی را بررسی کردند. آن‌ها پارامترهایی مانند قطر نانوذرات، عدد

رینولدز، رفتار نیوتنی و غیرنیوتنی خون، شدت میدان مغناطیسی و نوع منبع میدان (سیم حامل جریان و آهن‌ربای دائم) را تحلیل کردند. نتایج نشان داد افزایش قطر نانوذرات و شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش جذب می‌شود، در حالی که افزایش عدد رینولدز جذب را کاهش می‌دهد؛ همچنین، در رگ‌هایی با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر، در نظر گرفتن رفتار غیرنیوتنی خون ضروری است و سیم حامل جریان برای این رگ‌ها عملکرد بهتری دارد. در مطالعه دیگری، لیندمان و همکاران [8] کارایی روش دارورسانی مغناطیسی را برای هدایت نانوذرات اکسید آهن فوق‌پارامغناطیس به محل تومور با استفاده از دو نوع آرایش میدان مغناطیسی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که قرارگیری درون‌تن آرایه‌های مغناطیسی (از طریق آندوسکوپ) می‌تواند شیب میدان مغناطیسی را در بافت هدف افزایش دهد و اثرگذاری روش دارورسانی مغناطیسی را تا ۳۲ درصد بهبود بخشد. نتایج حاکی از آن است که نزدیکی میدان مغناطیسی به تومور و طراحی آرایشی با حداکثر نقاط اوج میدان، نقش کلیدی در موفقیت این روش دارد. ژو و همکاران [9] اثر استفاده از آهن‌ربای حجیم ابررسانا را که در خارج از بدن قرار می‌گیرد، بر جذب نانوذرات دارویی بررسی کردند. پارامترهایی مانند فاصله آهن‌ربا تا نایژه، ویژگی‌های مغناطیسی آهن‌ربای ابررسانا، اندازه و ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات در مدل لحاظ شدند. نتایج نشان داد که در فاصله بهینه حدود ۲۵ میلی‌متر، کارایی جذب نانوذرات تا بیش از ۴۵٪ افزایش یافت و افزایش شدت میدان مغناطیسی آهن‌ربا به طور مستقیم باعث بهبود راندمان دارورسانی مغناطیسی می‌شود. اثر زاویه تزریق نانوذرات حامل دارو بر روی جذب آن‌ها در محل تومور در یک رگ Y شکل سه‌بعدی توسط علیزاده و همکاران [10] بررسی شد. در این مطالعه، زاویه تزریق نانوذرات، نرخ تزریق ذرات، شدت میدان مغناطیسی و رفتار غیرنیوتنی خون به عنوان پارامترهای کلیدی بررسی شدند. نتایج نشان داد که زاویه تزریق مناسب می‌تواند راندمان جذب ذرات را تا حدود ۳۰٪ افزایش دهد و همچنین کاهش نرخ تزریق باعث بهبود جذب تا حدود ۲۰٪ می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی بهینه زاویه و نرخ تزریق در کنار در نظر گرفتن رفتار واقعی خون، نقش مهمی در ارتقای کارایی روش دارورسانی مغناطیسی دارد. در طراحی و ارزیابی دارورسانی مغناطیسی، ساده‌سازی هندسه (مثلاً مدل‌های T/Y شکل ایدئال) اثرات واقعی اختلاف قطر

از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا، در پژوهش حاضر به بررسی کارایی روش دارورسانی مغناطیسی در این دسته از بیماران خواهیم پرداخت. برای این منظور، هندسه واقعی شریان مغزی با استفاده از تصاویر سی تی فرد مبتلا به دیابت به دست آمد. خون به صورت غیرنیوتنی در نظر گرفته شد. و از آهن ربای استوانه‌ای دائمی برای تولید میدان مغناطیسی استفاده گردید. اثر پارامترهایی نظیر ویسکوزیته خون، شدت میدان مغناطیسی و نیز قطر نانوذرات حامل دارو بر روی درصد جذب نانوذرات بررسی خواهد شد.

بیان مسئله

شکل (۱) هندسه مورد نظر در کار حاضر را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن هندسه سه بعدی واقعی فرد بیمار، ابتدا تصاویر سی تی از مغز بیمار تهیه شد. سپس، با استفاده از نرم افزار MIMICS تصاویر سی تی تبدیل به هندسه واقعی شد. در ادامه، در نرم افزار 3-MATICS ورودی و خروجی‌ها، مش بندی و اختصاص ماده به بخش‌های مختلف انجام شد. مساحت شریان بازیلار (Basilar anterior) (BA) برابر با $0/1415$ سانتی متر مربع است. مساحت شریان مغزی پس سری راست (Right posterior cerebral artery) (RP) حدود $0/0929$ سانتی متر مربع و مساحت شریان مغزی پس سری چپ (Left posterior cerebral artery) (LP) حدود $0/0931$ سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. برای تولید میدان مغناطیسی، یک آهن ربای استوانه‌ای طراحی شده که طول آن 15 میلی متر و شعاع آن 2 میلی متر در نظر گرفته شده است. این داده‌ها، ورودی‌های اصلی مدل هندسی شبیه سازی بوده و مبنای محاسبه جریان خون و میدان مغناطیسی در ناحیه مورد مطالعه را فراهم می‌کنند.



شکل ۱ هندسه مورد استفاده در کار حاضر

شاخه‌ها، خمیدگی و پیچ و تاب را بازنمایی نمی‌کند؛ این ویژگی‌ها الگوی سرعت و تنش برشی دیواره، جریان‌های ثانویه، جدایش/ بازچرخش و در نتیجه زمان ماند نزدیک دیواره را تغییر می‌دهند و مستقیماً بر موازنه نیروهای وارد بر ذره و درصد جذب نانوذرات در محل تومور اثر می‌گذارند. مطالعات نشان داده‌اند که در ناحیه انشعاب، کارایی هدف گیری ذرات به شدت با میدان‌های هیدرودینامیکی ناشی از هندسه همبسته است و تغییرات هندسی می‌تواند محل جذب نانوذرات را جابه‌جا کند [11]. همچنین شبیه سازی سه بعدی در هندسه Y - شکل نشان می‌دهد نسبت قطر شاخه‌ها، شرایط ورودی و موقعیت میدان/ آهن ربا به صورت حساس، مسیر و نرخ جذب ذرات را تغییر می‌دهند؛ به گونه‌ای که حتی با ثابت بودن سایر پارامترها، تغییرات ظریف هندسه به تفاوت‌های معنادار در بازده منجر می‌شود [12]. این شواهد ضرورت استفاده از هندسه واقعی را برای پیش بینی کمی قابل اتکا در دارورسانی مغناطیسی تأیید می‌کنند.

بیماری دیابت نوع ۲ یکی از شایع ترین اختلالات متابولیک جهان است که با افزایش مزمن قند خون و مقاومت به انسولین شناخته می‌شود و اثرات گسترده‌ای بر سیستم عروقی و خواص رئولوژیکی خون دارد [13]. در این بیماری، افزایش سطح گلوکز خون منجر به تغییر در ترکیب پلاسمای خون، افزایش سطح پروتئین‌های پلاسما مانند فیبرینوژن و آلبومین و همچنین افزایش هماتوکریت می‌شود که همگی باعث افزایش ویسکوزیته خون می‌گردند [14]. ویسکوزیته بالای خون در بیماران دیابتی باعث کاهش جریان خون در مویرگ‌ها، افزایش مقاومت عروقی و اختلال در تبادل مواد غذایی و اکسیژن در بافت‌های بدن می‌شود [15]. از طرفی، سختی دیواره عروق و آسیب به سلول‌های اندوتلیال در اثر محصولات نهایی گلیکاسیون پیشرفته (Advanced Glycation End Products) نیز بر تغییرات رئولوژیکی خون تأثیرگذار است و موجب تشدید ویسکوزیته و کاهش انعطاف پذیری جریان خون می‌گردد [16]. این تغییرات رئولوژیکی، ریسک بروز عوارض میکروواسکولار مانند رتینوپاتی، نفروپاتی و نوروپاتی را در بیماران دیابتی افزایش می‌دهد و اهمیت کنترل دقیق شاخص‌های خون را در مدیریت دیابت نشان می‌دهد. با توجه به اثرگذاری دیابت بر روی ویسکوزیته خون، و همچنین اثر مستقیم ویسکوزیته بر روی نیروی درگ وارد بر نانوذرات حامل دارو در خون، بررسی کارایی روش دارورسانی مغناطیسی در درمان افراد دیابتی مبتلا به سرطان

صورت زیر به دست می‌آید:

$$\nabla^2 V_m = 0 \quad (۸)$$

معادله حاکم بر حرکت ذره درون جریان خون مبتنی بر قانون دوم نیوتن است:

$$\Sigma \vec{F} = m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} \quad (۹)$$

در این رابطه، m_p جرم ذره است. نیروی درگ، $\vec{F}_D$ ، اعمالی بر روی ذره با استفاده از فرمول اصلاح شده استوکس به دست می‌آید [10]:

$$\vec{F}_D = -m_p \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2 24} (\vec{u}_p - \vec{u}_b) \quad (۱۰)$$

که در آن، C_D ضریب درگ، Re_p عدد رینولدز ذره و d_p قطر ذره است. عدد رینولدز ذره و ضریب درگ به ترتیب از طریق معادلات (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند.

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (۱۱)$$

$$Re_p = \frac{\rho |\vec{u}_b - \vec{u}_p| d_p}{\mu} \quad (۱۲)$$

نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{F}_M = \iiint \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} dV \quad (۱۳)$$

در این جا، $\vec{M}$ مغناطش ذره است. مغناطش مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{M} = \begin{cases} \chi_{eff} \vec{H} & H < M_{sat} / \chi_{eff} \\ M_{sat} \hat{H} & H \geq M_{sat} / \chi_{eff} \end{cases} \quad (۱۴)$$

در این معادله، χ_{eff} و M_{sat} به ترتیب نفوذپذیری مغناطیسی و اشباع مغناطیسی هستند. با جایگذاری معادله (۱۴) در معادله (۱۳)، معادله نهایی نیروی مغناطیسی وارد بر ذره به دست می‌آید.

$$\vec{F}_M = \begin{cases} \frac{\pi d_p^3}{6} \mu_0 \frac{\chi_{eff}}{2} \nabla \vec{H}^2 & H < M_{sat} / \chi_{eff} \\ \frac{\pi d_p^3}{6} \mu_0 M_{sat} \nabla H & H \geq M_{sat} / \chi_{eff} \end{cases} \quad (۱۵)$$

آخرین نیروی وارده بر ذره که در این پژوهش در نظر گرفته شده، نیروی بویانسی است. نیروی بویانسی وارد بر ذرات از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{F}_B = m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho_b)}{\rho_p} \quad (۱۶)$$

معادلات حاکم و شرایط مرزی

جریان خون درون عروق توسط معادلات پیوستگی و ناویر استوکس تعیین می‌شود. معادله (۱) نشان دهنده معادله پیوستگی است.

$$\nabla \cdot \vec{u}_b = 0 \quad (۱)$$

در این مطالعه، خون به صورت یک سیال غیرنیوتنی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، فرم غیرنیوتنی معادله ناویراستوکس به صورت زیر است:

$$\rho_b \left(\frac{\partial \vec{u}_b}{\partial t} + \vec{u}_b \cdot \nabla \vec{u}_b \right) = -\nabla p + \nabla (\mu (\dot{\gamma}) (\nabla \vec{u}_b + (\nabla \vec{u}_b)^T)) \quad (۲)$$

در معادلات بالا $\vec{u}_b$ بردار سرعت خون است. همچنین، ρ_b و μ_b به ترتیب نشان دهنده چگالی و ویسکوزیته خون هستند. $\dot{\gamma}$ نیز نشان دهنده نرخ برش خون است.

به منظور مدل‌سازی خون به صورت یک سیال غیرنیوتنی، از مدل Casson-Papanastasiou استفاده گردید [17]:

$$\tau = 2 \left(\sqrt{\mu_p} + \sqrt{\frac{\tau_y}{\dot{\gamma}}} [1 - \exp(-\sqrt{m_p \dot{\gamma}})] \right)^2 D \quad (۳)$$

در این رابطه μ_p ، τ_y و m_p و D به ترتیب ویسکوزیته پلاستیک، تنش تسلیم، پارامتر هموارسازی پاپاناستاسیو، و تانسور نرخ تغییرشکل برشی هستند.

معادلات ماکسول بر میدان مغناطیسی حاکم هستند. با فرض میدان مغناطیسی استاتیکی، کرل شدت میدان مغناطیسی، $\vec{H}$ ، برابر صفر است:

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (۴)$$

از طرف دیگر، پتانسیل مغناطیسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{H} = -\nabla V_m \quad (۵)$$

چگالی شار مغناطیسی، $\vec{B}$ ، از طریق رابطه زیر به $\vec{H}$ مرتبط می‌شود:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (۶)$$

بنابراین، معادله پیوستگی شار مغناطیسی به صورت زیر در می‌آید:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (۷)$$

نهایتاً، معادله لاپلاس برای پتانسیل اسکالر مغناطیسی، V_m ، به

شدند. حلگرهای PARADISO و MUMPS به ترتیب برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال و میدان مغناطیسی استفاده شدند. برای به دست آوردن سرعت و مکان ذرات حامل دارو، از حلگر وابسته به زمان MUMPS استفاده شد. همچنین، فرض شد که نانوذررات در ورودی به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. برای حل معادلات حاکم از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics نسخه ۶٫۰ استفاده شد.

به منظور انجام استقلال از شبکه، چهار شبکه چهاروجهی مختلف در نظر گرفته شدند، و برای هر شبکه نتایج مربوط به میانگین سرعت خون و تنش برشی جداره به دست آمدند. کل هندسه مش‌زنی شده شامل سه بخش رگ، آهن‌ربا، و فضای بین این دو بخش می‌باشد. از آنجایی که هدف کار حاضر، محاسبه درصد جذب نانوذررات در محل تومور است، در نتیجه تعداد مش‌های ریزتری برای رگ انتخاب شد. همچنین، در محل تومور مش‌های بسیار ریز انتخاب شدند تا محل جذب نانوذررات مغناطیسی با دقت بالاتری محاسبه شوند که محاسبه میزان جذب نانوذررات با دقت بالایی انجام شود. به منظور کاهش بار محاسباتی، تعداد مش‌های آهن‌ربا و فضای اطراف کمی درشت‌تر انتخاب شدند. این چهار شبکه عبارتند از: $G1=372125$ ، $G2=745361$ ، $G3=1023429$ ، و $G4=1498473$ هستند. جدول (۱) نتایج به دست آمده سرعت سیال و تنش برشی جداره برای هر چهار شبکه را نشان می‌دهد.

جدول ۱ نتایج استقلال از شبکه

G4	G3	G2	G1	
۰/۰۸۰۳	۰/۰۸۰۲	۰/۰۷۷۵	۰/۰۷۲۴	سرعت سیال
۰/۴۹۵۰	۰/۴۹۵۴	۰/۴۹۷۶	۰/۴۹۸۴	تنش برشی جداره

همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده برای هر دو پارامتر برای شبکه‌های $G3$ و $G4$ تقریباً یکسان است. در نتیجه به منظور کاهش بار محاسباتی، در ادامه فرایند حل از شبکه $G3$ برای محاسبات استفاده شده است.

اعتبارسنجی روش حل عددی

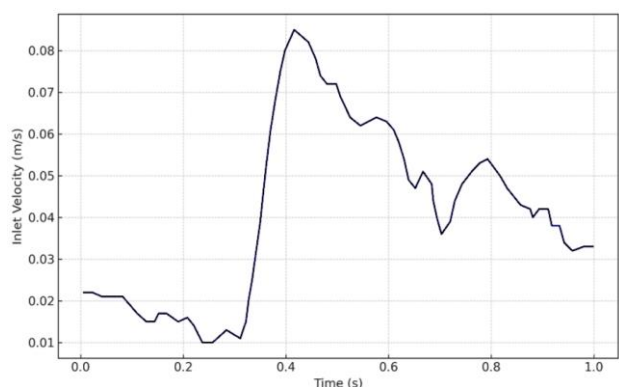
به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، نتایج به دست آمده در کار حاضر با نتایج به دست آمده توسط محمودپور

نهایتاً، درصد جذب نانوذررات حامل دارو در محل تومور به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CE = \frac{n_t - n_{out}}{n_t} \times 100 \quad (17)$$

که در آن صورت کسر نشان دهنده تعداد نانوذررات جذب شده در محل تومور، و مخرج آن نشان دهنده کل نانوذررات تزریق شده به ورید هستند.

در پژوهش حاضر، از ورودی سرعت خون متغیر با زمان و واقعی فرد بیمار استفاده شده است. شکل (۲) نمودار سرعت ورودی را نشان می‌دهد. تعداد ۱۰۰۰ نانوذرره در ورودی با سرعت یکسان با خون و به صورت تصادفی به جریان خون تزریق شدند. شرط عدم لغزش در جداره رگ‌ها لحاظ گردید. همچنین، در خروجی جریان شرط تخلیه به فشار اتمسفر در نظر گرفته شد. در این مطالعه، رژیم جریان خون آرام می‌باشد. محاسبات عدد رینولدز بر پایه قطرهای هندسه بازسازی شده و پروفایل سرعت ورودی بیمار نشان می‌دهد که Re در همه شاخه‌ها زیر آستانه گذار باقی می‌ماند (در BA ، ۳۴-۸۲ برای افراد غیردیابتی، و ۲۶-۶۴ برای افراد دیابتی؛ در RP ، ۲۳-۵۶ برای افراد غیردیابتی و ۱۸-۴۴ برای افراد دیابتی؛ و نهایتاً در LP ، ۱۸-۴۴ برای افراد دیابتی و ۱۶-۴۰ برای افراد دیابتی). بنابراین هرچند در خم‌ها و انشعابات، جریان‌های ثانویه، جدایش و بازچرخش موضعی رخ می‌دهد، آشفتگی پایدار شکل نمی‌گیرد و مدل‌سازی آرام ناپایا کفایت دارد.

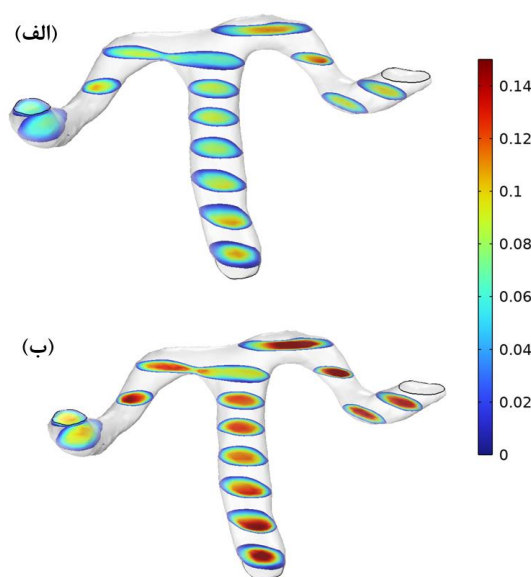


شکل ۲ سرعت ورودی مورد استفاده در پژوهش حاضر [18]

روش حل عددی و استقلال از شبکه

معادلات حاکم بر مسئله، با استفاده از روش المان محدود حل

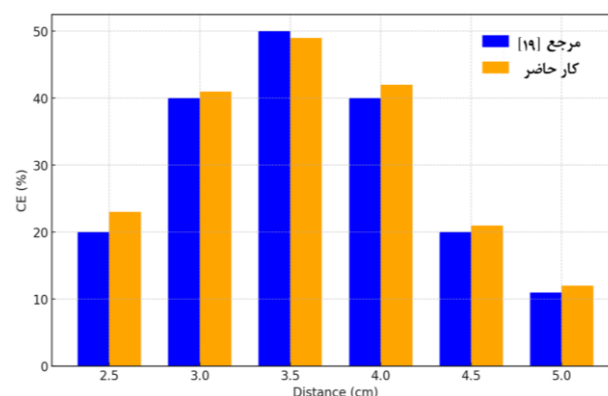
نشان می‌دهد که بیشینه سرعت در دیواره‌های داخلی انشعابات به طور محلی افزایش یافته که می‌تواند منجر به افزایش تنش برشی دیواره در این نقاط گردد. این تغییرات سرعت بین دو فاز دیاستول و سیستول، اهمیت لحاظ کردن رفتار واقعی جریان خون پالس‌دار را در شبیه‌سازی‌های دارورسانی مغناطیسی نشان می‌دهد. زیرا سرعت جریان خون به طور مستقیم بر نیروی درگ وارد بر نانوذرات مغناطیسی تأثیرگذار است و تغییرات آن می‌تواند کارایی جذب ذرات در محل تومور را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین در طراحی میدان مغناطیسی و انتخاب مشخصات نانوذرات، باید تغییرات دینامیکی جریان خون در چرخه قلبی به طور دقیق در نظر گرفته شود تا شرایط بهینه برای حداکثر راندمان جذب فراهم گردد.



شکل ۴ u_b برای حالت‌های (الف) دیاستول، و (ب) سیستول

شکل (۵) توزیع کانتور تنش برشی جداره را در هندسه واقعی شریان مغزی برای دو فاز چرخه قلبی، دیاستول و سیستول نمایش می‌دهد. در حالت دیاستول (الف)، میزان تنش برشی در اغلب نواحی دیواره شریان در مقادیر پایین (کمتر از 0.8 Pa) متمرکز است که این امر ناشی از کاهش سرعت جریان خون و به تبع آن کاهش گرادیان سرعت نزدیک دیواره است. مقادیر بالاتر تنش برشی عمدتاً در محل انشعابات و خمیدگی‌های رگ قابل مشاهده است که بیانگر تمرکز جریان و افزایش گرادیان سرعت در این نقاط است. در مقابل، در حالت سیستول (ب) به دلیل افزایش فشار ناشی

و همکاران [16] مقایسه شدند. برای این منظور، از هندسه و شرایط مرزی یکسان با این مرجع استفاده شد و نتایج با همدیگر مقایسه شدند. در این پژوهش، از هندسه رگ Y - شکل، نانوذرات با قطر 750 nm و آهن‌ربای دائمی استوانه‌ای شکل استفاده شد. شکل (۳) مقایسه بین درصد جذب برای فاصله‌های مختلف آهن‌ربا را از مرکز رگ به دست آمده در کار حاضر و مرجع نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی (درصد خطای کمتر از 2%) بین نتایج وجود دارد و در نتیجه صحت نتایج به دست آمده تأیید می‌شود.



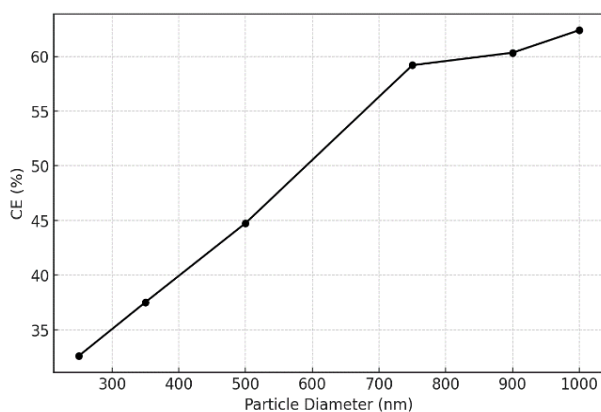
شکل ۳ مقایسه نتایج عددی کار حاضر با کار محمودپور و همکاران [19]

نتایج و بحث

شکل (۴) کانتور توزیع سرعت خون را در هندسه شریان مغزی بازسازی شده برای دو فاز چرخه قلبی یعنی (الف) دیاستول و (ب) سیستول نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در حالت دیاستول (الف)، سرعت خون در بیشتر مقاطع رگ نسبتاً یکنواخت و در محدوده پایین‌تری قرار دارد که این امر ناشی از بازگشت قلب به وضعیت استراحت و کاهش فشار جریان خون است. بیشینه سرعت در این حالت عمدتاً در بخش میانی شریان بازیلار متمرکز است و در شاخه‌های جانبی کاهش می‌یابد.

در مقابل، در حالت سیستول، به دلیل انقباض عضله قلب و افزایش لحظه‌ای فشار خون، سرعت جریان در تمام شاخه‌های شبکه عروقی افزایش قابل توجهی یافته و مناطق با بیشینه سرعت بیشتر و با توزیع گسترده‌تر ظاهر شده‌اند. نواحی قرمز رنگ در کانتور نشان دهنده افزایش مقدار سرعت تا حدود 0.15 m/s هستند که در مقایسه با فاز دیاستول بیانگر رشد قابل توجه انرژی جریان است. همچنین در مقاطع منشعب، الگوی توزیع سرعت

شکل (۶) تأثیر قطر نانوذرات حامل دارو بر درصد جذب را نشان می‌دهد. نتایج این قسمت برای سرعت ورودی نشان داده شده در شکل (۲)، ویسکوزیته خون $5/2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (مربوط به بیمار مبتلا به دیابت)، و شدت میدان مغناطیسی ۱ تسلا به دست آمده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر ذرات از ۲۵۰ نانومتر به ۱۰۰۰ نانومتر، مقدار راندمان جذب به طور پیوسته افزایش می‌یابد؛ به طوری که درصد جذب از ۳۲/۹ درصد برای ذرات با قطر ۲۵۰ نانومتر به ۶۱/۵ درصد برای ذرات با قطر ۱۰۰۰ نانومتر رسیده است.

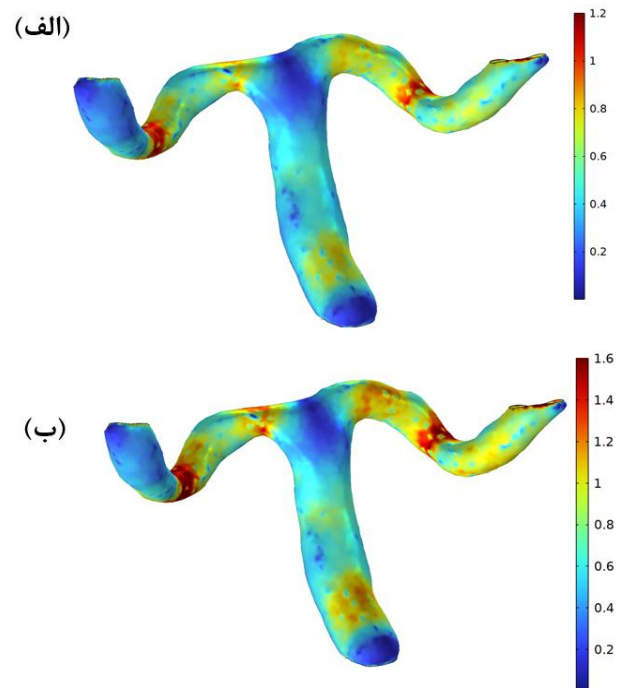


شکل ۶ اثر d_p بر روی CE

این روند افزایشی را می‌توان با توجه به نیروهای هیدرودینامیکی و مغناطیسی توضیح داد. نانوذرات بزرگ‌تر به دلیل داشتن حجم و مغناطش مؤثر بیشتر، نیروی مغناطیسی قوی‌تری دریافت می‌کنند و این امر باعث افزایش احتمال انحراف و تجمع آن‌ها در محل هدف تحت تأثیر میدان مغناطیسی می‌شود. از سوی دیگر، با بزرگ‌تر شدن ذرات، اثر نیروی درگ به نسبت کمتر می‌شود و مسیر حرکت ذرات به طور مؤثرتری در جهت خطوط نیرو هدایت می‌گردد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر ذرات، نرخ رشد راندمان جذب از حالت خطی خارج می‌شود و در ابعاد بزرگ‌تر به‌ویژه پس از ۷۵۰ نانومتر، تغییرات کمتر می‌شود؛ این موضوع بیانگر آن است که پس از یک حد بهینه، افزایش قطر ذرات ممکن است اثر محدودتری بر بهبود جذب داشته باشد و باید در طراحی نانوذرات تعادل بین قطر مناسب، توانایی عبور از رگ‌های باریک و راندمان هدف‌گیری در نظر گرفته شود.

از انقباض قلب، شدت جریان خون بیشتر شده و مقادیر تنش برشی دیواره به طور محسوسی افزایش یافته است. حداکثر مقدار تنش برشی جداره در حالت سیستول به حدود $1/6 \text{ Pa}$ رسیده که نسبت به حالت دیاستول رشد قابل توجهی را نشان می‌دهد. در این فاز، نواحی پیک تنش برشی در شاخه‌های انشعابی و محل‌های تغییر مقطع بیشتر پراکنده شده و توزیع ناهمگن‌تر و گسترده‌تری را نسبت به فاز دیاستول ایجاد کرده است.

این تغییرات نشان می‌دهد که فازهای چرخه قلبی تأثیر مستقیم بر میزان تنش‌های مکانیکی وارد بر دیواره رگ دارند که می‌تواند در بروز پدیده‌های همودینامیکی مانند بازآرایی سلول‌های اندوتلیال، رسوب چربی و تشکیل پلاک آترواسکلوئیک نقش داشته باشد. از منظر شبیه‌سازی دارورسانی مغناطیسی، مقادیر بالاتر تنش برشی جداره در فاز سیستول می‌تواند منجر به افزایش نیروی برشی وارد بر نانوذرات حامل دارو شود و احتمال جدا شدن ذرات از سطح دیواره و کاهش راندمان جذب را افزایش دهد. بنابراین، طراحی بهینه میدان مغناطیسی و در نظر گرفتن اثر فازهای دینامیک قلب برای افزایش کارایی دارورسانی مغناطیسی در بیماران مبتلا به بیماری‌های عروقی ضروری است.



شکل ۵ WSS برای حالت‌های (الف) دیاستول، و (ب) سیستول

مغناطیسی باشد. با این حال، در طراحی‌های بالینی، باید ملاحظات ایمنی مربوط به اعمال میدان‌های قوی‌تر نیز مد نظر قرار گیرد تا تعادل بین کارایی و ایمنی حفظ شود.

شکل (۸) روند تغییرات راندمان جذب را برای سه قطر مختلف ذره شامل ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ نانومتر در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی از ۰/۵ تا ۱ تسلا نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شدت میدان مغناطیسی، راندمان جذب برای هر سه اندازه ذره به صورت پیوسته و قابل توجهی افزایش یافته است.

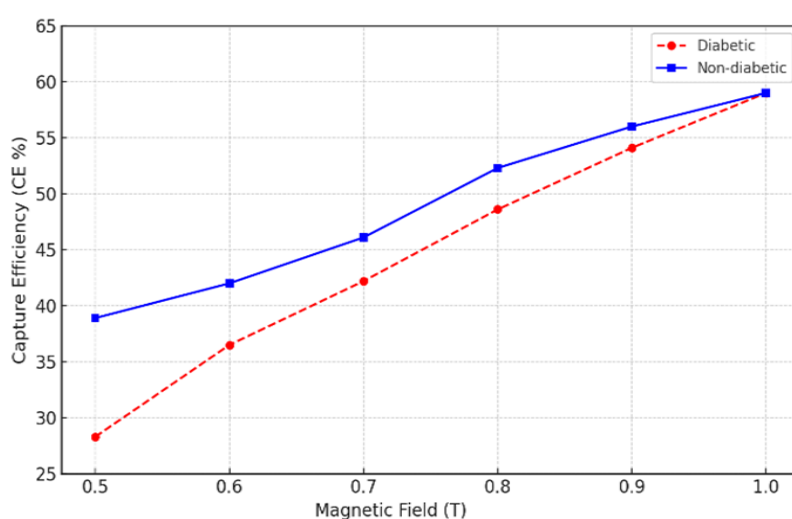
برای ذرات ۵۰۰ نانومتر، درصد جذب از حدود ۱۷/۵ درصد در میدان ۰/۵ تسلا به حدود ۴۰٪ در میدان ۱ تسلا رسیده است. در مورد ذرات ۷۵۰ نانومتر، درصد جذب از حدود ۲۴٪ به ۵۴٪ افزایش یافته، و برای ذرات ۱۰۰ نانومتر نیز راندمان جذب از ۳۳٪ به بیش از ۵۶٪ رسیده است.

این روند افزایشی برای هر سه قطر نشان دهنده تأثیر مستقیم شدت میدان مغناطیسی بر نیروهای مغناطیسی وارد بر نانوذرات است. افزایش شدت میدان منجر به افزایش گرادیان میدان در ناحیه هدف شده و در نتیجه نیروی مغناطیسی بیشتری به ذرات وارد می‌شود. این افزایش نیرو، توانایی ذرات برای غلبه بر نیروی درگ سیال و حرکت به سمت دیواره رگ را افزایش می‌دهد، و در نهایت منجر به افزایش راندمان جذب در بافت هدف می‌شود.

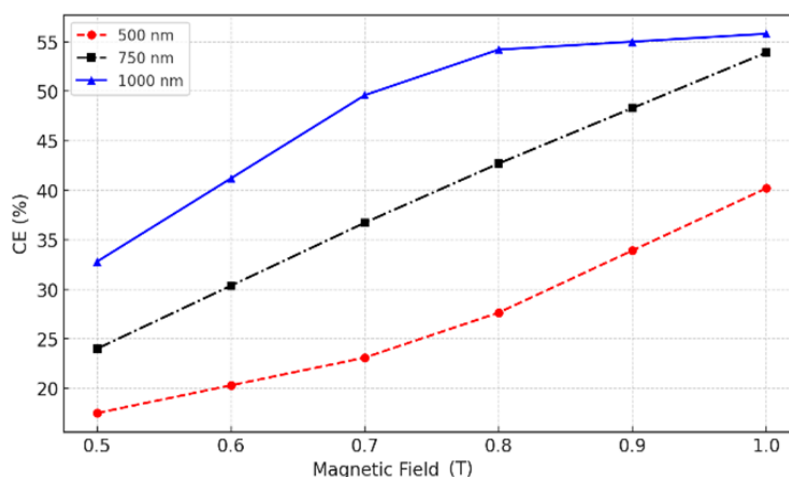
شکل (۷) به مقایسه راندمان جذب نانوذرات با قطر ثابت ۷۵۰ نانومتر بین فرد سالم (غیردیابتی) و فرد مبتلا به دیابت در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی شدت‌های زیر ۱ تسلا، راندمان جذب در فرد سالم بالاتر از فرد دیابتی است. به عنوان مثال، در شدت میدان ۰/۵ تسلا، راندمان جذب برای فرد سالم برابر با ۳۸/۳ درصد و برای فرد دیابتی ۲۸/۵ درصد گزارش شده است که نشان دهنده کاهش حدود ۱۰ درصدی راندمان جذب در اثر افزایش ویسکوزیته خون در بیماران دیابتی می‌باشد.

با افزایش شدت میدان مغناطیسی، اختلاف بین دو گروه کاهش می‌یابد و در شدت ۱ تسلا هر دو گروه به درصد جذب برابر با ۵۹٪ دست می‌یابند. این موضوع نشان دهنده آن است که افزایش شدت میدان مغناطیسی می‌تواند اثر منفی افزایش ویسکوزیته خون را تا حد زیادی جبران کند. این پدیده از طریق افزایش گرادیان میدان مغناطیسی و در نتیجه افزایش نیروی مغناطیسی وارد بر نانوذرات توضیح داده می‌شود. این نیرو، نانوذرات را در غلبه بر مقاومت هیدرودینامیکی ناشی از ویسکوزیته بالاتر یاری می‌دهد و سبب بهبود راندمان جذب می‌شود.

به طور کلی، نتایج این تحلیل تأکید می‌کند که در شرایط پاتولوژیک نظیر دیابت که ویسکوزیته خون افزایش می‌یابد، استفاده از شدت‌های بالاتر میدان مغناطیسی می‌تواند رویکردی مؤثر برای حفظ عملکرد بهینه در سامانه‌های دارورسانی



شکل ۷ مقایسه CE برای فرد دیابتی و غیردیابتی در شدت‌های مغناطیسی مختلف و $d_p = 750 \text{ nm}$



شکل ۸ اثر شدت میدان مغناطیسی بر روی CE

همچنین، بررسی اثر قطر نانوذرات حامل دارو نشان داد که با افزایش اندازه ذرات از ۲۵۰ به ۱۰۰۰ نانومتر، راندمان جذب به شکل معنی‌داری افزایش می‌یابد. تحلیل اثر شدت میدان مغناطیسی نیز نشان داد که افزایش این پارامتر منجر به تقویت گرادین میدان در ناحیه هدف و در نهایت بهبود جذب ذرات می‌گردد. افزون بر این، با هدف ارزیابی نقش ویسکوزیته خون در شرایط پاتولوژیک، مقایسه‌ای بین بیماران دیابتی و افراد سالم در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی صورت گرفت. نتایج این مقایسه نشان داد که در شدت‌های پایین میدان (۰/۵ تا ۰/۸ تسلا)، راندمان جذب در بیماران دیابتی به طور متوسط حدود ۸ تا ۱۰ درصد کمتر از افراد سالم است. با افزایش شدت میدان تا ۱ تسلا، این اختلاف کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود. این یافته تأکیدی بر آن است که در طراحی سامانه‌های دارورسانی مغناطیسی، لازم است تأثیر شرایط رئولوژیکی بیمار به ویژه در مبتلایان به بیماری‌های مزمن نظیر دیابت مد نظر قرار بگیرد و شدت میدان مغناطیسی به گونه‌ای بهینه انتخاب شود که کارایی و ایمنی سیستم حفظ گردد.

فهرست علائم

$(\text{kg/m}^3)\rho_b$	چگالی خون
μ	ویسکوزیته دینامیکی خون (Pa·s)
μ_p	ویسکوزیته پایه (Pa·s)
$\dot{\gamma}$	نرخ برش (1/s)
τ	تانسور تنش برشی (Pa)

همچنین، مشاهده می‌شود که ذرات بزرگ‌تر (۱۰۰۰ نانومتر) در تمام شدت‌های میدان، راندمان جذب بالاتری نسبت به ذرات کوچک‌تر دارند. این موضوع را می‌توان به افزایش نیروی مغناطیسی خالص و کاهش نسبی اثر نوسانات براونی در ذرات بزرگ‌تر نسبت داد.

با وجود مزایای میدان‌های قوی‌تر، لازم است تأکید شود که در کاربردهای بالینی واقعی، ملاحظات ایمنی فیزیولوژیکی و محدودیت‌های فنی در اعمال میدان‌های مغناطیسی بالا نیز باید مد نظر قرار گیرد. بنابراین، این تحلیل‌ها بر ضرورت بهینه‌سازی همزمان شدت میدان، اندازه ذرات، و هندسه سامانه مغناطیسی برای دستیابی به عملکرد بهینه و ایمنی درمانی تأکید دارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر مجموعه‌ای از پارامترهای فیزیکی و بیولوژیکی بر کارایی سامانه دارورسانی مغناطیسی در بیماران مبتلا به دیابت نوع ۲ با رویکرد عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که رفتار غیرنیوتنی خون بیماران دیابتی، به ویژه افزایش ویسکوزیته پلازما، تأثیر مستقیمی بر افزایش نیروی درگ وارد بر نانوذرات دارد و در نتیجه موجب کاهش راندمان جذب آن‌ها در بافت هدف می‌شود. تحلیل همودینامیکی جریان خون در دو فاز اصلی چرخه قلبی یعنی سیستول و دیاستول نیز نشان داد که در فاز سیستول، بیشینه سرعت جریان و تنش برشی دیواره به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ مسئله‌ای که لزوم لحاظ کردن نوسانات دینامیکی قلب را در مدل‌سازی‌های دقیق دارورسانی مغناطیسی آشکار می‌سازد.

واژه‌نامه

پیشنهادی ویراستار	واژه لاتین	پیشنهادی نویسنده
	magnetic drug targeting	دارورسانی مغناطیسی
	magnetic field intensity	شدت میدان مغناطیسی
	wall shear stress	تنش برشی دیواره
بازده جذب	capture Efficiency	راندمان جذب
	magnetization	مغناطش
	basilar artery	سرخرگ قاعده‌ای
	posterior cerebral artery	سرخرگ مغزی پسین
	magnetic flux density	چگالی شار مغناطیسی
	scalar magnetic potential	پتانسیل اسکالر مغناطیسی

تقدیر و تشکر

τ_y	تنش تسلیم (Pa)
D	تانسور نرخ تغییر شکل (1/s)
$\vec{u}_b$	بردار سرعت خون (m/s)
$\vec{u}_p$	بردار سرعت ذره (m/s)
p	فشار (Pa)
n	شاخص رفتار جریان
m_p	پارامتر تنظیم کننده
$\vec{H}$	شدت میدان مغناطیسی (A/m)
$\vec{B}$	میدان مغناطیسی (T)
$\vec{M}$	مغناطیس (A/m)
M_s	مغناطیس اشباع (A/m)
$\vec{F}_d$	نیروی درگ (N)
$\vec{F}_m$	نیروی مغناطیسی (N)
$\vec{F}_b$	نیروی شناوری (N)
d_p	قطر نانوذره (nm)
ρ_p	چگالی نانوذره (kg/m ³)
V_p	حجم نانوذره (m ³)
Re_p	عدد رینولدز نانوذره
C_d	ضریب درگ
WSS	تنش برشی دیواره (Pa)
N_c	تعداد نانوذرات جذب شده
N_t	تعداد کل نانوذرات تزریق شده
CE	راندمان جذب (%)
A_{BA}	مساحت شریان بازیلار (m ²)
A_{RP}	مساحت شریان مغزی خلفی راست (m ²)
A_{LP}	مساحت شریان مغزی خلفی چپ (m ²)
L_m	طول آهن‌ربای استوانه‌ای (mm)
R_m	شعاع آهن‌ربای استوانه‌ای (mm)
χ	حساسیت مغناطیسی

مراجع

- [1] R. L. Siegel et al., "Cancer statistics," *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, vol. 73, pp. 17–48, 2023.
<https://doi.org/10.3322/caac.21763>
- [2] E. Mohebbi et al., "Iran Cancer Statistics in 2012 and projection of cancer incidence by 2035," *Basic & Clinical Cancer Research*, vol. 9, no. 3, pp. 3–22, 2017.

- [3] Z. Abbas and S. Rehman, *An overview of cancer treatment modalities*. Neoplasm, Rijeka: IntechOpen, 2018.
- [4] M. M. Selim et al., "A review of magnetic nanoparticles used in nanomedicine," *APL Materials*, vol. 12, p. 010601, 2024. [https://doi.org/ 10.1063/5.0174561](https://doi.org/10.1063/5.0174561)
- [5] R. Kamali, G. Keshavarzi, "Computational Simulation of Magnetic Drug Targeting in Human Body," in *Proceeding International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, Canada, pp. 11–16, June 19–22, 2011. [https://doi.org/ 10.1115/ICNMM2011-58115](https://doi.org/10.1115/ICNMM2011-58115)
- [6] H. Badfar et al., "Numerical simulation of magnetic drug targeting to the stenosis vessel using Fe₃O₄ magnetic nanoparticles under the effect of magnetic field of wire," *Cardiovascular Engineering and Technology*, vol. 11, pp. 162–175, 2020. [https://doi.org/ 10.1007/s13239-019-00446-x](https://doi.org/10.1007/s13239-019-00446-x)
- [7] A. Ardalan et al., "The Effect of the Non-Newtonian Behavior of Blood on Capture Efficiency of Particles in a Vessel with a Local Symmetrical Stenosis," *Bio Nano Science*, vol. 14, pp. 919–929, 2024. <https://doi.org/10.1007/10.1007/s12668-024-01304-4>
- [8] M. C. Lindemann et al., "FEM based simulation of magnetic drug targeting in a multibranched vessel model," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 210, p. 106354, 2021. [https://doi.org/ 10.1016/j.cmpb.2021.106354](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106354)
- [9] Z. Xu et al., "Numerical simulation of magnetic drug targeting for lung cancer therapy using a bulk superconducting magnet," *Drug Delivery*, vol. 32, p. 2490836, 2025. [https://doi.org/ 10.1080/10717544.2025.2490836](https://doi.org/10.1080/10717544.2025.2490836)
- [10] A. A. Alizadeh et al., "Numerical investigation of the injection angle of carrier nanoparticles under the effect of different magnetic fields," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 578, p. 170836, 2023. [https://doi.org/ 10.1016/j.jmmm.2023.170836](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170836)
- [11] S. I. Bernad et al., "Hemodynamic effects on particle targeting in the arterial bifurcation for different magnet positions," *Molecules*, vol. 24, no. 13, p. 2509, 2019. <https://doi.org/10.3390/molecules24132509>
- [12] F. Mishima et al., "Development of magnetic field control for magnetically targeted drug delivery system using a superconducting magnet," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, pp. 2303–2306, 2007. [https://doi.org/ 10.1109/TASC.2007.898413](https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898413)
- [13] J. Sun et al., "Blood viscosity in subjects with type 2 diabetes mellitus: roles of hyperglycemia and elevated plasma fibrinogen," *Frontiers in Physiology*, vol. 13, p. 827428, 2022. [https://doi.org/ 10.3389/fphys.2022.827428](https://doi.org/10.3389/fphys.2022.827428)
- [14] E. Succurro et al., "Elevated whole blood viscosity is associated with an impaired insulin-stimulated myocardial glucose metabolism," *Cardiovascular Diabetology*, vol. 23, no. 431, 2024. [https://doi.org/ 10.1186/s12933-024-02513-7](https://doi.org/10.1186/s12933-024-02513-7)
- [15] L. J. Tamariz et al., "Blood viscosity and hematocrit as risk factors for type 2 diabetes mellitus: the atherosclerosis risk in communities (ARIC) study," *American Journal of Epidemiology*, vol. 168, pp. 1153–1160, 2008. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn243>

- [16] P. Gyawali et al., "Erythrocyte aggregation and metabolic syndrome," *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, vol. 57, pp. 73–83, 2014. <https://doi.org/10.3233/CH-131769>
- [17] M. Datta et al., "CFD simulation of arterial hypotension in a left anterior coronary artery section with potential clinical relevance," *Indian Chemical Engineer*, vol. 66, pp. 337–348, 2024. <https://doi.org/10.1080/00194506.2024.2368510>
- [18] A. G. Rahma et al., "Blood flow CFD simulation on a cerebral artery of a stroke patient," *SN Applied Sciences*, vol. 4, no. 261, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05149-y>
- [19] M. Mahmoodpour et al., "A three dimensional numerical investigation on trajectories and capture of magnetic drug carrier nanoparticles in a Y-shaped vessel," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, vol. 61, p. 102207, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.102207>

Evaluation of the Human Brain Mechanical Response During an Impact with a Golf Ball

Research Article

Keyvan Varmazari¹, Akbar Allahverdizadeh² , Farid Vakili-Tahami³ , Pezhman Namashiri⁴ 

 [10.22067/jacsm.2025.91927.1312](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.91927.1312)

Abstract--In this study, a finite element model of the human head has been developed to investigate the impact of a golf ball. Skull and brain geometries are extracted from medical images and their material models are considered to be linear elastic and viscoelastic, respectively. The ball hits the frontal area of the skull, and to evaluate the mechanical response of the brain under different boundary conditions, two types of fixed and free boundary conditions for the skull have been used. The results show that the skull boundary condition makes a significant difference in the brain's response to impact even at impact durations of 0.7 ms. In the case where the skull is fixed, extreme oscillations in the mechanical response are seen and furthermore, the stress, pressure and head acceleration increase significantly. The results of the present study can be considered as a starting point for investigating the effect of different boundary conditions in human head models and evaluating the behavior of the brain when hit by a projectile.

Keywords--Traumatic brain injury, Impact, Brain deformation, Finite element method, Computational modeling, Biomechanical analysis.

1- Introduction

APPROXIMATELY 10 million people in the world suffer from traumatic brain injury every year, and a significant number of these patients face death or may be temporarily or permanently disabled [1]. Study have shown that the possibility of golf ball collision with players or people who watch the game is common [2]. In the present study, a finite element model of human head is developed by considering the geometrical structure of the skull and brain. The stress and pressure response of the brain is evaluated when the golf ball hits the anterior area of the skull. The geometry of the brain is obtained from medical images and incorporates the bumpy surface of this tissue. Furthermore, in order to investigate the effect of different boundary conditions on the brain response, two types of simulation with free and fixed skull are performed under similar impact conditions. Thus, the effect of the type of boundary conditions in the

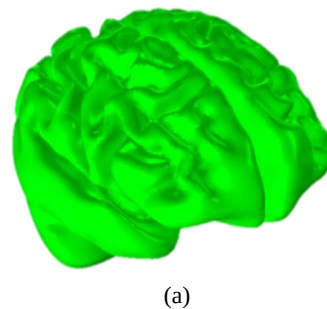
dynamics of the brain is examined.

2- Methods

In this study, the geometries of the skull and brain were reconstructed from medical images of a 45-year male subject. The brain and skull surfaces were first segmented using the Mimics software, followed by pre-processing in 3-Matic. Subsequently, the finalized models were imported into COMSOL Multiphysics for analysis. Parts (a) and (b) of Fig. 1 illustrate the geometries of the brain and skull, respectively. After constructing the brain and skull geometries, the geometrical model of the golf ball was designed according to the standard international dimensions. In part (c) of Fig. 1, the position of the ball in the final model is presented. Assuming isotropic mechanical properties for both the skull and the golf ball, they are modeled as linear elastic. In the present study, the mechanical behavior of the brain tissue is considered viscoelastic, and the relaxation shear modulus $G(t)$ is defined as follows [3]:

$$G(t) = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty})\exp(-\beta t) \quad (1)$$

where G_{∞} , G_0 and β are long-term shear modulus, short-term shear modulus, and decay factor, respectively.



* Manuscript received February 01, 2025, Revised July 29, 2025, Accepted November 25, 2025.

¹ MSc, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

² Corresponding author. Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
Email: allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

³ Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

⁴ MSc, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

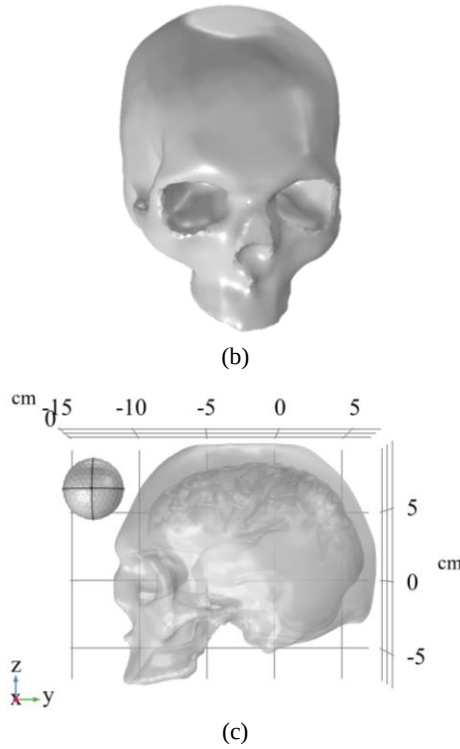


Fig. 1. (a) Brain, (b) Skull, (c) The final model of the skull, brain and golf ball.

A tie constraint was employed to define the interaction between the brain and skull, while a penalty algorithm was used to solve the contact equations. In this approach, the contact pressure T_n is expressed as a function of the penalty coefficient p_n and the gap distance between the contact surfaces g_n as:

$$T_n = -p_n g_n + p_0 \text{ if } g_n < \frac{p_0}{p_n} \quad (2)$$

here, p_0 denotes the contact pressure at the initial collision interface, corresponding to the condition where no gap exists between the contacting surfaces.

3- Results and discussion

The initial impact of the golf ball with the skull occurred at 0.5 ms, and the contact persisted until 1.2 ms. The stress responses of the brain in the coup and contrecoup regions are presented in Fig. 2. In the coup region, during the collision between the ball and the skull, the tissue exhibited nearly similar behavior under both boundary conditions. Over time, when the skull was modeled as free, the stress decreased abruptly, followed by the arrival of a secondary stress wave in the coup region, leading to another increase in stress. However, Under the fixed boundary condition, the brain experienced pronounced oscillations, indicating that, after the impact, the head was unable to move freely and the energy generated by the collision remained confined within the brain tissue. The maximum von Mises stress generated in the models of this study was related to fixed boundary condition for the skull.

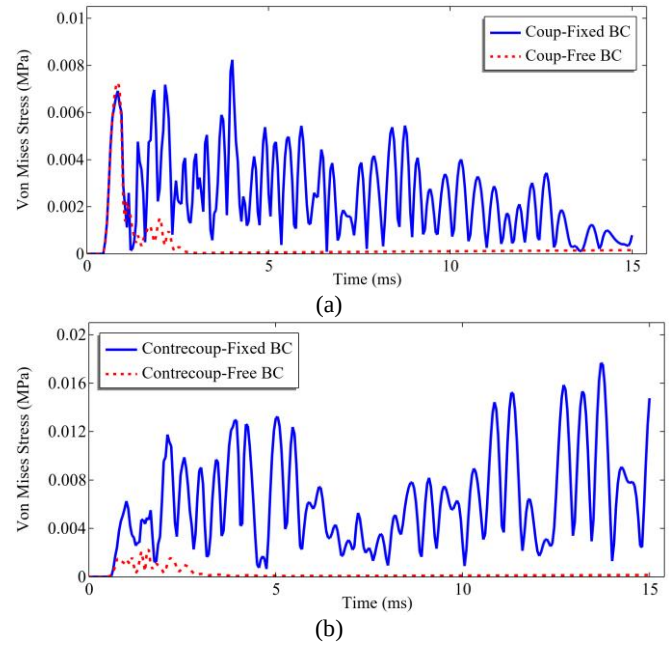


Fig. 2. Brain tissue stress under fixed and free boundary conditions for the skull. (a) Coup, (b) Contrecoup.

The intracranial pressure response of the brain during collision with the golf ball under free and fixed skull boundary conditions is shown in Fig. 3. During the initial contact between the golf ball and the skull surface, positive pressures ranging from 0.1 to 2.2 MPa were observed in the coup region, while other regions experienced pressures between 0 and -0.1 MPa. This positive pressure results from the energy transmitted from the golf ball to the skull and brain tissue during the impact. Over time, this energy wave propagated through the brain tissue, reaching the central region of the brain within 0.8 ms. A previous study reported brain injury criteria of 0.05639 to 0.06712 MPa and -0.04614 to -0.05827 MPa for intracranial pressure in the coup and contrecoup regions, respectively, corresponding to a 25–75% probability of brain damage [4]. In the present study, the brain pressure ranged from -0.4 to 0.5 MPa, exceeding these reported thresholds and suggesting that impact by a golf ball can potentially cause brain injury.

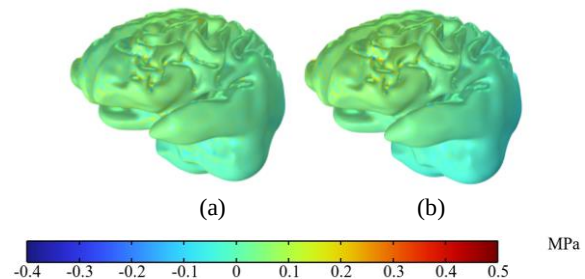


Fig. 3. Intracranial pressure at time of 0.8 ms during impact with the golf ball. (a) Fixed skull, (b) Free skull.

4- Conclusion

In the present study, a finite element model of the human head was developed to investigate the effects of golf ball

impact and to evaluate the resulting stress and intracranial pressure responses under free and fixed boundary conditions of the skull. When the skull was fixed, strong oscillations were observed in both stress and pressure responses. The maximum stress generated in the skull during impact was 9 MPa, which is substantially lower than the von Mises stress fracture threshold of 75 MPa reported in previous studies. Furthermore, the maximum von Mises stresses in the brain tissue were obtained under the fixed-skull condition, with values of 0.009 and 0.018 MPa in the coup and contrecoup regions, respectively. These values exceed the reported thresholds of 0.0084 and 0.0078 MPa, indicating that the stresses induced in the coup and contrecoup regions during golf ball impact are sufficient to cause brain injury.

5- References .

- [1] A. I. Maas, D. K. Menon, G. T. Manley, M. Abrams, et al., "Traumatic brain injury: progress and challenges in prevention, clinical care, and research," *The Lancet Neurology*, vol. 21, no. 11, pp. 1004-1060, (2022). [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(22\)00309-X](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(22)00309-X).
 - [2] M. E. Bait, "Golfing injuries: an overview," *Sports Medicine*, vol. 16, no. 1, pp. 64-71, (1993). <https://doi.org/10.2165/00007256-199316010-00006>.
 - [3] H. Li, R.-J. Lu, P. Wu, Y. Yuan, et al., "Numerical simulation and analysis of midfacial impacts and traumatic brain injuries," *Annals of translational medicine*, vol. 9, no. 6, p. 459, (2021). <https://doi.org/10.21037/atm-21-134>.
 - [4] J. G. Beckwith, W. Zhao, S. Ji, A. G. Ajamil, et al., "Estimated brain tissue response following impacts associated with and without diagnosed concussion," *Annals of biomedical engineering*, vol. 46, no. 6, pp. 819-830, (2018). <https://doi.org/10.1007/s10439-018-1999-5>.
-



ارزیابی پاسخ مکانیکی مغز انسان در هنگام برخورد با توپ گلف*

مقاله پژوهشی

پژمان نمه شیرینی^(۴)فرید وکیلی تهامی^(۳)اکبر اللهوردی زاده^(۲)کیوان ورمزیاری^(۱)

doi 10.22067/jacsm.2025.91927.1312

چکیده در این پژوهش یک مدل المان محدود از سر انسان برای بررسی اثر برخورد توپ گلف توسعه داده شده است. هندسه‌های مجسمه و مغز از تصاویر پزشکی استخراج و مدل مادی هر یک به ترتیب به صورت الاستیک خطی و ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده‌اند. برخورد توپ به ناحیه جلویی مجسمه صورت می‌گیرد و برای ارزیابی پاسخ مکانیکی مغز تحت شرایط مرزی مختلف، از دو نوع شرط مرزی مقید و آزاد برای مجسمه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نوع شرط مرزی مجسمه، حتی در مدت زمان برخورد ۰/۷ میلی‌ثانیه، تفاوت قابل توجهی در پاسخ مغز به ضربه ایجاد می‌کند. در حالتی که مجسمه مقید شده است، نوسانات شدیدی در پاسخ مکانیکی دیده می‌شود و علاوه بر آن، تنش، فشار و شتاب سر به طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کنند. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان نقطه شروعی برای بررسی اثر شرایط مرزی مختلف در مدل‌های سر انسان و ارزیابی رفتار مغز در برخوردها با پرتابه‌ها در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی ضربه مغزی، ضربه، تغییر شکل مغز، روش المان محدود، مدل‌سازی محاسباتی، تحلیل بیومکانیکی.

مقدمه

نظر گرفتند و مدل‌های اخیر نیز تلاش کردند که سازوکار مولکولی ناشی از ضربه به بافت مغز را در شبیه‌سازی لحاظ کنند [5].

تحقیقات نشان داده است که احتمال برخورد توپ گلف به بازیکنان و یا افرادی که بازی را تماشا می‌کنند رایج است [6]. علاوه بر این، آسیب ناشی از برخورد توپ گلف یکی از مهم‌ترین علل آسیب سر در ضربات مرتبط با ورزش است [7]. این ضربات می‌تواند باعث ایجاد آسیب‌های جبران‌ناپذیر و یا مرگ و میر بازیکنان یا تماشاگران در زمین‌های گلف شود [8]. واتانابه و همکاران [9] برخورد یک توپ گلف با سرعت بالا را به سر یک مرد ۵۰ ساله گزارش دادند که آسیب مورد نظر باعث بیهوشی فوری شخص و در نهایت منجر به مرگ شده بود. مک‌گرگور [10] به بررسی احتمال و شدت آسیب سر کودکان ۳ تا ۱۳ ساله

مدل‌سازی محاسباتی در تحقیقات مختلف نشان داده است که می‌تواند فهم ما را از پدیده‌های پیچیده مربوط به بافت‌های بیولوژیکی گسترش دهد [1,2]. ضربه مغزی یا ترومای آسیب مغز یک مشکل حاد در جهان می‌باشد. هر ساله تقریباً ۱۰ میلیون نفر در جهان از ضربه مغزی رنج می‌برند و تعداد قابل توجهی از این بیماران با مرگ روبه‌رو می‌شوند و یا ممکن است به طور موقت یا دائم دچار ناتوانی شوند [3]. علاوه بر این، تحقیقات نشان داده است که ضربه مغزی با بیماری‌هایی همانند آلزایمر، پارکینسون، التهاب عصبی مزمن و سایر بیماری‌ها مرتبط است [3,4]. مدل‌های بیومکانیکی قابل توجهی بر روی ضربه مغزی کار کردند. مدل‌های اولیه عمدتاً هندسه و ساختار مغز را ساده در

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۱/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۸/۴ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

(۴) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

لی و همکاران [17] به بررسی بیومکانیک ضربه برای بهبود محافظت در مقابل آسیب ضربه به فک و صورت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که یک رابطه خطی بین شدت ضربه مغزی و انرژی برخورد وجود دارد. پرکینس و همکاران [18] یک مدل المان محدود را برای بررسی بیومکانیک ضربه توپ فوتبال در دو حالت اطلاع و عدم اطلاع ورزشکار از برخورد توسعه دادند. نتایج نشان داد که مقدار آسیب از کم به زیاد به ترتیب در نواحی پشتی، جداری و قدامی مغز رخ می‌دهد. پاوان و همکاران [19] با به‌کارگیری سه نوع هندسه متفاوت، دینامیک بافت مغز در ضربه را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اختلاف پاسخ مکانیکی بافت مغز در هنگام شرایط ضربه یکسان، برای هندسه‌هایی که تفاوت جزئی با یکدیگر دارند ناچیز می‌شود. کارمو و همکاران [20] یک مدل المان محدود سر را توسعه دادند که از تصاویر پزشکی زن ۶۵ ساله استخراج شده بود. مدل آن‌ها توانایی پیش‌بینی آسیب سر در اثر اعمال شتاب‌های مختلف را از خود نشان داد. آن‌ها بیان کردند که چگونه ضربات پی‌درپی به سر می‌تواند باعث ایجاد آسیب عصبی نوروهای مغزی شود. به تازگی، ضرغامی و همکاران [21] با بررسی اثر ضربه توپ فوتبال در برخوردهای قدامی و جانبی مغز مدلی ارائه دادند که فقط شامل ساختار هندسی بافت مغز می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که در ضربات جانبی، مغز دچار آسیب شدیدتری می‌شود و در این نوع از ضربه‌ها فشار مغز با سرعت بیشتری گسترش می‌یابد. در پژوهش حاضر یک مدل المان محدود سر انسان با لحاظ کردن ساختار هندسی مجسمه و مغز توسعه داده می‌شود که پاسخ تنش و فشار مغز در هنگام برخورد توپ گلف با ناحیه قدامی سر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بخش عمده تحقیقات پیشین سطوح مغز را به صورت صاف در نظر گرفتند [12] و [15-18]. هندسه بافت مغز مورد استفاده در این پژوهش از تصاویر پزشکی استخراج شده است و شامل برآمدگی‌ها و تورفتگی‌های سطح بیرونی است. علاوه بر این، به منظور بررسی اثر شرایط مرزی متفاوت بر روی پاسخ مغز، دو نوع شبیه‌سازی با شرایط مرزی آزاد و مقید انجام می‌گیرد که شرایط برخورد توپ گلف در هر دو حالت یکسان است. بدین ترتیب اثر نوع شرایط مرزی در پاسخ دینامیک مغز بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

ساختارهای هندسی مدل

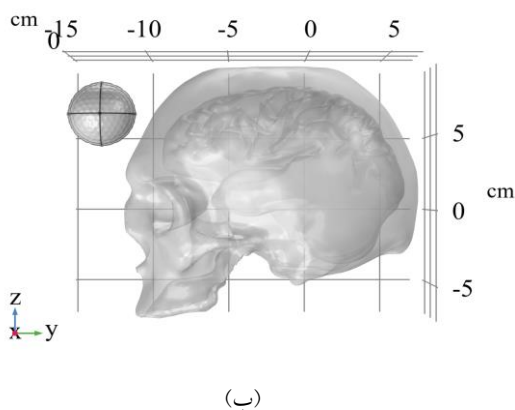
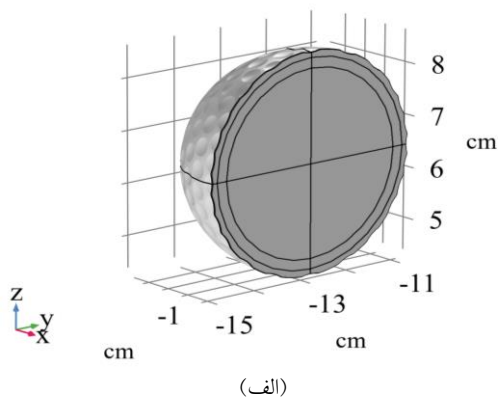
در این تحقیق هندسه‌های مجسمه و مغز از تصاویر پزشکی یک

بر اثر چوب یا توپ گلف پرداخت. او گزارش داد که برخورد توپ گلف آسیب جبران‌ناپذیری به سر وارد می‌کند و برای برخی آسیب‌ها استفاده از بخیه برای درمان لازم بوده است. بنابراین، بررسی آسیب ناشی از ضربه توپ گلف به سر انسان، می‌تواند شناخت ما را از سازوکار آسیب مغزی ناشی از برخورد افزایش دهد.

ناهوم و همکاران [11] دو سری آزمایش تجربی بر روی سر جسد انسان انجام دادند و فشار مغز را اندازه‌گیری کردند. لی و همکاران [12] با استفاده از روش المان محدود، رفتار کلاه جنگی و بیومکانیک سر را در اثر ضربه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از پدهای فوم نرم‌تر محافظت بهتری را برای سر ایجاد می‌کند. همچنین، شبیه‌سازی‌ها نشان داد که افزایش ضخامت کلاه‌های جنگی احتمال آسیب را کاهش می‌دهد. آتسومی و همکاران [13] یک مدل المان محدود برای پیش‌بینی ضربه مغزی ارائه دادند که در آن آناتومی قسمت‌های عمقی و داخلی بافت مغز طراحی شده بود و پاسخ وابسته به نرخ بافت مغز را در شبیه‌سازی گنجانده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که تفاوت در نواحی مختلف هندسه بر روی تمرکز کرنش بافت اثر می‌گذارد و تفاوت در مدل‌های مادی اثر خود را بر روی مقدار بیشینه کرنش نشان می‌دهد.

میلر و همکاران [14] به ارزیابی پاسخ محلی مغز به ضربات سر در فوتبال جوانان پرداختند که هندسه بافت مغز را به صورت دقیقی استخراج و از روش المان محدود استفاده کردند. آن‌ها ساختار هندسی مجسمه را به صورت سطوح صافی در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که جهت ضربه و محور چرخش سر در ارزیابی آسیب ضربه مغزی تأثیر به‌سزایی دارد. حسن و همکاران [15] برای مدل‌سازی پاسخ مغز در هنگام اعمال نیرو به قسمت قدامی سر، یک مدل المان محدود سه‌بعدی را توسعه دادند و ساختارهای مغز، مایع مغزی - نخاعی و مجسمه را در شبیه‌سازی لحاظ کردند. آن‌ها اثر شرایط مرزی مختلف را برای ناحیه اتصال مجسمه به گردن بررسی کردند و نشان دادند که مقید کردن ناحیه اتصال مجسمه به گردن به عنوان شرایط مرزی، حجم محاسبات را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و برای ساده‌سازی مدل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. فرید و همکاران [16] یک مدل المان محدود سه‌بعدی را برای بررسی بیومکانیک آسیب سر انسان در اثر ضربه توپ گلف و انفجار ارائه دادند. آن‌ها با هدف ارائه یک محدوده کلی برای نرخ‌های کرنش و شتاب سر در ضربه و انفجار شبیه‌سازی‌های انجام دادند.

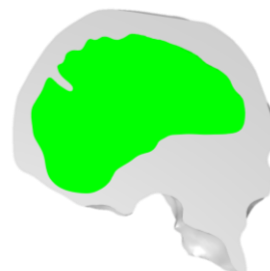
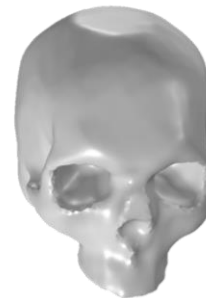
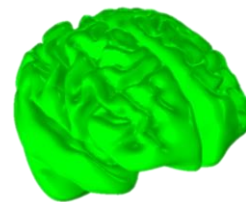
بعد از تهیه هندسه‌های مغز و جمجمه، ساختار هندسی توپ گلف بر اساس قوانین بین‌المللی این ورزش طراحی شد [23]. قطر توپ برابر $42/67$ میلی‌متر در نظر گرفته شد که شامل سه لایه درونی، میانی و بیرونی بود. قطر هر لایه به ترتیب برابر با $34/67$ ، 6 و 2 میلی‌متر فرض شد. برش مقطعی از توپ گلف در قسمت (الف) (شکل ۲) نمایش داده شده است. در قسمت (ب) شکل مذکور محل قرارگیری توپ و مدل نهایی مغز و جمجمه نمایش داده شده است.



شکل ۲ (الف) مدل هندسی توپ گلف، (ب) مدل نهایی جمجمه، مغز و توپ گلف

در حالت فیزیولوژیکی، جدار داخلی جمجمه ضخامت زیادی ندارد اما به دلیل آنکه در این پژوهش سایر لایه‌ها و ساختارهای هندسی سر انسان لحاظ نشده بود، جدار داخلی جمجمه ضخیم‌تر شده است. دلیل عدم گنجاندن مایع مغزی - نخاعی و سایر لایه‌ها، مربوط به کیفیت تصاویری است که هندسه‌ها از آن‌ها استخراج شده است. به دلیل کنتراست پایین تصاویر، امکان انجام فرایند ماسک زدن مایع مغزی - نخاعی یا

مرد سالم ۴۵ ساله استخراج شدند. ابتدا سطوح بافت مغز و جمجمه در نرم‌افزار Mimics مشخص شدند، سپس در نرم‌افزار 3-Matic فرایند پیش‌پردازش بر روی آن‌ها صورت گرفت و در نهایت، مدل‌ها در COMSOL فراخوانی شدند. قسمت‌های (الف) و (ب) در شکل ۱) به ترتیب هندسه‌های بافت مغز و جمجمه را نشان می‌دهند و در قسمت (پ) برشی از مدل قرار داده شده است تا محل قرارگیری مغز در داخل جمجمه مشخص باشد. به دلیل عدم دسترسی به تصاویر پزشکی با کیفیت، استخراج نواحی دیگر سر شامل مایع مغزی - نخاعی یا سایر لایه‌های سخت شامه و نرم شامه ممکن نبود. تهیه این نواحی نیازمند دسترسی به نوعی از تصاویر پزشکی می‌باشد که برش‌های مقطعی با تعداد بالایی را ارائه می‌دهند و از طرفی کنتراست تصاویر نیز به اندازه‌ای باشد که پیکسل‌های هر لایه به خوبی از یکدیگر متمایز شوند [22].



شکل ۱ (الف) ساختار هندسی مغز، (ب) مدل هندسی جمجمه، (پ) برش عرضی مدل شامل مغز و جمجمه

$$\vartheta = \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که پارامترهای مربوط به هر کدام از اجزای مدل در جدول (۱) قرار داده شده است.

تحقیقات مختلف نشان دادند که بافت مغز خاصیتی ویسکوالاستیک دارد و رفتار آن وابسته به نرخ تغییر شکل است [27,28]. به همین دلیل در پژوهش حاضر نیز خاصیت ویسکوالاستیک بافت مغز گنجانده شده است و مدول برشی آسودگی $G(t)$ به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد [17]:

$$G(t) = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty}) \exp(-\beta t) \quad (3)$$

که در آن G_0 ، G_{∞} و β به ترتیب مدول برشی بلند مدت، مدول برشی کوتاه مدت و ضریب تحلیل هستند که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با $0/168$ مگاپاسکال، $0/528$ مگاپاسکال و 35 یک بر ثانیه (s^{-1}) اتخاذ شده است [15].

جدول ۱ مقادیر پارامترهای مدول یانگ و ضریب پوواسون بافت مغز، مجموعه و لایه‌های متفاوت توپ گلف [15,29]

پارامتر	مقدار	واحد	توضیحات
E_{brain}	۵/۰۴	MPa	مدول الاستیک بافت مغز
ν_{brain}	۰/۴۹۹۶	-	ضریب پوواسون بافت مغز
ρ_{brain}	۱۰۴۰	kg m ⁻³	چگالی بافت مغز
E_{skull}	۶۵۰۰	MPa	مدول الاستیک جمجمه
ν_{skull}	۰/۲	-	ضریب پوواسون جمجمه
ρ_{skull}	۲۰۷۰	kg m ⁻³	چگالی جمجمه
$E_{\text{ball-ol}}$	۳۵۰	MPa	مدول الاستیک لایه بیرونی توپ
$\nu_{\text{ball-ol}}$	۰/۴۵	-	ضریب پوواسون لایه بیرونی توپ
$\rho_{\text{ball-ol}}$	۹۵۰	kg m ⁻³	چگالی لایه بیرونی توپ
$E_{\text{ball-ml}}$	۳۰	MPa	مدول الاستیک لایه میانی توپ
$\nu_{\text{ball-ml}}$	۰/۴۹	-	ضریب پوواسون لایه میانی توپ
$\rho_{\text{ball-ml}}$	۱۱۵۰	kg m ⁻³	چگالی لایه میانی توپ
$E_{\text{ball-il}}$	۵۰	MPa	مدول الاستیک لایه درونی توپ
$\nu_{\text{ball-il}}$	۰/۴۹	-	ضریب پوواسون لایه درونی توپ
$\rho_{\text{ball-il}}$	۱۱۵۰	kg m ⁻³	چگالی لایه درونی توپ

ماده خاکستری و سفید مغز مقدور نبود. برای آنکه بتوان این نواحی را از تصاویر استخراج کرد، لازم است تصاویر با کیفیت و اسلایدهایی با ضخامت کم تهیه شود [22]. برخی پژوهش‌های دیگر نیز از گنجاندن مایع مغزی - نخاعی صرف نظر کردند. به عنوان مثال روان و همکاران [24] در پژوهشی سه مدل از سر را مورد بررسی قرار دادند که در مدل اول یک لایه کروی از جمجمه، پر شده با سیال غیر لزج، استفاده شده بود. در مدل دوم ۵۰ درصد از سر مدل شده بود و تمامی محتوای داخلی جمجمه را به صورت یک ماده غیر لزج توصیف کردند که شامل مایع مغزی - نخاعی نبود. در مدل سوم نیز اثرات مایع مغزی - نخاعی را مورد ارزیابی قرار داده بودند. عدم گنجاندن مایع مغزی - نخاعی در پژوهش حاضر می‌تواند پاسخ ضربه را تحت تاثیر قرار داده و منجر به تولید رفتار نوسانی در مغز شده باشد. علاوه بر این، مدل مغز باید دستکم شامل ماده خاکستری و سفید باشد زیرا در سازوکار آسیب مغزی و در رفتار مکانیکی و پاسخ به ضربه نقش مهمی را بازی می‌کنند [25]. در نظر نگرفتن ساختارهای مایع مغزی - نخاعی، ماده خاکستری و سفید مغز از محدودیت‌های این پژوهش هستند که به دلیل کاهش حجم محاسبات و عدم دسترسی به تصاویر با کیفیت می‌باشد. با گنجاندن این ساختارها لازم بود تا مدل‌های مادی مربوط نیز تعریف شوند و ترکیب این اجزا موجب افزایش حجم محاسبات و پیچیدگی مدل می‌شد. از آنجایی که هدف پژوهش توسعه چهارچوبی برای مدل المان محدود سر انسان با پیاده‌سازی سرراست بود، از گنجاندن سایر ساختارها صرف نظر شد. برخی از تحقیقات پیشین نیز ماده خاکستری و سفید را برای ساده‌سازی در مدل لحاظ نکردند [17,21].

توصیف خواص مکانیکی و فرمول‌بندی مدل

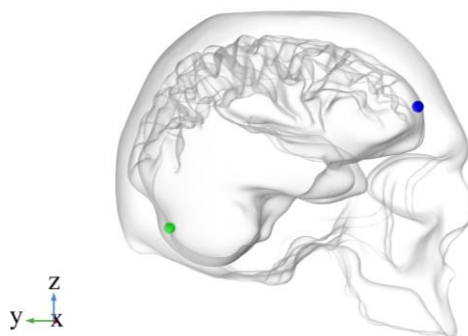
با فرض همسانگرد بودن خواص مکانیکی بافت مغز، جمجمه و توپ گلف و توصیف آن‌ها با استفاده از مدول یانگ E و ضریب پوواسون ν ، تانسور الاستیسیته $\mathbb{C}$ می‌تواند توسط روابط (۱) و (۲) تعریف شود [26]:

$$\mathbb{C} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \vartheta \quad (1)$$

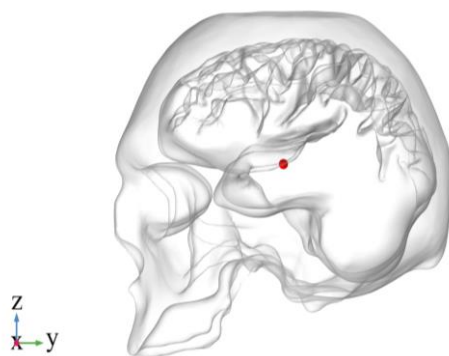
وون مایزس، فشار مغز و اندازه شتاب به منظور ارزیابی پاسخ حجمه و مغز در اثر ضربه با توپ گلف استفاده می‌شود. محل استخراج نتایج مربوط به تنش وون مایزس و فشار مغز نواحی برخورد و مقابل برخورد در قسمت (الف) شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج شتاب برای نقطه‌ای در مرکز جرم مجموع مغز و حجمه استخراج گردید [15]. محل مذکور در قسمت (ب) شکل ۳ نمایش داده شده است. موقعیت مرکز جرم r_{cm} توسط COMSOL و با استفاده از رابطه (۵) محاسبه گردید [34]:

$$r_{cm} = \frac{\int_{\Omega} \rho(r)r dV}{\int_{\Omega} \rho(r) dV} \quad (5)$$

که در آن Ω ، $r=(x,y,z)$ و $\rho(r)$ به ترتیب مجموع حجم حجمه و مغز، بردار موقعیت و توزیع چگالی در مدل هستند.



(الف)



(ب)

شکل ۳ (الف) تعریف نقاطی در نواحی برخورد (آبی) و مقابل برخورد (سبز) برای استخراج نتایج تنش و فشار مغز، (ب) تعیین نقطه‌ای در مرکز جرم مجموع مغز و حجمه برای محاسبه تغییرات اندازه شتاب

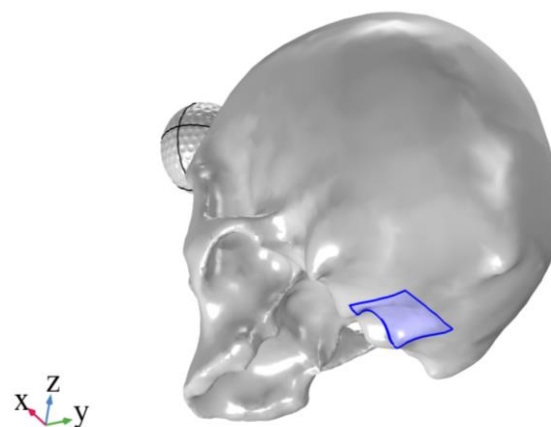
از آنجایی که در شبیه‌سازی برخورد، توپ گلف و حجمه با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند، توصیف شرایط تماسی مسئله در ادامه بیان می‌گردد. برای حل روابط تماس از الگوریتم پنالتی استفاده شده است که این روش به طور مرسوم در شبیه‌سازی‌های ضربه مورد استفاده قرار گرفته است زیرا علاوه بر سر راست بودن پیاده‌سازی آن، روش حل قدرتمندی را ارائه می‌دهد که از منظر محاسباتی مقرون به صرفه است [3,20,30-31]. تحقیقات پیشین عمدتاً از دو نوع شرط تماسی تای و لغزش محدود برای توصیف تماس بین مغز و حجمه استفاده کردند [32]. گاپوله [33] نشان داد که استفاده از شرط تماسی تای منجر به دستیابی به نتایجی مشابه داده‌های تجربی می‌شود و به همین دلیل در این پژوهش نیز تماس بین مغز و حجمه از نوع تای در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که از الگوریتم پنالتی برای حل روابط تماس استفاده می‌شود، فشار تماس T_n به وسیله ضریب پنالتی p_n و فاصله بین سطوح تماسی g_n مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد [34]:

$$T_n = -p_n g_n + p_0 \text{ if } g_n < \frac{p_0}{p_n} \quad (4)$$

که در آن، p_0 فشار تماس در لحظه‌ای است که بین سطوح تماسی برخورد اولیه صورت می‌گیرد و فاصله‌ای بین آن‌ها باقی نمی‌ماند. مدل هندسی فقط شامل مغز و حجمه بوده و بافت پوست در آن گنجانده نشده است که این رویکرد برای ساده‌سازی مسئله بوده و در تحقیقات پیشین نیز اتخاذ شده است [35,36]. بنابراین، تماس سطح به سطح تعریف شده در مدل بین سطح توپ گلف با سطح حجمه در قسمت پیشانی می‌باشد. از آنجایی که برخورد توپ گلف با سرعت قابل توجهی صورت می‌گیرد و به محض برخورد از حجمه جدا می‌شود، اصطکاک بین توپ و حجمه نقشی حیاتی را در آسیب مغزی بازی نمی‌کند. علاوه بر این در هنگام برخورد، به دلیل نرم بودن توپ گلف، احتمال به وجود آمدن فرایند ساییدگی سطوح بسیار پایین است و توپ گلف در اثر خاصیت صلب حجمه دچار فرورفتگی می‌شود. بر این اساس، تماس بین توپ گلف و ناحیه‌ای از حجمه که توپ با آن برخورد می‌کند، مطابق با پژوهش‌های پیشین بدون اصطکاک در نظر گرفته می‌شود [16,29]. در این پژوهش از سه کمیت تنش

فرایند شبیه‌سازی

به منظور تحلیل پاسخ تنش و فشار مغز در اثر ضربه با توپ گلف، دو نوع شبیه‌سازی با شرایط مرزی مختلف انجام شد. شکل ۴ ناحیه‌ای که جابه‌جایی آن در تمامی جهت‌های سیستم مختصات مقید گردیده است را نشان می‌دهد. این نوع از شرط مرزی و ناحیه‌ی مقید شده در تحقیقات پیشین نیز استفاده شده است [15-16,32]. در حالت دوم شبیه‌سازی، مجموعه تحت هیچ قیدی قرار نمی‌گیرد و جابه‌جایی آن آزاد در نظر گرفته می‌شود. این شرط مرزی نیز در بسیاری از مدل‌سازی‌های آسیب ضربه مغزی استفاده شده است [19-20,22]. شایان ذکر است که در بیشتر تحقیقاتی که نتایج را با داده‌های تجربی مقایسه کرده‌اند، از شرط مرزی آزاد استفاده کردند زیرا بخش عمده‌ی داده‌های تجربی از مجموعه جسد انسان استخراج می‌شوند و در این حالت، عضلات گردنی فعال نیستند و مجموعه به آسانی تحت جابه‌جایی قرار می‌گیرد [11]. در نهایت، نتایج دو شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه می‌شوند و اثر ناشی از شرایط مرزی متفاوت مورد تحلیل قرار می‌گیرد.



شکل ۴ مقید کردن ناحیه زیرین مجموعه در راستای تمامی جهت‌های مختصات در شبیه‌سازی مجموعه مقید

ثانیه را در توپ گلف دارند [29]. سرعت اولیه انتخاب شده برای توپ گلف در پژوهش حاضر ۲۰ متر بر ثانیه است. جهت برخورد توپ نیز به ناحیه پیشانی مجموعه در جهت y سیستم مختصات است.

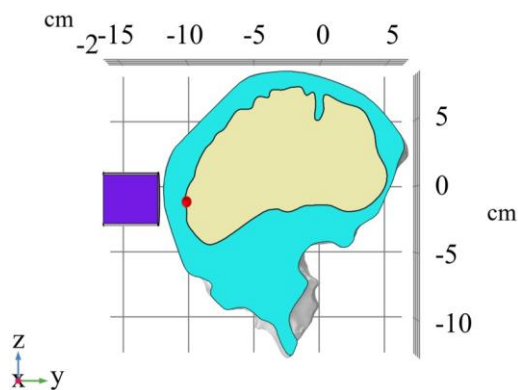
برای حل مدل از نسخه ۶/۲ نرم‌افزار COMSOL، حلگر خطی پارادیسو و روش خودکار میرایی نیوتن استفاده می‌شود که در هر گام، فرمول‌بندی به طور همزمان حل می‌گردد. از آنجایی که تحلیل مدل دینامیکی است، از رویکرد دیفرانسیلی رو به عقب با مرتبه دوم استفاده شده است. مدت زمان شبیه‌سازی ۱۵ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است [11,15-16]. به منظور افزایش سرعت حل از رویکرد گام زمانی تطبیقی استفاده شده که در این روش زمانی که سطوح به یکدیگر برخورد می‌کنند و تماس وجود دارد، گام زمانی بسیار کوچک به کار گرفته می‌شود و در حالتی که تماس بین سطوح منبع و مقصد خاتمه یافته است، گام زمانی افزایش پیدا می‌کند. در این روش ممکن است حلگر تا حدی گام زمانی را بالا ببرد که منجر به واگرایی مسئله شود و به همین دلیل، بیشینه گام زمانی اتخاذ شده توسط حلگر بر روی ۰/۱ میلی‌ثانیه تنظیم شده است [37]. گام زمانی استخراج نتایج نیز ۰/۰۵ میلی‌ثانیه است.

به دلیل محدودیت در دسترسی به سیستم محاسباتی مناسب، همگرایی شبکه‌بندی مدل مورد مطالعه قرار نگرفت. با این حال، از تعداد ۸۹۴۹۹۱ المان برای شبکه‌بندی مجموعه و مغز استفاده شد که بیشتر از تعداد المان‌های برخی تحقیقات پیشین بود [17]. المان مورد استفاده از نوع چهاروجهی مرتبه دوم لاگرانژی بود تا بتواند به خوبی سطح ناهموار مغز و مجموعه را پوشش دهد، علاوه بر این، در پژوهش‌های پیشین نیز مورد استفاده قرار گرفته است [21,35]. مجموع تعداد المان‌های کل مدل ۹۱۷۱۰۰ عدد بود که متوسط طول بلندترین لبه المان هر کدام از اجزای مغز، مجموعه و توپ گلف به ترتیب برابر با ۰/۵۴، ۰/۶۱ و ۰/۴۹ سانتی‌متر بود. شبکه‌بندی بخش‌های مختلف مدل در شکل ۵ نمایش داده شده است.

سرعت توپ گلف می‌تواند با توجه سطح بازیکن و نوع زمینی که در آن بازی انجام می‌شود، متفاوت باشد. به طور میانگین سرعت اولیه آن در محدوده ۲۰ متر بر ثانیه قرار دارد و برخی بازیکنان حرفه‌ای نیز توانایی ایجاد سرعت اولیه ۶۰ متر بر

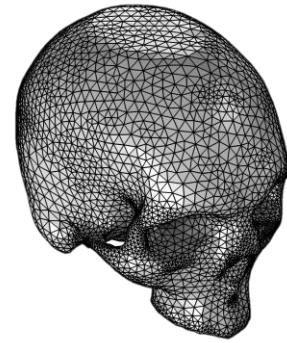
محور x به صورت پاد ساعتگرد تحت چرخش قرار گرفته است. شرط مرزی آزاد بودن جابه‌جایی که متناسب با شرایط سر جسد انسان است، استفاده می‌شود.

ناهوم و همکاران [11] در هنگام اعمال ضربه، فشار را در چندین قسمت مغز اندازه گرفتند. یکی از این اندازه‌گیری‌ها در قسمت قدامی سر، در سطح مایع مغزی - نخاعی و زیر ناحیه‌ای که برخورد جسم با سر صورت می‌گرفت، انجام شد. این اندازه‌گیری مربوط به ناحیه برخورد است که برای اعتبارسنجی این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که مایع مغزی - نخاعی در مدل این پژوهش لحاظ نشده است، استخراج فشار مغزی در سطح بافت مغز و در زیر ناحیه‌ای که جسم استوانه‌ای با سر برخورد می‌کند، صورت می‌گیرد. این نقطه در شکل (۶) مشخص شده است.

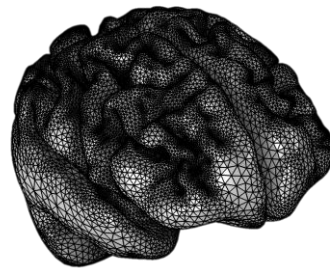


شکل ۶ نحوه قرارگیری اجزای مختلف مدل شامل جمجمه، مغز و استوانه در فرایند اعتبارسنجی. نقطه قرمز رنگ محل استخراج فشار جهت اعتبارسنجی را نشان می‌دهد

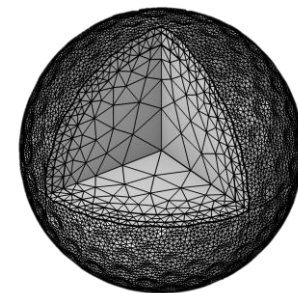
نتایج اعتبارسنجی فشار مغز برای ناحیه برخورد در شکل (۷) قرار داده شده است. نتایج با داده‌های تجربی تطابق مناسبی از خود نشان می‌دهد و اختلاف اندک بین آن‌ها می‌تواند به دلیل نبود سایر قسمت‌های مغز شامل مایع مغزی - نخاعی، سخت شامه، نرم شامه و بصل النخاع باشد. در واقع تحقیقات نشان داده است که ساختار مایع مغزی - نخاعی همانند جذب‌کننده ضربه عمل می‌کند [38]. از آنجایی که این ناحیه در مدل پژوهش حاضر وجود ندارد، فشار اندکی بیشتر از مقادیر تجربی ظاهر شد. با این حال، مدل رفتار سرتاسری مشابهی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵ شبکه‌بندی بخش‌های مختلف مدل. (الف) جمجمه، (ب) مغز، (پ) توپ گلف

اعتبارسنجی

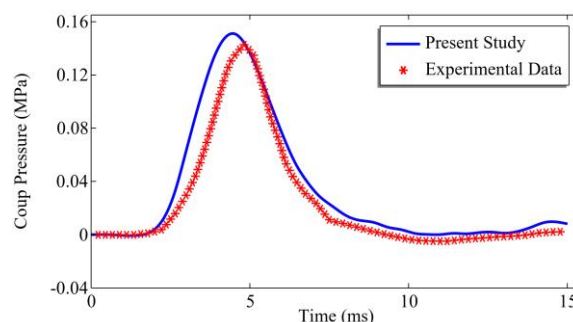
برای اعتبارسنجی شرایط یکی از آزمایش‌های تجربی ناهوم و همکاران [11] شبیه‌سازی شده است. آن‌ها یک جسم استوانه‌ای با قطر ۴ سانتی‌متر و جرم ۵/۲۳ کیلوگرم و سرعت اولیه ۶/۳۳ متر بر ثانیه را به پیشانی جمجمه برخورد دادند. در این آزمایش، سر جسد در زاویه ۴۵ درجه‌ای نسبت به محور عمودی قرار داشت. شرایط مذکور برای اعتبارسنجی بازسازی شده است و در شکل (۶) نحوه قرارگیری مدل نمایش داده شده است. جمجمه و مغز نسبت به حالت اصلی پژوهش به اندازه ۴۵ درجه نسبت به

شبیه‌سازی دارد اما نواحی زیرین مجموعه شامل فک و استخوان‌های چشم تنش بیشتری را در هنگام استفاده از شرط مرزی مقید تجربه کرده است. این نتایج نشان می‌دهند که حتی در حالتی که مدت زمان برخورد توپ گلف به سر 0.7 میلی‌ثانیه باشد، دو شرط مرزی مختلف موجب توزیع تنش متفاوتی در مجموعه می‌شوند.

مکله‌نی و همکاران [40] مقدار میانگین تنش وون مایزس 75 مگاپاسکال را برای شکستگی استخوان مجموعه در آزمایش‌های خود گزارش دادند. اخیراً در پژوهشی که بر روی ضربه به سر کودکان در اثر افتادن تمرکز داشتند، مقادیر میانگین $33/893$ و $54/056$ مگاپاسکال را برای تنش وون مایزس به ترتیب با احتمال 50 و 95 درصد شکستگی مجموعه گزارش دادند [41]. بیشینه تنش به وجود آمده در مجموعه هنگام ضربه در پژوهش حاضر برابر با 9 مگاپاسکال بود. این مقدار، از داده‌های تجربی گزارش شده به مراتب کمتر است و نشان می‌دهد که اصابت توپ گلف با سرعت 20 متر بر ثانیه موجب شکستگی و آسیب جبران‌ناپذیر به مجموعه نمی‌شود.

نتایج مربوط به پاسخ تنش وون مایزس بافت مغز برای نقاط برخورد و مقابل برخورد قسمت (الف) (شکل ۳) در شکل ۹) نشان داده شده است. در ناحیه برخورد و در هنگام برخورد توپ و مجموعه، برای هر دو حالت شرایط مرزی، بافت تقریباً رفتار مشابهی را از خود نمایش داده است. با گذشت زمان، در حالتی که مجموعه آزاد در نظر گرفته شده است، تنش به طور ناگهانی کاهش پیدا کرده است و سپس موج دوم تنش به نقطه ناحیه برخورد قسمت (الف) (شکل ۳) رسیده و بار دیگر تنش افزایش یافته است. در نهایت تنش کاهش یافته و به مقدار صفر نزدیک گشته است.

در حالتی که از شرط مرزی مقید برای مجموعه استفاده شده است، مغز تحت نوسانات شدید قرار گرفته. همین امر نشان می‌دهد که بعد از برخورد توپ به مجموعه، سر نتوانسته است آزادانه حرکت کند و انرژی ناشی از برخورد در بافت مغز حبس شده است و موج‌های متفاوتی از تنش را در بافت به وجود آورده است.



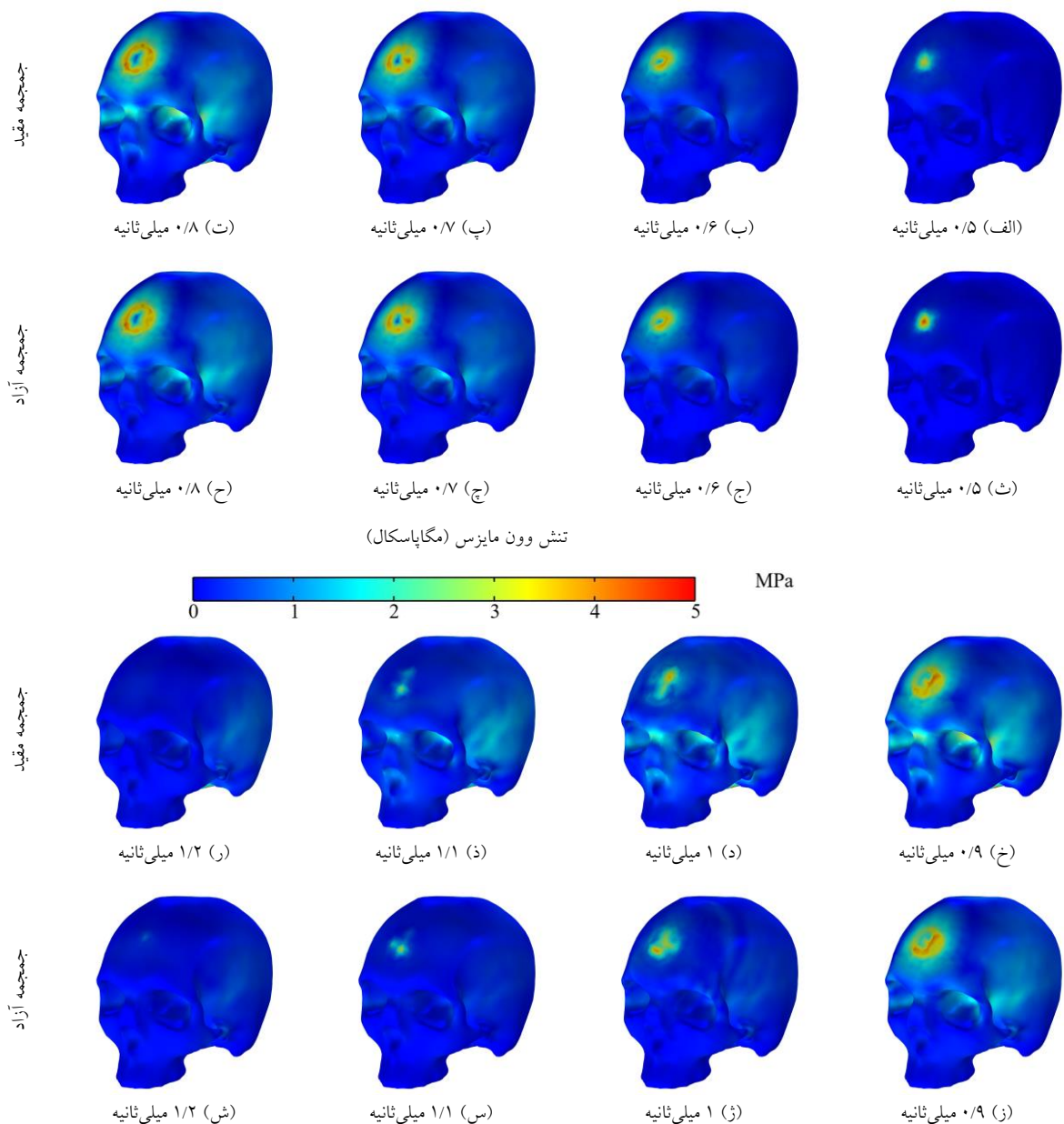
شکل ۷ اعتبارسنجی فشار مغز در ناحیه برخورد با داده‌های تجربی ناهوم و همکاران [11]

استفاده از فشار به عنوان تنها معیار اعتبارسنجی نتایج، از جمله نتایج موضعی تنش وون مایزس و شتاب، مناسب نیست، چرا که با وجود تفاوت‌های زیاد بین هندسه، اجزای بافت مغز و نیز خواص مکانیکی بین مدل ارائه شده و نمونه تست آزمایشگاهی، اختلاف چندانی بین گراف‌ها مشاهده نمی‌شود. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های تجربی برخورد توپ گلف به سر انسان، از نتایج تجربی فشار ناحیه برخورد ناهوم و همکاران [11] برای اعتبارسنجی استفاده شد. این رویکرد به طور گسترده توسط تحقیقات پیشین نیز اتخاذ شده است [15,17,35,39]. دلیل اختلاف کم بین نتایج می‌تواند مرتبط با این موضوع باشد که داده‌های تجربی استفاده شده مربوط به سر جسد انسان هستند و در صورت استفاده از داده‌های تجربی نمونه زنده، اختلاف بیشتری به دلیل ساده‌سازی‌های مدل پژوهش حاضر به وجود آید. اختلاف کم بین نتایج پژوهش و داده‌های تجربی ناهوم و همکاران [11] در برخی تحقیقات پیشین که ساده‌سازی‌هایی را در نظر گرفته بودند نیز دیده می‌شود [35,39].

نتایج و بحث

برخورد اولیه توپ با مجموعه در زمان 0.5 میلی‌ثانیه به وقوع پیوسته و تماس بین دو سطح تا زمان $1/2$ میلی‌ثانیه ادامه می‌یابد. در

شکل ۸) توزیع تنش وون مایزس مجموعه از زمان 0.5 و $1/2$ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. در هنگام استفاده از شرط مرزی مقید برای مجموعه، این ساختار تنش بیشتری را در مقایسه با حالت شرط مرزی آزاد تجربه می‌کند. تنش در ناحیه‌ای که توپ به آن اصابت کرده است تقریباً رفتار مشابهی را در هر دو



شکل ۸ پاسخ تشن وون مایزس حجمه در خلال برخورد توپ گلف برای دو شرط مرزی مقید و آزاد

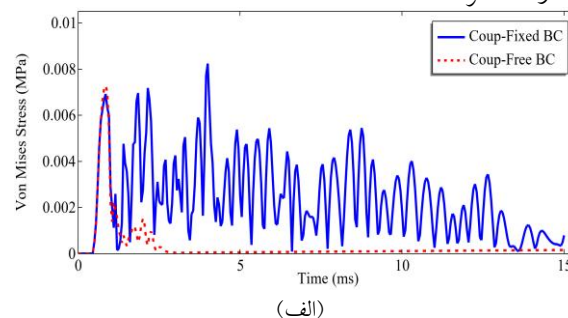
از میانگین تشنهای اصلی محاسبه کرده بودند، پاسخ رفتار تشن نیز به صورت نوسانی بوده و در خلال برخورد با افزایش مواجه شده است. در ناحیه مقابل برخورد رفتار مشابهی از تشن مشاهده می شود. با این تفاوت که حتی در همان زمان ابتدایی برخورد، پاسخ تشن بافت در شرایط مرزی مختلف به صورت متفاوت عمل کرده است. دلیل این رفتار مرتبط با نزدیک بودن نقطه مقابل برخورد به محلی است که حجمه در آن مقید شده است. با مقایسه محل نقطه مقابل برخورد قسمت (الف) شکل (۳) با محل

این رفتار در برخی پژوهشهای دیگر نیز دیده شده است. ضرغامی و همکاران [21] که به مدل سازی برخورد توپ فوتبال به بافت مغز پرداختند، سطح تحتانی مغز را مقید فرض کردند. در نتایج آنها موجهای متفاوت تشن در خلال برخورد تولید شده بود. علاوه بر این، حسن و همکاران [15] نشان دادند که در هنگام استفاده از شرایط مرزی مقید در ضربه به سر، فشار و شتاب رفتاری نوسانی از خود نشان می دهند و در خلال برخورد مقادیر آنها افزایش پیدا می کند. از آنجایی که آنها فشار مغز را با استفاده

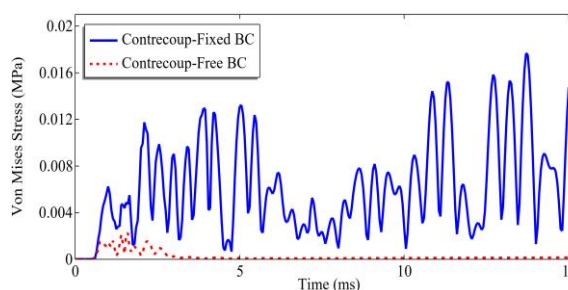
[42] مقدار 0.0084 مگاپاسکال را به عنوان آستانه آسیب تنش وون مایزس جسم پینه‌ای مغز گزارش داد. ژانگ و همکاران [43] مقدار تنش وون مایزس 0.0078 مگاپاسکال را برای آسیب خفیف در ساقه مغز ارائه دادند. در پژوهشی نیز مقدار آستانه آسیب تنش وون مایزس سرتاسر مغز 0.018 مگاپاسکال گزارش شد [44]. در یک مقاله مروری که به سازوکار آسیب‌های ضربات مغزی پرداخته بودند، بیان کردند که مقدار تنش وون مایزس در محدوده 0.018 تا 0.038 مگاپاسکال با احتمال ۵۰ درصد می‌تواند منجر به آسیب مغزی خفیف تا شدید شود [45]. بیشینه تنش وون مایزس تولید شده در مدل‌های این پژوهش با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۹)، مربوط به حالتی بود که حجمه مقید شده بود. در این حالت، مقادیر تنش بیشینه 0.009 و 0.018 مگاپاسکال به ترتیب در نواحی برخورد و مقابل برخورد دیده می‌شود. با توجه به داده‌های گزارش شده توسط کلیون [42] و ژانگ و همکاران [43]، مقدار تنش تولید شده در نواحی برخورد و مقابل برخورد باعث ایجاد آسیب به مغز می‌شود. با این حال، فقط پاسخ مربوط به ناحیه مقابل برخورد در بازه 0.018 تا 0.038 مگاپاسکال و آسیب خفیف مغزی قرار دارد که مقدار بیشتر آن می‌تواند به دلیل نزدیک‌تر بودن به محل مقید کردن حجمه باشد. با وجود موارد قید شده، نیاز به داده‌های تجربی گسترده‌تر با شرایط‌های مختلف آزمایش وجود دارد تا به طور قطعی بتوان در مورد آسیب‌زا بودن پاسخ تنش بافت مغز نتیجه‌گیری کرد [45].

پاسخ فشار اینتراکرنیال مغز در هنگام برخورد با توپ گلف برای شرایط مرزی حجمه مقید و آزاد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این فشار، میانگین تنش در راستاهای اصلی می‌باشد. این رویکرد برای محاسبه فشار اینتراکرنیال در پژوهش پیشین نیز استفاده شده است [46]. در هنگام اولین تماس توپ گلف با سطح حجمه، فشاری مثبت در محدوده $1/0$ تا 0.2 مگاپاسکال در ناحیه برخورد به وجود می‌آید و در سایر نواحی مغز فشار در محدوده صفر تا 0.1 مگاپاسکال قرار دارد. دلیل ایجاد این فشار مثبت، انرژی ناشی از برخوردی است که از توپ گلف به حجمه و بافت مغز انتقال داده می‌شود. با گذشت زمان این موج فشار در طول بافت مغز حرکت می‌کند تا به قسمت پس‌سری برسد. در زمان ۱ میلی‌ثانیه، برگشت موج ضربه، توزیع شدید فشار را در ناحیه برخورد مغز ایجاد می‌کند. در این زمان، حجمه بخشی از انرژی برخورد را دوباره به توپ گلف انتقال داده است و موجب ایجاد ناحیه‌ای از فشار منفی در قسمت برخورد می‌شود.

اعمال قید عدم جابه‌جایی در شکل (۴)، می‌توان مشاهده کرد که نقطه مقابل برخورد که از آن نمودار تنش استخراج شده است، به محل عدم جابه‌جایی نزدیک‌تر بوده و بنابراین، تنش ناحیه مقابل برخورد در هنگام استفاده از شرط مقید، از همان ابتدا بیشتر از مدل آزاد ظاهر شده است.



(الف)

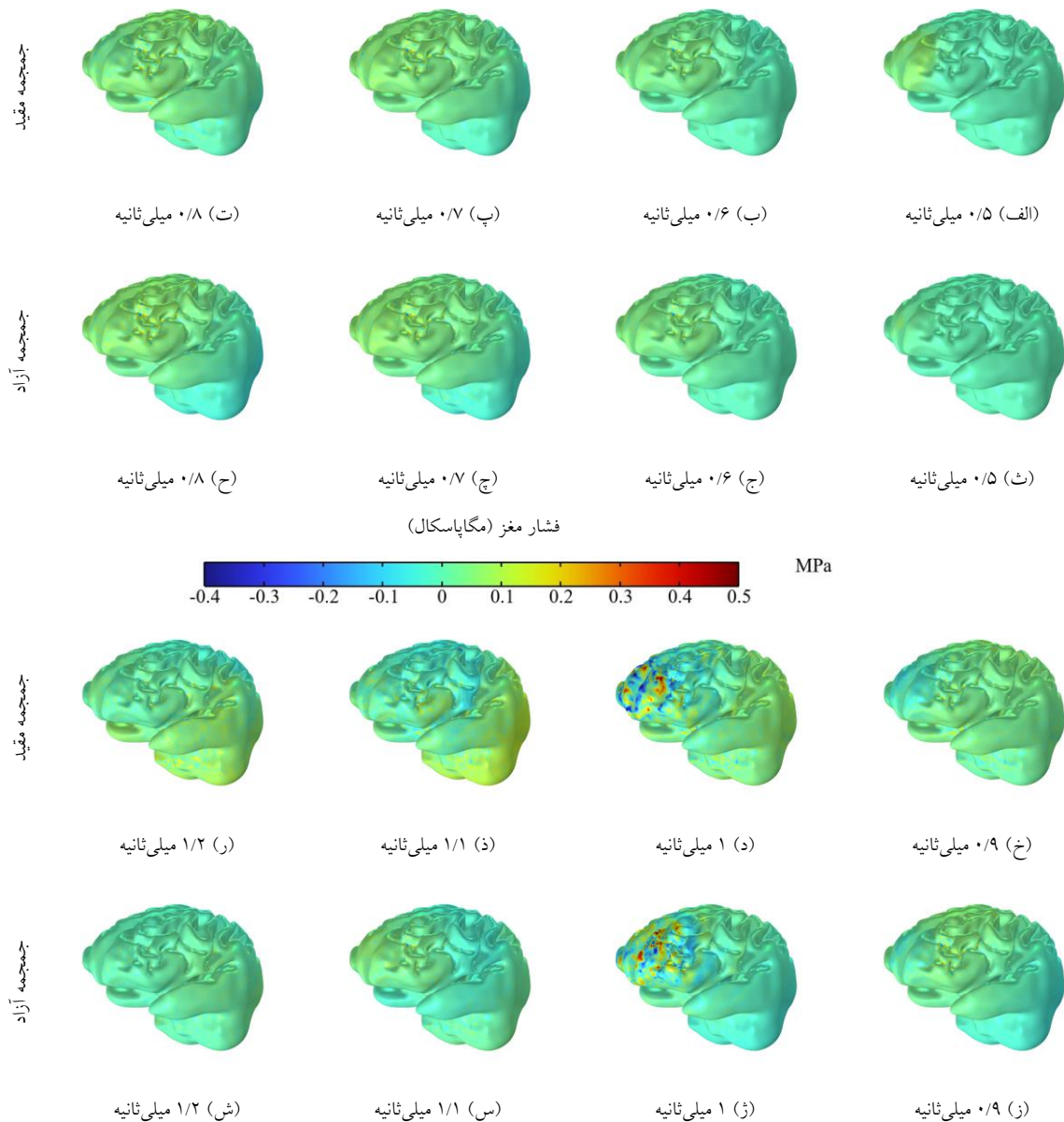


(ب)

شکل ۹ پاسخ تنش بافت مغز با شرایط مرزی مقید (Fixed BC) و آزاد (Free BC) برای حجمه: (الف) ناحیه برخورد، (ب) ناحیه مقابل برخورد

نوسانات به وجود آمده در حالتی که حجمه مقید است، در اثر انرژی برخورد انتقال یافته از حجمه به مغز می‌باشد. در حالتی که حجمه آزاد است، در هنگام برخورد به سرعت جابه‌جا می‌شود و انرژی ناشی از برخورد به صورت جابه‌جا شدن حجمه آزاد می‌شود و به همین دلیل در انتهای شبیه‌سازی تنش نواحی برخورد و مقابل برخورد میرا شده و به سمت صفر متمایل شده است. در حالت مقید، حجمه نتوانسته به صورت گسترده جابه‌جا شود و انرژی برخورد در داخل مغز حبس شده و منجر به ایجاد یک جابه‌جایی نوسانی در سر شده است. یعنی با وجود اتمام برخورد، انرژی برخورد همچنان در داخل مغز وجود داشته و باعث شده است تا حجمه در بازه‌های زمانی 0.3 میلی‌ثانیه به سمت جلو و عقب جابه‌جا شود. حبس انرژی برخورد در داخل مغز و جابه‌جا شدن حجمه در اثر آن، باعث حذف اثر میرایی شده است.

آستانه‌های متفاوتی برای آسیب بافت مغز بر اساس مقدار تنش وون مایزس در تحقیقات پیشین گزارش شده است. کلیون



شکل ۱۰ پاسخ فشار مغز در خلال برخورد توپ گلف

سایر پژوهش‌ها نیز دیده شده است [47]. در ادامه، این ترکیب فشار منفی و مثبت به عنوان موج دوم انرژی برخورد به سمت ناحیه پس‌سری حرکت می‌کنند و موجب ایجاد فشار منفی در ناحیه مقابل برخورد می‌شود. به طور کلی، استفاده از شرط مرزی مقید برای مجموعه باعث شده است فشار بیشتری در بافت مغز تولید شود. این تفاوت‌ها حتی در زمان ۰/۵ میلی‌ثانیه که اولین تماس سطح توپ گلف با سطح مجموعه صورت می‌گیرد نیز

در این ناحیه، به صورت موضعی برخی نواحی فشار شدید مثبت و برخی نواحی فشار شدید منفی دارند. این رفتار مرتبط با برگشت موج ضربه ناشی از برخورد است. در زمان ۰/۹ میلی‌ثانیه هنوز نواحی قدامی مغز تحت فشار مثبت قرار دارند و در زمان ۱ میلی‌ثانیه که برگشت موج ضربه رخ می‌دهد، ناحیه قدامی تحت تغییر شکل شدیدی قرار می‌گیرد و منجر به تولید فشار شدید مثبت و منفی در برخی نواحی قدامی می‌شود. این پاسخ مغز در

بیشتر از مجموعه مقید در هنگام برخورد اولیه ظاهر شد اما با گذشت زمان مقدار آن کاهش پیدا کرده است. در مقابل، برای شرایط مرزی مجموعه مقید به دلیل جابه‌جایی نوسانی سر و حبس انرژی برخورد در داخل مغز، تغییرات کرنش با نوسانات شدیدی روبه‌رو شده است. در ناحیه مقابل برخورد در هنگام استفاده از شرط مرزی آزاد، کرنش بسیار ناچیزی به وجود می‌آید اما با شرط مرزی مقید مقدار کرنش به مراتب بیشتر می‌شود زیرا ناحیه استخراج کرنش در مدل نزدیک به محلی است که قید عدم جابه‌جایی مجموعه اعمال شده است. اگر دو نمودار ناحیه برخورد و مقابل برخورد با یکدیگر مقایسه شوند، می‌توان مشاهده کرد که در بازه زمانی ۷/۵ میلی‌ثانیه کرنش در هر دو نقطه کاهش شدیدی پیدا می‌کند و در ادامه دوباره با افزایش مواجه می‌شود و این رفتار نشان می‌دهد که انرژی برخورد حبس شده در مغز با سرعت بسیار بالایی در حال انتقال در بافت است زیرا این دو نقطه که متناسب با ناحیه قدامی و خلفی - تحتانی مغز هستند با یکدیگر فاصله دارند.

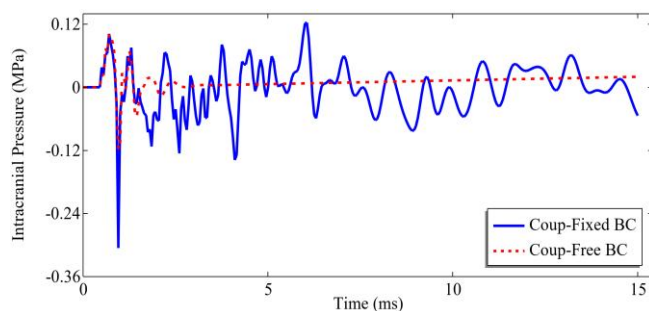
تحقیقات نشان داده است که پاسخ شتاب مغز در هنگام ضربه دارای اهمیت ویژه‌ای است و می‌تواند به عنوان معیاری برای میزان آسیب سر در نظر گرفته شود [51]. تغییرات شتاب برای نقطه‌ای که در قسمت (ب) شکل ۳ تعریف شده بود، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در زمان برخورد اولیه، هنگام استفاده از شرط مرزی آزاد مجموعه تحت شتاب بیشتری قرار گرفته است زیرا آزادانه جابه‌جا شده است. در ادامه، مقدار شتاب کاهش پیدا کرده و پس از رسیدن موج دوم برخورد دوباره با افزایش و سپس کاهش روبه‌رو شده است. در حالتی که مجموعه مقید است، پس از اتمام موج اول برخورد، نوسانات ناگهانی شروع می‌شوند و مغز شتاب بیشتری را تجربه می‌کند. بعد از رسیدن موج نهایی برخورد، مقدار شتاب شروع به کاهش می‌کند و این رفتار از منظر کیفی با تحقیقات پیشین مطابقت دارد [16]. بیشینه مقدار شتاب در مجموعه مقید و آزاد به ترتیب برابر با ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰ متر بر مجذور ثانیه بود. تحقیقات نشان داده است که مقادیر شتاب مغزی در محدوده ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ متر بر مجذور ثانیه آسیب‌های جبران‌ناپذیری به انسان وارد می‌کنند [51].

دیده می‌شود. علاوه بر آن، در انتهای برخورد (زمان ۱/۲ میلی‌ثانیه) ناحیه مقابل برخورد در شرط مرزی مقید فشار مثبت در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲ مگاپاسکال را تجربه کرده است و در حالتی که از شرط مرزی آزاد استفاده شده است، فشار ناحیه مربوطه در محدوده صفر تا ۰/۱- مگاپاسکال قرار دارد که این رفتار از منظر کیفی با داده‌های تجربی تطابق بیشتری را نشان می‌دهد [48].

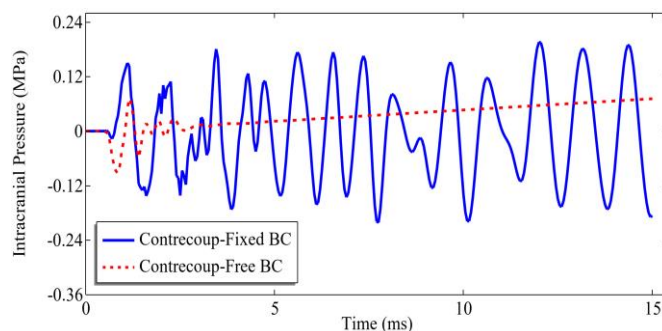
وارد و همکاران [49] گزارش دادند که فشار مغزی کمتر از ۰/۱۷۳ مگاپاسکال موجب آسیب به مغز نمی‌شود و مقادیر بالای ۰/۲۳۵ مگاپاسکال آسیب‌های جدی و جبران‌ناپذیری به مغز وارد می‌کنند. اخیراً در پژوهشی به بررسی گسترده معیارهای آسیب مغزی پرداختند و گزارش دادند که فشارهای مغزی ۰/۰۵۶۳۹ تا ۰/۰۶۷۱۲ و ۰/۰۴۶۱۴ تا ۰/۰۵۸۲۷- مگاپاسکال به ترتیب در نواحی برخورد و مقابل برخورد بین ۲۵ تا ۷۵ درصد احتمال دارد تا منجر به آسیب مغزی شود [50]. محدوده فشار مغزی در این پژوهش بین ۰/۴- تا ۰/۵ مگاپاسکال را از خود نشان داد. با وجود آنکه این مقدار بیشتر از محدوده‌های آسیب مغزی فشار است، نبود مایع مغزی - نخاعی و استفاده از مدل مادی همسانگرد می‌تواند مقدار فشار مغز را در شبیه‌سازی این پژوهش تحت تأثیر قرار داده باشد و برای ارزیابی دقیق آسیب‌زا بودن ضربه توپ گلف نیاز است تا مدل توسعه یابد و شبیه‌سازی با هندسه بهبودیافته و مدل مادی ناهمسانگرد انجام شود.

تغییرات فشار داخل مغز به ترتیب در نواحی برخورد و مقابل برخورد در قسمت‌های (الف) و (ب) شکل ۱۱ رسم شده است. در هنگام برخورد اولیه در ناحیه برخورد فشار مثبتی به وجود می‌آید که در اثر انتقال انرژی برخورد از توپ گلف به مغز می‌باشد. در ناحیه مقابل برخورد فشار اولیه در هنگام برخورد منفی بوده است که این دو رفتار با مشاهدات تجربی مطابقت دارند [11,32]. در ناحیه برخورد اثر استفاده از شرایط مرزی مختلف، تفاوت قابل توجهی در لحظه برخورد اولیه ایجاد نکرده است اما در ناحیه مقابل برخورد استفاده از شرط مرزی آزاد موجب ایجاد فشار منفی بیشتری در بافت مغز شده است. در شرط مرزی مقید، فشار منفی ایجاد شده ناچیز است. نوسان ناشی از شرط مرزی مقید در پاسخ فشار مغز نیز دیده می‌شود.

در شکل (۱۲) تغییرات نرم اقلیدسی کرنش گرین - لاگرانژ در نواحی برخورد و مقابل برخورد مشخص شده در قسمت (الف) شکل ۳ برای شرایط مرزی مجموعه مقید و آزاد نشان داده شده است. کرنش ناحیه برخورد برای مجموعه آزاد اندکی

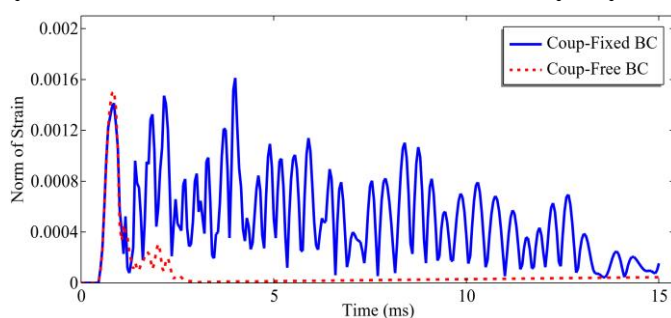


(الف)

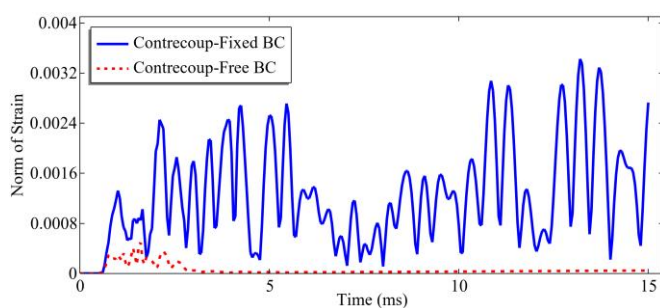


(ب)

شکل ۱۱ فشار مغز در خلال برخورد با شرایط مرزی مجموعه مقید (Fixed BC) و آزاد (Free BC): (الف) ناحیه برخورد، (ب) ناحیه مقابل برخورد



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ پاسخ نرم اقلیدسی کرنش گرین - لاگرانژ بافت مغز با شرایط مرزی مقید (Fixed BC) و آزاد (Free BC) برای مجموعه: (الف) ناحیه برخورد، (ب) ناحیه مقابل برخورد

نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که مقید کردن سر در زمانی که برخورد با توپ گلف صورت می‌گیرد موجب آسیب به مراتب

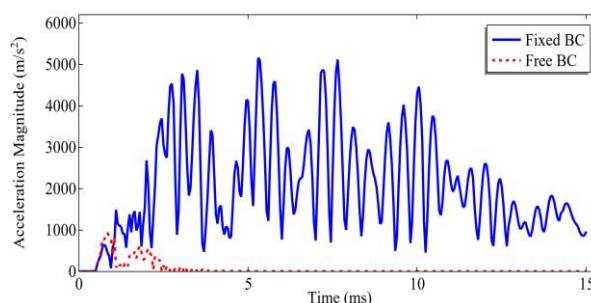
اولین تماس بین سطح توپ گلف و سطح جمجمه در زمان ۰/۵ میلی ثانیه صورت می گیرد که این تماس تا زمان ۱/۲ میلی ثانیه ادامه پیدا می کند. بعد از آن توپ گلف از جمجمه جدا شده و از آن دور می شود. اثرات دیررس و بازتابی در مدل لحاظ نشد زیرا تا انتهای زمان ۱۵ میلی ثانیه، پاسخ تنش بافت مغز در مدلی که از شرایط مرزی آزاد استفاده شده بود به یک مقدار ثابت منتهی می شود. از آنجایی که هدف پژوهش مقایسه اثر دو شرایط مرزی متفاوت بود، مدت زمان مدلی که جمجمه مقید شده بود نیز ۱۵ میلی ثانیه در نظر گرفته شده بود. علاوه بر این، ناهوم و همکاران [11] که به صورت تجربی اثر ضربه به سر را مورد مطالعه قرار دادند، پاسخ مکانیکی مغز را تا زمان ۱۵ میلی ثانیه ثبت کردند. برخی تحقیقات دیگر نیز به ارزیابی ضربه به مغز در مدت زمان ۱۵ میلی ثانیه یا ۲۰ میلی ثانیه اکتفا کردند [19,21].

برخی از رویکردها در این پژوهش اتخاذ شد تا مدل، چهارچوب پیاده سازی سراسری را ارائه دهد. یکی از این موارد مربوط به عدم استفاده از مدل های متن - باز است. با وجود آنکه این مدل ها دارای جزئیات بیشتری از سر هستند و اعتبارسنجی آن ها قبلا انجام شده است، استفاده از آن ها با محدودیت هایی همراه است [57]. بیشتر مدل های سر با فرمت هایی نظیر *vtk inp* یا *stl* در دسترس هستند که نیازمند فرایند پیش پردازش گسترده ای هستند تا بتوانند برای شبیه سازی ضربه در نرم افزار COMSOL مورد استفاده قرار گیرند. به همین دلیل، تحقیقاتی که از مدل های متن - باز استفاده کردند، اغلب نرم افزارهایی مانند Abaqus یا LS-DYNA را به کار گرفتند [18,58]. علاوه بر این، مدل های متن - باز دارای شبکه بندی های بزرگی هستند [۵۹]. در هنگام وارد کردن این شبکه ها به نرم افزار ممکن است خطاهایی به وجود آید که منجر به حذف المان یا ایجاد همپوشانی در المان ها شود. همچنین، به دلیل تعداد زیاد المان ها، لازم است فرایندهای ساده سازی پیچیده ای در نرم افزار COMSOL انجام شود تا هندسه ها برای انجام تحلیل آماده شوند. از این رو، در این پژوهش مدل های هندسی مغز و جمجمه از تصاویر پزشکی استخراج شدند تا توسعه مدل در آینده با سرعت بیشتری انجام شود و مشکلات ناشی از همپوشانی المان در هنگام وارد کردن به COMSOL رخ ندهد.

محدودیت بعدی در ارتباط با شرط مرزی مقید و آزاد برای جمجمه می باشد. واقع گرایانه ترین حالت توصیف اتصال سر به گردن، استفاده از فنر هایی با سفتی متفاوت در جهت های مختلف یا تعریف روابطی بر اساس مرکز جرم سر است [15,18]. استفاده

شدیدتری می شود. علاوه بر این، تحقیقات مختلف بیان کرده اند که عملکرد گردن بر روی پاسخ بافت مغز در برخوردهایی با مدت زمان کمتر از ۶ میلی ثانیه تأثیر چندانی ندارد [46,52]. با وجود آنکه مدت زمان برخورد در این پژوهش برابر با ۰/۷ میلی ثانیه بود، پاسخ تنش و فشار مغز به طور چشمگیری در شرایط مرزی آزاد و مقید جمجمه متفاوت ظاهر شده است و مقید کردن جمجمه موجب به وجود آمدن فشار و تنش های بیشتری شده است که همین امر نشان می دهد شرایط مرزی استفاده شده برای جمجمه از اهمیت بالایی برخوردار است و محققان لازم است این نکته را در مورد مدل های محاسباتی در نظر داشته باشند. همچنین، برخی تحقیقات نیز اهمیت شرایط مرزی را در هنگام وارد شدن نیرو به سر مورد مطالعه قرار دادند و نتایج این پژوهش با یافته های آن ها از منظر اهمیت شرایط مرزی تطابق دارد [15].

دلیل وجود تفاوت در نتایج مدل جمجمه آزاد و مقید حتی در زمان برخورد ۰/۷ میلی ثانیه با تحقیقات پیشین، می تواند مرتبط با ساده سازی های هندسی و مادی باشد که بر روی مدل انجام گرفته است. تحقیقات نشان داده است که مایع مغزی - نخاعی نقش بنیادی در نتایج مدل های محاسباتی ضربه به سر بازی می کند و پاسخ های فشار و کرنش را تحت تأثیر قرار می دهد [53,54]. علاوه بر این، پژوهش نشان داده است که مدل های مادی ساده همسانگرد در مقایسه با مدل های پیشرفته هایپروالاستیک، تفاوت های چشمگیری در رفتار مکانیکی بافت مغز ایجاد می کنند [55,56]. بنابراین، نتایج به دست آمده در این پژوهش می تواند تحت تأثیر این فرضیات قرار گرفته باشد و منجر به ایجاد تفاوت در اثر شرایط مرزی برای بازه زمانی برخورد ۰/۷ میلی ثانیه شده باشد.



شکل ۱۳ تغییرات شتاب برای نقطه ای در مرکز جرم سر با شرایط مرزی جمجمه مقید (Fixed BC) و آزاد (Free BC)

از این شرایط مرزی با وجود نزدیک‌تر شدن مسئله به واقعیت، علاوه بر اینکه موجب افزایش حجم محاسباتی مدل می‌شود دشواری‌هایی را در پیاده‌سازی هنگام استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود به دنبال خواهد داشت. به همین دلیل در این پژوهش دو شرط مرزی آزاد و مقید مورد استفاده قرار گرفتند. شرط مرزی مقید به صورت گسترده در تحقیقات پیشین استفاده شده است [15,16,32]. شرط مرزی آزاد نیز با توجه به اینکه حالت سر جسد انسان را تداعی می‌کند، در پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [19-20,22]. از آنجایی که این پژوهش با هدف توسعه یک مدل ساده از سر انسان انجام شده است، به منظور ساده کردن فرایند پیاده‌سازی مدل، دو شرط مرزی مقید و آزاد مورد بررسی قرار گرفتند و در آینده می‌توان این محدودیت مدل را با توصیف فشرده‌تری در ناحیه تحتانی مجموعه بهبود داد.

در واقعیت، بافت مغز دارای سطح صافی نیست و شامل پستی - بلندی بسیاری است [38]. در این پژوهش نیز با تمرکز بر ارائه یک مدل با پیاده‌سازی راحت و امکان بازتولید بالا، هندسه به دست آمده از تصاویر پزشکی دارای برآمدگی‌های سطح مغز بود. پژوهش نشان داده است که برای شبیه‌سازی دقیق رفتار مکانیکی مغز، استفاده از مدل‌های هایپروالاستیک ناهمسانگرد توصیه می‌شود [48]. به دلیل ساده بودن مدل، ترکیب پیچیدگی ساختاری هندسه مغز با سطوح ناهموار و مدل مادی ناهمسانگرد، حل مسئله را با چالش‌های بسیاری مانند پیاده‌سازی و واگرایی مواجه می‌کرد. بنابراین، از مدل مادی همگن همسانگرد استفاده شد که در تحقیقات پیشین نیز به کار گرفته شده است [32]. عدم در نظر گرفتن مشخصه‌هایی مانند جنسیت و سن می‌تواند تعمیم نتایج را با چالش مواجه کند که محدودیت دیگر پژوهش حاضر است. به منظور بررسی اثر ضربه در مجموعه‌های مختلف که شامل آماری از زنان و مردان با سنین متفاوت باشد، نیاز به گستره‌ای از تصاویر پزشکی بود. این محدودیت در تحقیقات پیشین نیز که به چالش‌های مدل‌سازی سر انسان پرداخته‌اند بیان شده است [22,32]. اخیراً کارمو و همکاران [20] مدلی با جزئیات بیشتر مبتنی بر تصاویر پزشکی و مدل مادی ناهمسانگرد از سر یک زن ۶۵ ساله توسعه دادند. آن‌ها پیشنهاد دادند که لازم است در آینده مدل‌های سر تفاوت هندسی ناشی از جنسیت را مد نظر قرار دهند و مدل‌های بیشتری از زنان توسعه یابد. تحقیقات پیشین نیز تصاویر مربوط به مرد را مورد استفاده قرار دادند و این رویکرد محدودیتی است که به وفور در مدل‌های المان محدود سر انسان مشاهده شده است [15,17,60].

سرعت توپ گلف در زمین بازی می‌تواند تا محدوده ۶۵ متر بر ثانیه باشد و در این پژوهش متوسط سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد، با این حال در پژوهش لی و وانگ [29] که سرعت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۵ متر بر ثانیه را مورد بررسی قرار دادند، نشان دادند که یک پاسخ نسبی بین سرعت توپ با تنش مجموعه و فشار مغز وجود دارد که با افزایش سرعت توپ، آسیب مغزی نیز بیشتر می‌شود. به دلیل محدودیت در امکان استفاده از سیستم محاسباتی قدرتمند، تحلیل حساسیت سرعت توپ در این پژوهش مورد ارزیابی قرار نگرفت. مدل حاضر می‌تواند به عنوان نقطه شروعی برای بررسی اثر سرعت توپ گلف بر آسیب مغزی مورد استفاده قرار گیرد و در تحقیقات آینده سرعت‌های متفاوت مورد بررسی قرار گیرند و پاسخ تنش، کرنش و فشار مغز و شدت آسیب تحلیل شود. بخش‌های مختلف تشکیل دهنده مدل‌های ضربه به سر شامل هندسه، خواص مادی و شرایط مرزی اغلب با عدم قطعیت و تغییرپذیری قابل توجهی همراه هستند و ارزیابی عدم قطعیت که شامل کمی‌سازی تأثیر این تغییرپذیری بر پاسخ شبیه‌سازی شده است، برای اطمینان از قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌های مدل حیاتی می‌باشد. با این وجود، به دلیل پیچیده بودن مدل‌های محاسباتی سر، انجام ارزیابی عدم قطعیت از دیدگاه محاسباتی بسیار پرهزینه است [61]. علاوه بر این، تحقیقات نشان داده است که پاسخ مدل‌های شبیه‌سازی شده وابسته به تعداد زیادی پارامتر است که با کوچک‌ترین تغییر، نتیجه را به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار می‌دهند و به همین دلیل ارزیابی عدم قطعیت برای این نوع مدل‌ها بسیار گسترده خواهد بود [62]. همچنین، پژوهش نشان داده است که تخمین‌های موجود برای توصیف خواص مکانیکی بافت مغز در پژوهش‌های مختلف متفاوت بوده است و داده‌های خواص مکانیکی دارای پراکندگی گسترده‌ای هستند که انتخاب توزیع‌های مناسب پارامترها برای ورودی به فرایند ارزیابی عدم قطعیت را با چالش مواجه می‌کند [63]. با توجه به این یافته‌ها و محدودیت محاسباتی پژوهش حاضر، ارزیابی عدم قطعیت انجام نشد و لازم است تا در آینده برای توسعه مدل مد نظر قرار گیرد. شایان ذکر است که برخی تحقیقات پیشین مدل‌های سر انسان نیز از انجام ارزیابی عدم قطعیت صرف نظر کردند [16,19].

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از یک مدل المان محدود سر انسان برای بررسی اثر برخورد توپ گلف و ارزیابی پاسخ تنش و فشار آن

واژه‌نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
ضربه مغزی	traumatic brain Injury	
فشار مغز	intracranial Pressure	
آسیب عصبی نوروهای مغزی	diffuse axonal injury	
ضریب تحلیل	decay factor	ضریب تباهی
تای	tie	
پاردیسو	PARDISO	
دیفرانسیلی رو به عقب	backward differentiation	
ناحیه برخورد	coup	
ناحیه مقابل برخورد	contrecoup	
جسم پینه‌ای	corpus callosum	

تقدیر و تشکر

تحت شرایط مرزی مختلف مقید و آزاد برای مجموعه استفاده شده است. هندسه‌های مجموعه و مغز از تصاویر پزشکی استخراج شدند. نتایج نشان دادند که شرط مرزی مجموعه حتی در مدت زمان برخورد ۰/۷ میلی ثانیه تفاوت قابل توجهی در پاسخ مغز به ضربه ایجاد می‌کند و در حالتی که مجموعه مقید شده است، نوسانات شدیدی در پاسخ تنش و فشار دیده می‌شود. علاوه بر آن، تنش و فشار مغز به طور چشمگیری در هنگام مقید کردن مجموعه افزایش پیدا می‌کنند و مقدار شتاب سر نیز با افزایش مواجه می‌شود. همچنین، نشان داده شد که در لحظه برخورد، در هر دو شرایط مرزی، شتابی در محدوده آسیب سر انسان تولید می‌شود. بیشینه تنش به وجود آمده در مجموعه هنگام ضربه برابر با ۹ مگاپاسکال بود که بسیار کمتر از آستانه شکستگی تنش وون مایزس ۷۵ مگاپاسکال گزارش شده از تحقیقات پیشین بود. همچنین، بیشینه تنش وون مایزس تولید شده در بافت مغز، مربوط به مجموعه با مقادیر ۰/۰۰۹ و ۰/۰۱۸ مگاپاسکال بود که به ترتیب در نواحی برخورد و مقابل برخورد رخ داد و بیشتر از آستانه‌های گزارش شده با مقادیر ۰/۰۸۴ و ۰/۰۷۸ مگاپاسکال می‌باشد و نشان می‌دهد که مقدار تنش تولید شده در نواحی برخورد و مقابل برخورد در هنگام ضربه با توپ گلف می‌تواند موجب آسیب به مغز شده باشد. محدوده فشار مغزی در این پژوهش بین ۰/۴- تا ۰/۵ مگاپاسکال بود که بیشتر از فشارهای مغزی ۰/۵۶۳۹ تا ۰/۰۶۷۱۲ و ۰/۰۴۶۱۴ تا ۰/۰۵۸۲۷- مگاپاسکال به ترتیب در نواحی برخورد و مقابل برخورد گزارش شده در تحقیقات پیشین بود که نشان از احتمال ایجاد آسیب مغزی در اثر ضربه می‌دهد. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان نقطه شروعی برای بررسی اثر شرایط مرزی مختلف در مدل‌های سر انسان و ارزیابی رفتار مغز در برخورد با پرتابه‌ها در نظر گرفته شود.

مراجع

- [1] S. Davoodi, M. Esmaili and H. Shokrollahi, "Numerical Study on the Thermal Stress caused by Laser Radiation on Healthy and Cancerous Skin Tissue," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 59-76, 2021. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.56871.0>
- [2] P. Namashiri, A. Allahverdizadeh and B. Dadashzadeh, "Modeling and Simulation of Growth in Diastolic Heart Failure," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 101-114, 2023. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81490.1173>
- [3] A. I. Maas, D. K. Menon et al., "Traumatic brain injury: progress and challenges in prevention, clinical care, and research," *The Lancet Neurology*, vol. 21, no. 11, pp. 1004-1060, 2022. <https://doi.org/10.1016/S1474->

4422(22)00309-X

- [4] T. B. VanItallie, "Traumatic brain injury (TBI) in collision sports: Possible mechanisms of transformation into chronic traumatic encephalopathy (CTE)," *Metabolism*, vol. 100, pp. 153943, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2019.07.007>
- [5] A. Khellaf, D. Z. Khan and A. Helmy, "Recent advances in traumatic brain injury," *Journal of neurology*, vol. 266, no. 11, pp. 2878-2889, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00415-019-09541-4>
- [6] M. E. Bait, "Golfing injuries: an overview," *Sports Medicine*, vol. 16, no. 1, pp. 64-71, 1993. <https://doi.org/10.2165/00007256-199316010-00006>
- [7] M. V. Ridenour, "Golf clubs: hidden home hazard for children," *Perceptual and Motor Skills*, vol. 86, no. 3, pp. 747-753, 1998. <https://doi.org/10.2466/pms.1998.86.3.747>
- [8] K. N. Fountas, E. Z. Kapsalaki et al., "Pediatric golf-related head injuries," *Child's Nervous System*, vol. 22, no. 10, pp. 1282-1287, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00381-006-0077-8>
- [9] K. Watanabe-Suzuki, O. Suzuki et al., "Traumatic Basal Subarachnoid Haemorrhage Caused by the Impact of a Golf Ball," *Medicine, Science and the Law*, vol. 43, no. 2, pp. 174-178, 2003. <https://doi.org/10.1258/rsmmsl.43.2.174>
- [10] D. Macgregor, "Golf related head injuries in children," *Emergency Medicine Journal*, vol. 19, no. 6, pp. 576-577, 2002. <https://doi.org/10.1136/emj.19.6.576>
- [11] A. M. Nahum, R. Smith and C. C. Ward, "Intracranial pressure dynamics during head impact," *SAE Technical Paper*, pp. 770922, 1977. <https://doi.org/10.4271/770922>
- [12] X. Li, X.-L. Gao and S. Kleiven, "Behind helmet blunt trauma induced by ballistic impact: a computational model", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 91, pp. 56-67, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.12.010>
- [13] N. Atsumi, Y. Nakahira, E. Tanaka and M. Iwamoto, "Human brain modeling with its anatomical structure and realistic material properties for brain injury prediction," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 46, pp. 736-748, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10439-018-1988-8>
- [14] L. E. Miller, J. E. Urban et al., "Evaluation of brain response during head impact in youth athletes using an anatomically accurate finite element model," *Journal of Neurotrauma*, vol. 36, no. 10, pp. 1561-1570, 2019. <https://doi.org/10.1089/neu.2018.6037>
- [15] M. Hassan, Z. Taha, I. Hasanuddin et al., "A simplified human head finite element model for brain injury assessment of blunt impacts," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 14, no. 2, pp. 6538-6547, 2020. <https://doi.org/10.15282/jmes.14.2.2020.01.0513>
- [16] M. Hosseini-Farid, M. Amiri-Tehrani-Zadeh et al., "The strain rates in the brain, brainstem, dura, and skull under dynamic loadings," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 25, no. 2, p. 21, 2020. <https://doi.org/10.3390/mca25020021>
- [17] H. Li, R.-J. Lu, P. Wu, Y. Yuan, et al., "Numerical Simulation and Analysis of Midfacial Impacts and Traumatic Brain Injuries," *Annals of Translational Medicine*, vol. 9, no. 6, p. 459, 2021. <https://doi.org/10.21037/atm-21-134>
- [18] R. A. Perkins, A. Bakhtiarydavijani et al., "Assessment of brain injury biomechanics in soccer heading using finite element analysis," *Brain Multiphysics*, vol. 3, p. 100052, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.brain.2022.100052>
- [19] P. G. Pavan, M. Nasim, V. Brasco, S. Spadoni, et al., "Development of detailed finite element models for in silico

- analyses of brain impact dynamics," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 227, p. 107225, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.107225>
- [20] G. P. Carmo, M. Dymek, M. Ptak et al., "Development, validation and a case study: The female finite element head model (FeFEHM)," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 231, p. 107430, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107430>
- [21] F. Zarghami, A. Allahverdizadeh and P. Namashiri, "Mechanical investigation of impact damage on the human brain due to the impact of a soccer ball with the help of a 3D model," *Journal of Mechanical Engineering of University of Tabriz*, vol. 54, no. 4, pp. 1-10, 2024. <https://doi.org/10.22034/jmeut.2024.60659.3384>
- [22] Q. Zhao, J. Zhang, H. Li, H. Li and F. Xie, "Models of traumatic brain injury-highlights and drawbacks," *Frontiers in Neurology*, vol. 14, p. 1151660, 2023. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1151660>
- [23] R. A. a. USGA, *The Equipment Rules*. The R&A and USGA, 2019.
- [24] J. Ruan, T. Khalil and A. King, "Human head dynamic response to side impact by finite element modeling," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 113, no. 3, pp. 276-283, 1991. <https://doi.org/10.1115/1.2894885>
- [25] X. Zhan, A. Oeur, Y. Liu, M. M. Zeineh, et al., "Translational models of mild traumatic brain injury tissue biomechanics," *Current Opinion in Biomedical Engineering*, vol. 24, p. 100422, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2022.100422>
- [26] G. A. Holzapfel, *Nonlinear solid mechanics: a continuum approach for engineering science*. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2002. <https://doi.org/10.1023/A%3A1020843529530>
- [27] M. Hosseini-Farid, M. Ramzanpour, M. Ziejewski and G. Karami, "A compressible hyper-viscoelastic material constitutive model for human brain tissue and the identification of its parameters," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 116, pp. 147-154, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2019.06.008>
- [28] R. Jangid and K. Halder, "Finite element formulation and implementation of largely deformable soft viscoelastic brain tissue responses," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 157, p. 104514, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104514>
- [29] H. P. Lee and F. Wang, "Assessment of head injury of children due to golf ball impact", *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 523-535, 2010. <https://doi.org/10.1080/10255840903317402>
- [30] E. Griffiths and S. Budday, "Finite element modeling of traumatic brain injury: Areas of future interest", *Current Opinion in Biomedical Engineering*, vol. 24, p. 100421, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2022.100421>
- [31] G. M. Milef, L. E. Miller, D. M. DiGuglielmo et al., "Head impact kinematics and brain deformation in paired opposing youth football players," *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 38, no. 3, pp. 136-147, 2022. <https://doi.org/10.1123/jab.2021-0098>
- [32] K. M. Tse, S. P. Lim, V. B. C. Tan and H. P. Lee, "A review of head injury and finite element head models," *The American Journal of Engineering and Technology*, vol. 1, no. 5, pp. 28-52, 2014.
- [33] S. G. Ganpule, "Mechanics of blast loading on post-mortem human and surrogate heads in the study of Traumatic Brain Injury (TBI) using experimental and computational approaches," The University of Nebraska-Lincoln, 2013. <https://digitalcommons.unl.edu/dissertations/AAI3558421>
- [34] COMSOL Multiphysics Reference Manual, Inc., Sweden, A. COMSOL, 2017.

- [35] A. Shafiee, M. T. Ahmadian, H. Hoursan and M. Hoviat Talab, "Effect of linear and rotational acceleration on human brain," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 7, pp. 248-260, 2015. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.7.17.5>
- [36] M. Ratajczak, M. Ptak, L. Chybowski et al., "Material and structural modeling aspects of brain tissue deformation under dynamic loads," *Materials*, vol. 12, no. 2, p. 271, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12020271>
- [37] S. Shabani, A. Allahverdizadeh and P. Namashiri, "Electromechanical-Growth Model for Simulating Myocardial Concentric Hypertrophy in Systemic Hypertension," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 37, no. 1, pp. 29-52, 2025. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.87993.1255>
- [38] V. Singh, *Textbook of Anatomy Head, Neck and Brain*. India: Elsevier, 2023.
- [39] B. Moradi and M. Asgari, "Brain Trauma in Vehicle Side Crash; Developing a Computational Model for Diffuse Axonal and Subdural Hematoma Injuries," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 91-102, 2018. <https://doi.org/10.22060/mej.2017.11803.5187>
- [40] J. H. McElhaney, J. L. Fogle, J. W. Melvin, et al., "Mechanical properties of cranial bone," *Journal of biomechanics*, vol. 3, no. 5, pp. 495-511, 1970. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(70\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0021-9290(70)90059-X)
- [41] M. Hajiaghamemar, I. S. Lan, C. W. Christian et al., "Infant skull fracture risk for low height falls," *International Journal of Legal Medicine*, vol. 133, no. 3, pp. 847-862, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00414-018-1918-1>
- [42] S. Kleiven, "Finite element modeling of the human head," Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-3347>
- [43] L. Zhang, K. H. Yang and A. I. King, "A proposed injury threshold for mild traumatic brain injury", *Journal of biomechanical engineering*, vol. 126, no. 2, pp. 226-236, 2004. <https://doi.org/10.1115/1.1691446>
- [44] R. Willinger and D. Baumgartner, "Human head tolerance limits to specific injury mechanisms", *International Journal of Crashworthiness*, vol. 8, no. 6, pp. 605-617, 2003. <https://doi.org/10.1533/ijcr.2003.0264>
- [45] A. Post and T. B. Hoshizaki, "Mechanisms of brain impact injuries and their prediction: a review," *Trauma*, vol. 14, no. 4, pp. 327-349, 2012. <https://doi.org/10.1177/1460408612446573>
- [46] J. Ruan, T. Khalil and A. I. King, "Dynamic response of the human head to impact by three-dimensional finite element analysis," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 116, no. 1, pp. 44-50, 1994. <https://doi.org/10.1115/1.2895703>
- [47] T. El Sayed, A. Mota, F. Fraternali and M. Ortiz, "Biomechanics of traumatic brain injury," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 197, no. 51-52, pp. 4692-4701, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2008.06.006>
- [48] A. Madhukar and M. Ostojka-Starzewski, "Finite element methods in human head impact simulations: a review", *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 9, pp. 1832-1854, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10439-019-02205-4>
- [49] C. Ward, M. Chan and A. Nahum, "Intracranial pressure—a brain injury criterion," *SAE Transactions*, pp. 3867-3880, 1980. <https://www.jstor.org/stable/44632636>
- [50] J. G. Beckwith, W. Zhao, S. Ji, A. G. Ajamil et al., "Estimated brain tissue response following impacts associated with and without diagnosed concussion," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 46, no. 6, pp. 819-830, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10439-018-1999-5>
- [51] W. Goldsmith and J. Plunkett, "A biomechanical analysis of the causes of traumatic brain injury in infants and

- children," *The American journal of Forensic Medicine and Pathology*, vol. 25, no. 2, pp. 89-100, 2004. <https://doi.org/10.1097/01.paf.0000127407.28071.63>
- [52] R. Willinger, L. Taleb and C. Kopp, "Modal and temporal analysis of head mathematical models," *Journal of Neurotrauma*, vol. 12, no. 4, pp. 743-754, 1995. <https://doi.org/10.1089/neu.1995.12.743>
- [53] M. S. Chafi, V. Dirisala, G. Karami and M. Ziejewski, "A finite element method parametric study of the dynamic response of the human brain with different cerebrospinal fluid constitutive properties," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 223, no. 8, pp. 1003-1019, 2009. <https://doi.org/10.1243/09544119JEIM631>
- [54] Z. Zhou, X. Li and S. Kleiven, "Fluid–structure interaction simulation of the brain–skull interface for acute subdural haematoma prediction," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 18, no. 1, pp. 155-173, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10237-018-1074-z>
- [55] L. A. Mihai, L. Chin, P. A. Janmey and A. Goriely, "A comparison of hyperelastic constitutive models applicable to brain and fat tissues," *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 12, no. 110, p. 20150486, 2015. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0486>
- [56] R. de Rooij and E. Kuhl, "Constitutive modeling of brain tissue: current perspectives," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 68, no. 1, p. 010801, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4032436>
- [57] Z. Zhou, X. Li and S. Kleiven, "Surface-based versus voxel-based finite element head models: comparative analyses of strain responses," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, pp. 1-20, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10237-025-01940-z>
- [58] D. A. Bruneau and D. S. Cronin, "Brain response of a computational head model for prescribed skull kinematics and simulated football helmet impact boundary conditions," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 115, p. 104299, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.104299>
- [59] T. A. Berger, M. Wischniewski, A. Opitz and I. Alekseichuk, "Human head models and populational framework for simulating brain stimulations," *Scientific Data*, vol. 12, no. 1, p. 516, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04886-0>
- [60] D. Koncan, M. Gilchrist, M. Vassilyadi and T. B. Hoshizaki, "A three-dimensional finite element model of a 6-year-old child for simulating brain response from physical reconstructions of head impacts," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, vol. 233, no. 2, pp. 277-291, 2019. <https://doi.org/10.1177/1754337118822940>
- [61] K. Upadhyay, D. G. Giovanis, A. Alshareef, A. K. Knutsen, et al., "Data-driven uncertainty quantification in computational human head models," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 398, p. 115108, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115108>
- [62] N. Lindgren, M. J. Henningsen, C. Jacobsen, C. Villa, S. Kleiven and X. Li, "Prediction of skull fractures in blunt force head traumas using finite element head models," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 23, no. 1, pp. 207-225, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10237-023-01768-5>
- [63] M. Hoppstädter, K. Linka, E. Kuhl, M. Schmicke and M. Böl, "Machine Learning Reveals Correlations Between Brain Age and Mechanics," *Acta Biomaterialia*, vol. 190, pp. 362-378, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2024.10.003>



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



Society of
Manufacturing
Engineering of
Iran

The Analysis of Fracture Phenomenon of the Deformed Aluminum- Copper Bimetallic Sheet in the Single Point Incremental Forming

Research Article

Ali Zahedi¹ , Zahra Sadat Amini², Seyed Mohammad Arab³

 [10.22067/jacsm.2025.95791.1365](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.95791.1365)

Abstract: In this study, the fracture behavior of aluminum-copper bimetallic sheet during single-point incremental forming process has been analyzed during experimental tests. For this purpose, the bimetallic sheet was produced by explosive welding method and then deformed during incremental forming process. To provide a basis for comparison with the uniaxial stress condition, uniaxial tensile tests were also conducted on the bimetallic sheets. Microstructural examinations of the fracture zones in both conditions were carried out using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The tensile test results indicated that the fracture strength of the bimetallic specimen increased by 70% compared to the monolithic aluminum sheet, reaching 317 MPa, while elongation improved from 8.5% to 7.5%, suggesting higher toughness in the bimetallic sample. Moreover, fracture surface observations revealed that aluminum exhibited brittle behavior, whereas copper showed ductile fracture under both incremental forming and uniaxial tensile loading. The interfacial microstructure contained intermetallic compounds, and energy-dispersive spectroscopy (EDS) confirmed hardness increase within the bonding region.

KeyWords: Bimetallic Sheet, Fracture Surface, Microstructure, SEM.

1- Introduction

The single-point incremental forming (SPIF) process is a modern, low-cost, and flexible technique for producing thin metallic components, in which a simple forming tool controlled by a CNC machine incrementally forms the sheet through localized deformation [1]. The advantages of SPIF include the elimination of expensive dies, geometric flexibility, numerical control, and the ability to manufacture customized parts. Its applications are rapidly expanding in medical (prosthesis manufacturing), automotive, aerospace, and food industries.

However, analyzing the deformation and fracture behavior in SPIF, especially for bimetallic sheets, is complex. Plastic deformation causes grain refinement,

increases dislocation density, and induces the formation of intermetallic compounds at the interface, which in turn affect mechanical behavior and fracture mechanisms [2].

Aluminum-copper (Al/Cu) bimetallic sheets are widely used in heat exchangers, automotive radiators, and corrosive pipelines due to their combination of low weight, high electrical and thermal conductivity, and good corrosion resistance. Several studies have investigated their behavior under SPIF conditions. Alaie et al. [3] analyzed the influence of forming temperature and reported that increasing temperature up to 250 °C improves formability, whereas higher temperatures lead to brittle intermetallic formation and premature fracture. Tayebi et al. [4] observed that increasing the copper layer thickness reduces the forming limit angle. Zahedi et al. [5] simulated fracture initiation in SPIF using coupled damage-plasticity models.

Despite these studies, experimental analysis of fracture surfaces, intermetallic compounds, and their effect on mechanical performance in Al/Cu bimetallic sheets remains limited. This study aims to investigate the fracture mechanism of explosively welded Al/Cu sheets during SPIF and to examine their microstructure and mechanical behavior up to fracture.

2- Methodology

The Al/Cu bimetallic sheet was fabricated by explosive welding using AA1050 aluminum and C11000 copper plates. The total sheet thickness was 1.15 mm, consisting of a 0.70 mm aluminum layer and a 0.45 mm copper layer. The chemical composition was determined by quantitative analysis: the aluminum layer contained 0.335 wt% Fe and 0.167 wt% Si (≈ 99.35 wt% Al), while the copper layer had ≈ 99.97 wt% Cu with traces of Ni, Fe, and Zn.

The SPIF process was conducted using a hemispherical-ended steel tool (diameter = 10 mm) at a

* Manuscript received October 05, 2025, Revised October 25, 2025, Accepted November 12, 2025.

¹ Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Materials and Manufacturing, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, E-mail: azahedi@uma.ac.ir

² Bachelor of Science, Department of Materials and Manufacturing, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

³ Associate Professor, Department of Materials and Manufacturing, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

feed rate of 200 mm/min. The 100×100 mm sheets were clamped and incrementally formed under CNC control along a conical path with a variable wall angle. The process continued until complete fracture occurred at a depth of 18.63 mm. The deformed geometry and fracture surfaces were preserved for subsequent analysis.

Uniaxial tensile tests were performed according to ASTM E08-04 on wire-cut samples using a SANTAM testing machine. Two types of specimens—monolithic aluminum and Al/Cu bimetal—were evaluated. The mechanical responses are presented in Fig. 1.

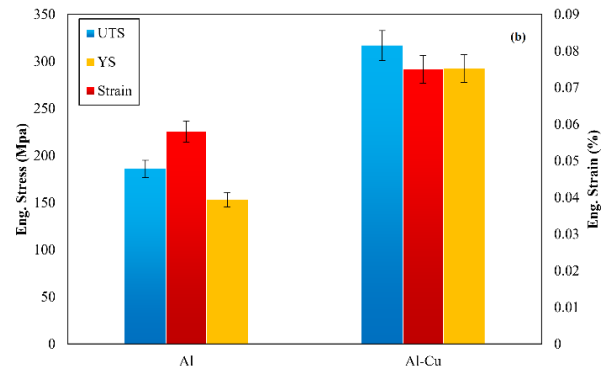
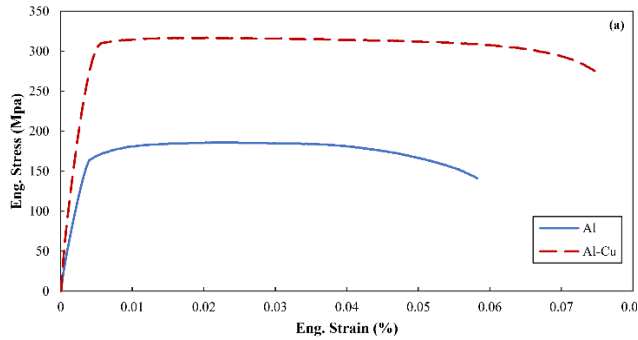


Fig. 1 (a) The Stress-Strain Curves, (b) The extracted mechanical properties.

3- Results and Discussion

Fracture morphology was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) in both backscattered (BSE) and secondary electron (SE) modes. The aluminum layer exhibited ductile fracture with deep dimples, while in the bimetal, as shown in Fig. 2 and Fig. 3, the aluminum side showed brittle cleavage and the copper side ductile dimple-type failure.

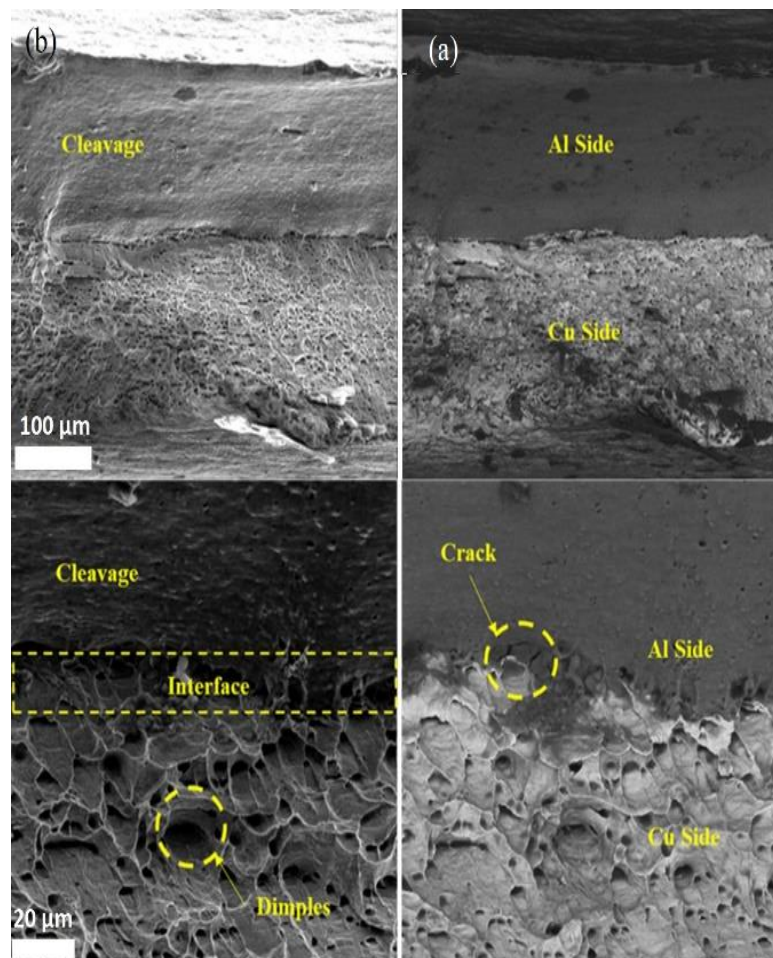


Fig. 2 Fracture surface of Al/Cu bimetallic sheet after uniaxial tensile test at two different magnifications, (a) SEM image with backscattered electrons, and (b) SEM image with secondary electrons.

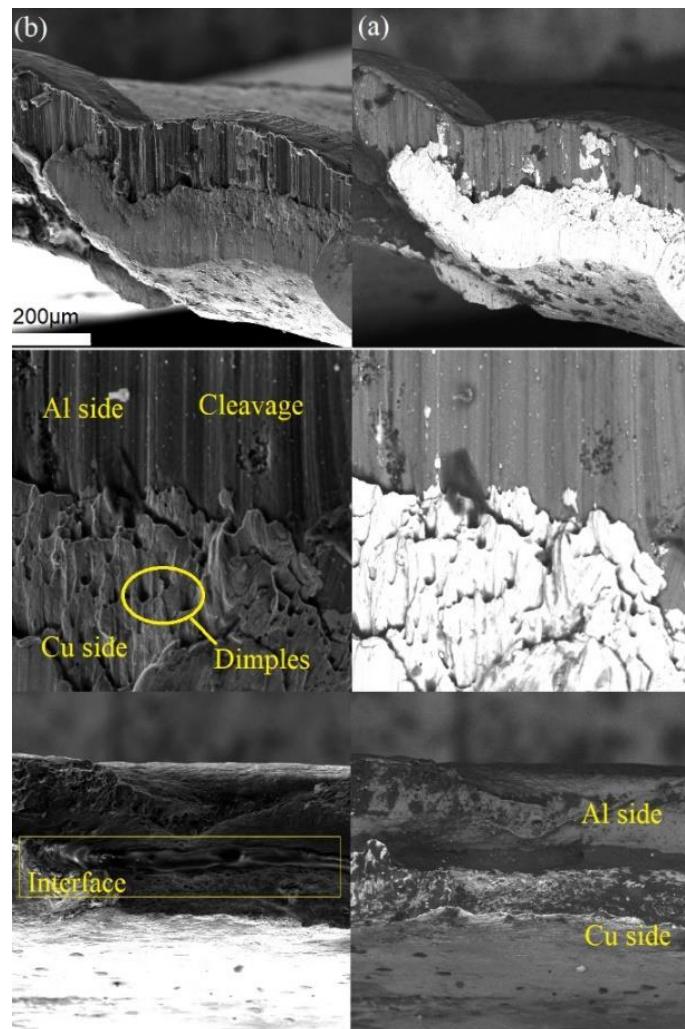


Fig. 3. Fracture microstructure of Al/Cu bimetallic sample after incremental deformation process. (a) SEM image with backscattered electrons and (b) SEM image with secondary electrons.

To identify interfacial compounds, point EDS analysis was performed on dark regions observed in the cross-section area. As presented in Fig. 4, the results indicated the formation of CuAl and Cu $\square$ Al $\square$ intermetallic phases, which contributed to the increased strength and hardness of the interface [6]. A small amount of carbon detected in these regions was attributed to trapped contamination during welding, explosive by-products, or preparation artifacts, but it did not significantly affect the mechanical properties.

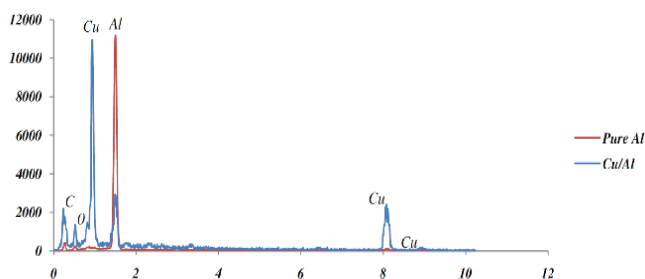


Fig. 4 Results of elemental analysis of the dark area in the cross-section of the Al/Cu sample.

In addition, elemental mapping (X-ray MAP) confirmed a uniform distribution of Al and Cu across the interface, with no evidence of nonmetallic inclusions or secondary phases, indicating a sound and continuous metallurgical bond.

4- Conclusion

The mechanical and microstructural analysis of the explosively welded Al/Cu bimetallic sheet demonstrated a high-quality metallurgical bond between the two metals. The intermetallic phases formed at the interface enhanced overall strength. The ultimate tensile strength and yield strength of the bimetal were measured as 317 MPa and 293 MPa, respectively, compared with 186 MPa and 153 MPa for pure aluminum—representing increases of 70 % and 91 %.

However, the total elongation decreased from 7.5 % in monolithic aluminum to 5.8 % in the Al/Cu bimetal, indicating a 22.6 % reduction in ductility. This decline was attributed to the presence of brittle intermetallic layers that limited dislocation motion at the interface. SEM images revealed local cracks related to CuAl and Cu $\square$ Al $\square$ phases, while EDS and MAP analyses confirmed their

discontinuous distribution, increasing interfacial hardness without severely reducing overall strength. The brittle fracture of aluminum and ductile fracture of copper was consistent with their microstructural characteristics and the strain distribution during forming.

Acknowledgment

This research was supported by the University of Mohaghegh Ardabili (Research grant number 1404/39/7004).

References

- [1] G. Vignesh et al., "Review on incremental sheetmetal forming process: deformation mechanisms and recent developments," *International Journal of Material Forming*, vol. 18, no. 2, p. 30, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12289-025-01895-7>
- [2] J. R. Duflou et al., "Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 1, pp. 253–256, 2008. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2008.03.030>
- [3] A. Alaie et al., "Investigation of forming limit diagram and mechanical properties of the bimetallic Al/Cu composite sheet at different temperatures which fabricated by explosive welding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 235, no. 1–2, pp. 73–84, 2021. <https://doi.org/10.1177/0954405420949227>
- [4] P. Tayebi et al., "Experimental and Numerical Investigation of Forming Limit Diagrams during Single Point Incremental Forming for Al/Cu Bimetallic Sheets," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 2, p. 214, 2024. <https://doi.org/10.3390/met14020214>
- [5] A. Zahedi Dizajyekan et al., "Fracture investigation in single point incremental forming of the Al/Cu laminated sheets using coupled damage plasticity model," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 43, pp. 242–259, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.04.010>
- [6] M. H. M. Kouters et al., "Characterization of intermetallic compounds in Cu–Al ball bonds: Mechanical properties, interface delamination and thermal conductivity," *Microelectronics Reliability*, vol. 53, no. 8, pp. 1068–1075, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.02.020>



تحلیل پدیده شکست ورق دولایه آلومینیوم - مس تغییر شکل یافته در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای*

مقاله پژوهشی

سید محمد عرب^(۳)زهرا سادات امینی^(۲)علی زاهدی^(۱)  10.22067/jacsm.2025.95791.1365

چکیده در این پژوهش رفتار شکست ورق دولایه آلومینیوم - مس طی فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای در طی آزمون‌های تجربی تحلیل شده است. برای این منظور ورق دولایه با روش جوشکاری انفجاری تولید شده و سپس طی فرایند شکل دهی تدریجی تغییر شکل داده شده است. به منظور مقایسه با وضعیت تنش تک محوری، آزمون کشش تک محوری نیز بر روی ورق‌های دولایه صورت گرفت. بررسی‌های ریزساختاری با OM و SEM بر روی مقاطع شکست در دو وضعیت انجام گردید. نتایج آزمون‌های کشش نشان داد که استحکام شکست نمونه دولایه با افزایش ۷۰٪ نسبت به ورق آلومینیوم تک لایه به ۳۱۷ مگاپاسکال رسیده و ازدیاد طول نیز از ۵/۸٪ به ۷/۵٪ افزایش یافته است که بیانگر چقرمگی بالاتر نمونه دولایه است. همچنین، بررسی سطح شکست نشان داد که در پدیده شکست در فرایند شکل دهی تدریجی و کشش تک محوری، آلومینیوم رفتار ترد و مس رفتار نرم از خود نشان می‌دهد. ریزساختار فصل مشترک حاوی ترکیبات بین فلزی است و آنالیز EDS افزایش سختی در ناحیه پیوند را تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: سطح شکست، ورق دولایه، ریزساختار، SEM.

مقدمه

را به تدریج شکل می‌دهد. با توجه به اینکه فرایند شکل دهی تدریجی بیشتر برای نمونه‌سازی و تولید قطعات در تعداد کم کاربرد دارد، در صنعت اتومبیل‌سازی از این فرایند بیشتر برای ساخت نمونه یا برخی اجزای اتومبیل‌های سفارشی استفاده می‌شود. در صنایع پزشکی از این فرایند برای ساخت پروتزهای پزشکی استفاده می‌شود. این فرایند در صنایع هوافضا و صنایع غذایی نیز کاربردهایی دارد. فرایند شکل دهی تدریجی هم مانند سایر روش‌های شکل دهی دچار ضعف‌هایی است که محققان در سال‌های اخیر آزمایش‌های متعددی در جهت رفع این ضعف‌ها انجام داده‌اند و روش‌های شکل دهی تدریجی متعددی ارائه کرده‌اند [1]. یکی از چالش‌ها در این زمینه بررسی ریزساختار سطح شکست طی این فرایند است که با روش‌های متعددی قابل

شکل دهی تدریجی فرایندی نوین و کم هزینه برای شکل دهی ورق‌های فلزی محسوب می‌شود. با توجه به زمان‌بر بودن این فرایند، استفاده از این روش برای تولید قطعات نسبتاً پیچیده و در تعداد کم توصیه شده است. از مزایای شکل دهی تدریجی ورق می‌توان به در دسترس بودن و قیمت نسبتاً پایین تجهیزات، امکان تولید قطعات در تعداد کم و انعطاف پذیری تولید از لحاظ شکل هندسی، قابلیت کنترل عددی فرایند و عدم نیاز به قالب‌های گران قیمت و پیچیده اشاره کرد. در این فناوری یک ابزار ساده شکل دهی تحت کنترل یک دستگاه CNC، بر روی یک ورق که توسط ورق گیر مناسب مهار شده است، در یک مسیر از پیش تعیین شده حرکت می‌کند و در اثر ایجاد کرنش‌های برشی ورق

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۷/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۸/۲۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مواد، ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل. Email: azahedi@uma.ac.ir

(۲) کارشناسی مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مواد، ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

انجام است. بررسی ریزساختار تغییر یافته در فرایندهای شکل دهی ورق نقش کلیدی در درک مکانیزم های تغییر شکل و شکست مواد دارد. طی فرایند شکل دهی، نه تنها شکل دانه ها به طور قابل توجهی تغییر می کند، بلکه ناهنجاری های داخلی و مرز دانه ها نیز دستخوش تغییرات عمده می شوند. این تغییرات، به ویژه در بخش های بحرانی مانند دیواره های استوانه ای، گوشه های قالب و مناطق فلنج، تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی و نحوه شکست ورق های فلزی دارند. ویژگی های ریزساختاری از جمله اندازه دانه، توزیع فازها و چگالی ناهنجاری ها به ارزیابی رفتار مواد تحت نیروهای مختلف و پیش بینی عملکرد ماده کمک می کنند. تغییر اندازه و شکل دانه در حین شکل دهی، می تواند بهبود استحکام و شکل پذیری را در پی داشته باشد [2]. همچنین، کرنش سختی که ناشی از تغییر شکل پلاستیک است، منجر به افزایش تراکم ناهنجاری ها می شود و در نهایت سختی و استحکام ماده را بالا می برد، اما ممکن است شکل پذیری آن را کاهش دهد. دمای فرایند شکل دهی فلز نیز نقش مهمی در تغییرات ریزساختاری دارد؛ کار سرد معمولاً باعث افزایش تراکم ناهنجاری ها و سختی بیشتر می شود، در حالی که کار داغ می تواند با فعال کردن فرایند تبلور مجدد، چگالی ناهنجاری ها را کاهش دهد. علاوه بر دما، جهت گیری دانه ها (بافت یا تکسچر) نیز بر رفتار ماده تأثیرگذار است. به عنوان مثال، برخی جهت گیری ها می توانند باعث افزایش شکل پذیری یا تشدید عیوبی نظیر گوش دار شدن در کشش عمیق شوند. بررسی این موارد در حالتی که ورق دولایه در فرایند شکل دهی تدریجی مورد استفاده باشد، پیچیده تر می شود و نیاز به بررسی و مطالعه بیشتر پیدا می کند. ورق های دولایه با داشتن خواص ترکیبی از جنس های مختلف کاربردهای خاص و ویژه ای در صنایع مختلف دارند. با انتخاب زوج مناسب، این ورق ها، ترکیبی از خواص مطلوب مانند وزن کمتر، مقاومت خوب در برابر خوردگی، استحکام مکانیکی بالا و هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب را به دست می دهند. برای مثال از ورق دو لایه آلومینیوم - مس در صنایع غذایی برای ساخت محفظه هایی با قابلیت انتقال حرارت و یا جریان الکتریکی استفاده می شود. همچنین به کمک فرایند هیدروفرمینگ، در صنایع هوایی از لوله های دولایه آلومینیوم - مس برای انتقال مواد خورنده استفاده می شود [3]. از طرفی دیگر، این ورق ها در ساخت اجزای مختلف خودرو مانند مبدل های حرارتی و پره های

رادیاتور به کار می روند. رسانایی حرارتی عالی آن ها، انتقال حرارت کارآمد و تنظیم دما را تضمین می کند و به عملکرد کلی و طول عمر خودرو کمک می کند. در نهایت، مطالعه دقیق ریزساختار در فرایندهای شکل دهی تدریجی، امکان بهینه سازی این روش و استفاده در کاربردهای متنوع را فراهم می کند. درک مکانیزم های شکست، پدیده های مرتبط با تنش های پسماند و تأثیرات ترکیبات بین فلزی از جمله مواردی هستند که برای بهبود عملکرد و افزایش قابلیت اطمینان قطعات شکل گرفته، باید به طور دقیق بررسی شوند.

در زمینه بررسی تغییر شکل ورق های دولایه در فرایند شکل دهی تدریجی، هنریش و همکاران [4] اثر قطر ابزار، چینش لایه های فلزی و مسیر ابزار را بر روی نیروی شکل دهی و توزیع ضخامت ورق دولایه Al/Cu مطالعه کردند. نتایج نشان داد که چینش لایه های فلزی اثر زیادی بر نیروهای شکل دهی دارد و مسیرهای مارپیچی باعث توزیع یکنواخت تر ضخامت می شوند. زاهدی [5] به صورت عددی نشان داد که تنش و کرنش اعمالی به ورق دارای مسیری غیرخطی و پیچیده در فرایند شکل دهی تدریجی هستند و پیش بینی شکست ورق نیازمند کالیبره کردن دقیق ثابت های ماده است. قیصریان و همکاران [6] تحقیقی بر روی بهینه سازی پارامترهای شکل دهی تدریجی ورق های دولایه Al/Cu انجام دادند. آزمایش ها نشان داد که نحوه چینش لایه ها، مسیر ابزار و اندازه گام عمودی اثر قابل توجهی بر نیروهای شکل دهی دارد. علایی و همکاران [7] اثر دما بر شکل پذیری و یکپارچگی ورق های دولایه Al/Cu را بررسی کرده اند. ایشان با شکل دهی در دماهای بالاتر (200-250 °C) شکل پذیری را بهبود داده اند، اما در دمای بالاتر از 250 °C ترکیبات شکننده بین فلزی تشکیل شده و شکست زودرس رخ داده است. طیبی و همکاران [8] رفتار مکانیکی و منحنی های حد شکل پذیری ورق های دولایه Al/Cu تولید شده به روش جوشکاری انفجاری را در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی و عددی آن ها نشان داد که توزیع کرنش در دو لایه متفاوت است و لایه آلومینیومی بخش عمده تغییر شکل پلاستیک را تحمل می کند. همچنین مشاهده شد که با افزایش ضخامت نسبی لایه مسی، زاویه حد شکل پذیری کاهش می یابد و محل شروع شکست از دیواره میانی به ناحیه فلنج منتقل می شود. یافته های این پژوهش تأکید دارد که کنترل ضخامت لایه ها و

تدریجی تک نقطه‌ای تغییر شکل تا لحظه بروز پارگی و شکست داده است. نوآوری اصلی این تحقیق، تحلیل مکانیزم شکست ورق دولایه تولید شده به روش جوشکاری انفجاری در فرایند شکل‌دهی تدریجی است که تا کنون به صورت تجربی و مقایسه‌ای با ورق تک‌لایه آلومینیوم گزارش نشده است. برای این منظور مطالعاتی با استفاده از آزمون‌های متالورژیکی بر روی نمونه‌های حاصل از فرایند تغییر شکل تدریجی انجام شده است و نتایج به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی دقیق اثر لایه مس بر خواص مکانیکی و رفتار شکست آلومینیوم، نتایج به دست آمده با ورق تک‌لایه آلومینیومی به عنوان نمونه مرجع مقایسه گردید. این مقایسه امکان تحلیل سهم هر یک از لایه‌ها در استحکام و شکل‌پذیری نهایی ورق دولایه را فراهم می‌سازد.

روش پژوهش

برای ساخت ورق دولایه از فرایند جوشکاری انفجاری استفاده شده است. اجزای تشکیل‌دهنده ورق دولایه، آلیاژهای آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس ۱۰۱۰۰ هستند و ضخامت نهایی ورق به دست آمده ۱/۱۵ mm است که از این ضخامت ۰/۷ mm مربوط به لایه آلومینیومی و ۰/۴۵ mm لایه مسی است. همچنین با استفاده از آزمون کوانتومتری، ترکیب شیمیایی ورق‌های آلومینیوم و مس به ترتیب در جدول (۱) و جدول (۲) به دست آمد.

با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای، ورق دولایه با ابعاد ۱۰۰ mm در ۱۰۰ mm به هندسه مخروطی با زاویه دیواره متغیر، تغییر شکل داده می‌شود. هندسه در نظر گرفته شده برای تغییر شکل به گونه‌ای است که با افزایش عمق شکل‌دهی، اندازه کرنش‌های پلاستیک بیشتری به ورق وارد می‌شود. به منظور بررسی سطح شکست ورق، فرایند تا لحظه وقوع شکست و پارگی ادامه می‌یابد و بلافاصله پس از شکست متوقف می‌شود. هندسه‌ای که ورق طبق آن تغییر شکل یافته، در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. البته با توجه به شکل‌پذیری این ورق، شکست قبل از رسیدن به ارتفاع نهایی و در ارتفاع ۱۸/۶۳ mm رخ می‌دهد. در این فرایند شکل‌دهی تدریجی با سرعت ۲۰۰ mm/min ابزار سر نیم‌کروی انجام گرفت. همچنین جزئیات بیشتر از انجام آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی در مرجع

پارامترهای فرایند، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود رفتار شکل‌دهی ورق‌های دولایه دارد. درویشی و همکاران [9] اثر فرایند نورد زاویه‌ای کانالی (ECAR) را بر خواص مکانیکی ورق‌های دولایه Al/Cu از دیدگاه آزمایشی و عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که عملیات ECAR باعث بهبود استحکام کششی و سختی ناحیه بین‌فلزی شده، اما در عین حال تردی فصل مشترک را افزایش داده است. تصاویر میکروسکوپی نیز حاکی از ریز شدن دانه‌ها و تشکیل فازهای بین‌فلزی CuAl و Al_4Cu_9 در ناحیه اتصال بود. پژوهش آنان نشان داد که تغییرات ریزساختاری ناشی از این فرایند می‌تواند بر رفتار شکست در آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی تأثیرگذار باشد. کاروالهو و همکاران [10] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری انفجاری را برای اتصال ورق‌های Al/Cu با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. جوشکاری اصطکاکی باعث تغییرات گسترده در ریزساختار شده اما جوشکاری انفجاری اتصال مکانیکی محکم‌تر و استحکام بالاتر ایجاد کرده است. کاروالهو و همکاران [11] همچنین ضمن بررسی جوشکاری انفجاری ورق‌های دولایه Al/Cu دریافتند که نحوه چینش لایه‌ها و نوع مواد منفجره تأثیر زیادی بر کیفیت اتصال دارد. نتایج نشان داد که وقتی آلومینیوم به عنوان صفحه پرواز قرار گیرد، ذوب سطحی یکنواختی ایجاد می‌شود، اما استفاده از مس به عنوان لایه بالایی، جوش‌پذیری بین آلومینیوم و مس را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در ادامه هانلیانگ و همکاران [12] به بررسی مورفولوژی ریزساختار ورق دولایه Al/Cu پرداختند. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که در فصل مشترک، ترکیبات بین‌فلزی شکنده Al_2Cu و Al_4Cu_9 تشکیل شده‌اند که باعث افزایش سختی و کاهش شکل‌پذیری شده‌اند. زاهدی و همکاران [13]، [14] لحظه شروع شکست در شکل‌دهی تدریجی ورق دولایه Al/Cu را مورد ارزیابی عددی و تجربی قرار دادند. ایشان پدیده ناپایداری و شکست ورق دولایه را از نگاه ماکروسکوپی بررسی کردند و با استفاده از یک معیار آسیب به پیش‌بینی لحظه شروع شکست پرداختند.

با توجه به پژوهش‌های پیشین مشخص می‌شود که بررسی‌های محدودی بر روی سطح شکست ورق دولایه Al/Cu انجام شده است و البته این بررسی‌ها اغلب محدود به فرایندهای تولید ورق دولایه می‌باشد. هدف از این پژوهش، بررسی رفتار تغییر شکل و شکست ورق دولایه Al/Cu است که در طی فرایند شکل‌دهی

خواص مکانیکی ورق دولایه حاصل از این آزمون نیز بررسی شده است.

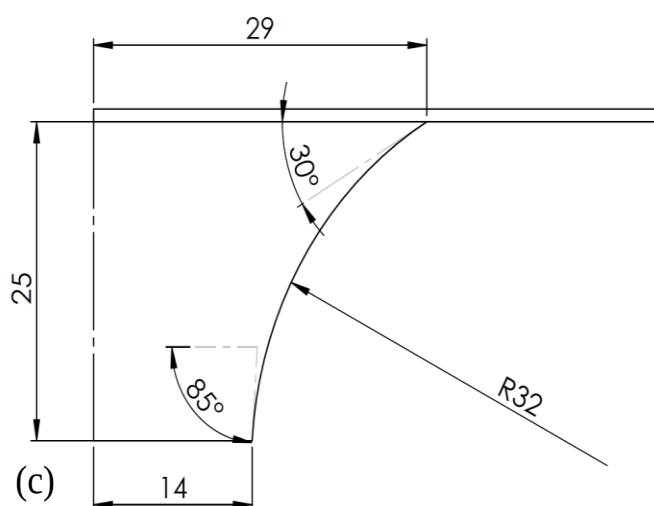
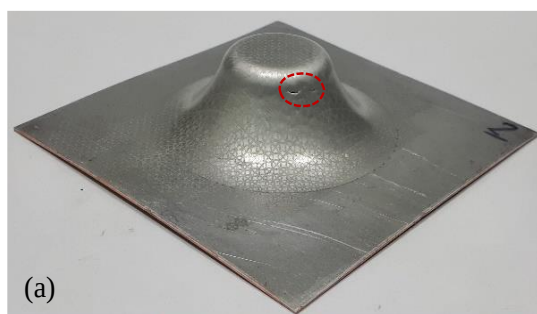
[14] ارائه شده است. شکل (۱- a) و (۱- b) نمونه تغییر شکل داده شده را طی این فرایند نشان می‌دهد. در این پژوهش، سطح شکست ورق دولایه در آزمون کشش یک محوری و

جدول ۱ ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) لایه آلومینیومی ورق دولایه Al/Cu

Al	Fe	Si	Mn	Sb	Zn	V	Ti
~99.35	0.335	0.167	0.044	0.0332	0.0128	0.0124	0.0094

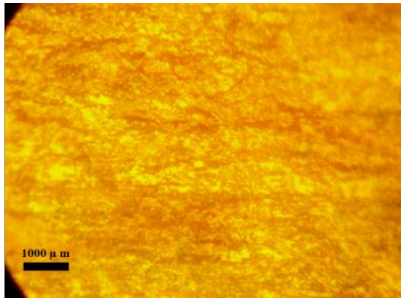
جدول ۲ ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) لایه مسی ورق دولایه Al/Cu

Cu	Ni	P	Co	Fe	Zn	As	S
~99.97	0.0078	0.005	0.0039	0.002	0.0011	0.001	0.0006



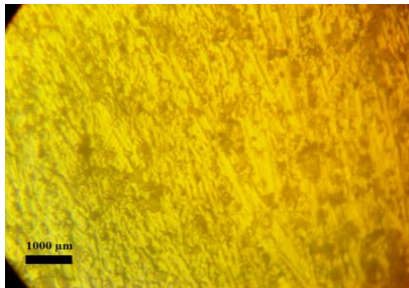
شکل ۱ ورق دولایه تغییر شکل داده شده در فرایند شکل‌دهی تدریجی، (a) سطح بیرونی لایه آلومینیومی، (b) سطح درونی لایه مسی، (c) هندسه مورد نظر جهت تغییر شکل (ابعاد به mm است)

محلول دیگری شامل FeCl_3 و HCl نیز ناکارآمد بود. در نهایت، تصمیم گرفته شد که هر فلز جداگانه اچ شود. اچ کردن مس ابتدا با استفاده از محلول حاوی FeCl_3 و HNO_3 انجام شد که مس تا حدودی اچ شد، اما بهترین نتیجه با محلولی شامل H_2O ، HNO_3 و HF به دست آمد [16] و همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، تا حدودی دانه‌های کشیده شده مس را نشان داد.



شکل ۳ متالوگرافی مس با بزرگ نمایی 100x

در اچ آلومینیوم تلاش برای اچ الکتروشیمیایی [17] موفقیت‌آمیز نبود و بهترین نتیجه با محلول Weck's reagent [18] حاصل شد، که دانه‌بندی آلومینیوم را طبق شکل (۴) تا حدودی نمایان کرد.



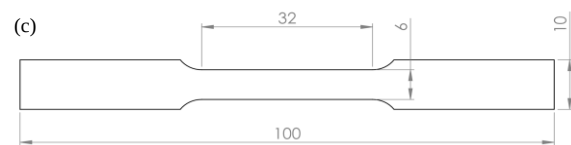
شکل ۴ متالوگرافی آلومینیوم با بزرگ نمایی 100x

پس از اچ کردن، تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد که در مس، دانه‌های کشیده شده حاصل از فرایند نورد قابل مشاهده هستند. در آلومینیوم نیز دانه‌های کشیده شده در اثر نورد دیده شدند، اما شناسایی جزئیات دشوار بود. تحلیل متالوگرافی نشان داد که هر دو فلز رفتار متفاوتی در برابر محلول‌های اچ دارند. ساختار دانه‌بندی آن‌ها تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی دارد و برای بررسی دقیق‌تر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM استفاده شد.

آزمون کشش

آزمون کشش تک‌محوری برای تعیین خواص مکانیکی ورق‌های دولایه Al/Cu و ورق پایه آلومینیوم طبق استاندارد ASTM E08-04 انجام شد. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد و با استفاده از وایرکات از ورق دولایه بریده شدند. آزمون کشش با استفاده از دستگاه کشش ستنام و با نرخ کرنش اولیه 10^{-3} s^{-1} انجام شد. میانگین نتایج برای هر نوع نمونه به دست آمده (ورق آلومینیوم تک‌لایه و ورق دولایه Al/Cu)، گزارش شد.

نمودارهای تنش - کرنش حاصل از آزمون‌های کشش در قسمت نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از میکروسکوپ استریو برای تصویربرداری از ظاهر سطوح شکست استفاده شده است.



شکل ۲ نمونه‌های آزمون کشش تک‌محوری، (a) نمونه‌های Al/Cu (b) نمونه‌های آلومینیوم، (c) شماتیک نمونه (ابعاد به mm است)

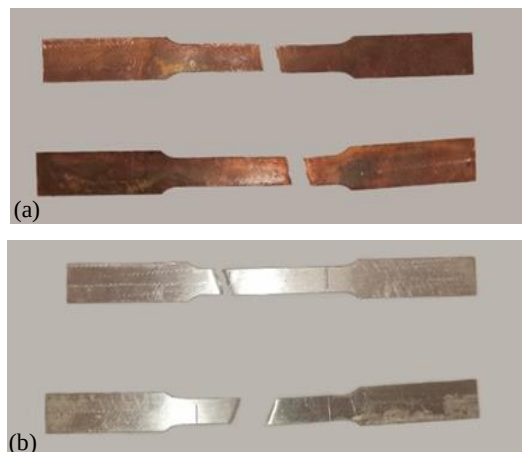
متالوگرافی

در متالوگرافی ورق دولایه Al/Cu ، چالش اصلی، استفاده از محلول اچ مناسب برای هر دو فلز است. در فرایند اچ کردن، چندین محلول اچ مختلف بر اساس توصیه‌های استاندارد ASTM E407-07 آزمایش شد [15]. برای مثال محلول Keller تأثیر زیادی روی آلومینیوم نداشت و مس هیچ تغییری نشان نداد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون کشش

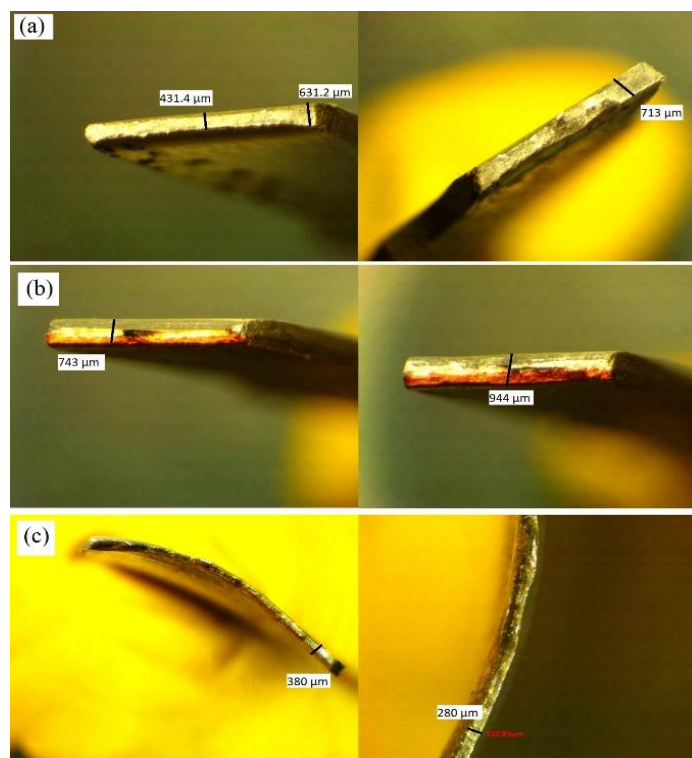
در شکل (۵) نمونه‌های آزمون کشش پس از شکست نشان داده شده است. به نظر می‌رسد در نمونه‌های ورق دولایه Al/Cu شکست نرم و ترد اتفاق افتاده باشد، در حالی که در نمونه تک‌لایه آلومینیومی ظاهر شکست نشان‌دهنده غالب بودن شکست نرم می‌باشد.



شکل ۵ نمونه‌های آزمون کشش بعد از انجام آزمون، (a) ورق Al/Cu، شکست ترد، (b) ورق آلومینیوم، شکست نرم

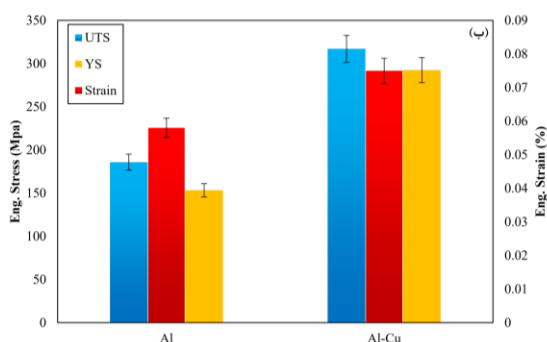
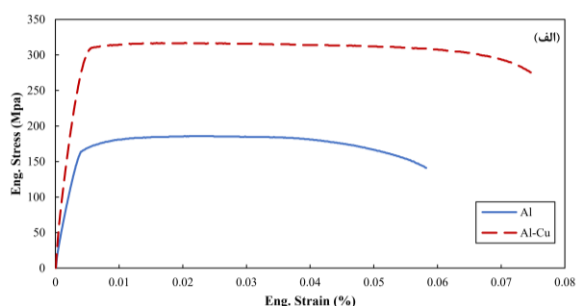
سطح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ استریو تصویربرداری شده است. در سطوح شکست قسمت‌های مات نشان دهنده شکست نرم و قسمت‌های براق نشان دهنده شکست ترد هستند. شکل (۶- a) سطح شکست دو نمونه آزمون کشش تک‌لایه آلومینیومی است. به وضوح دیده می‌شود که مد شکست نرم غالب مد شکست ترد است و نمونه شکست نرمی داشته است. در شکل (۶- b) که مربوط به سطح شکست ورق دولایه Al/Cu است، قسمت‌های براق نسبت به مات بیشتر است که نشان دهنده غالب بودن شکست ترد در این نمونه‌ها است. این موضوع را می‌توان به انعطاف‌پذیری آلومینیوم به مس نسبت داد. همچنین عیوب و یا فازهای ثانویه ایجاد شده هنگام اتصال این ورق‌ها نیز می‌تواند منجر به این موضوع گردد.

شکل (۶- c) مربوط به سطح شکست نمونه حین شکل‌دهی تدریجی (شکل ۱) است. در سطح شکست این نمونه، قسمت نشان داده شده دچار تغییرات زیادی شده است و این تغییرات می‌تواند حاصل کرنش پلاستیک شدید هنگام شکل‌دهی و اتصال این دو ورق باشند.



شکل ۶ تصویر میکروسکوپ استریو از سطح شکست (a) آلومینیوم (آزمون کشش)، (b) Al/Cu (آزمون کشش)، (c) Al/Cu (فرایند شکل‌دهی تدریجی)

همین ناحیه فصل مشترک در ورق‌های دولایه می‌باشد. عامل بعدی که می‌تواند بر میزان کرنش شکست نمونه‌های دولایه تأثیرگذار باشد، ضخامت است. طالبی و همکاران [21] نشان دادند که ضخامت نقش مهمی در شروع و رشد آسیب در فرایندهای شکل‌دهی ورق دارد. از طرفی، بر اساس گزارش‌های ارائه شده [20] مشخص شده است که میزان کرنش شکست در نمونه‌های ضخیم‌تر نسبت به نمونه‌های نازک‌تر بیشتر است. بنابراین، ازدیاد طول ورق با افزایش ضخامت نمونه افزایش می‌یابد. در ورق دولایه مورد بررسی در این پژوهش نیز ضخامت ورق دولایه از ورق تک‌لایه آلومینیومی 0.15mm بیشتر است و بخشی از افزایش کرنش شکست آن را می‌توان به این فاکتور نسبت داد.



شکل ۷ (a) منحنی‌های تنش - کرنش، (b) خواص مکانیکی استخراج شده

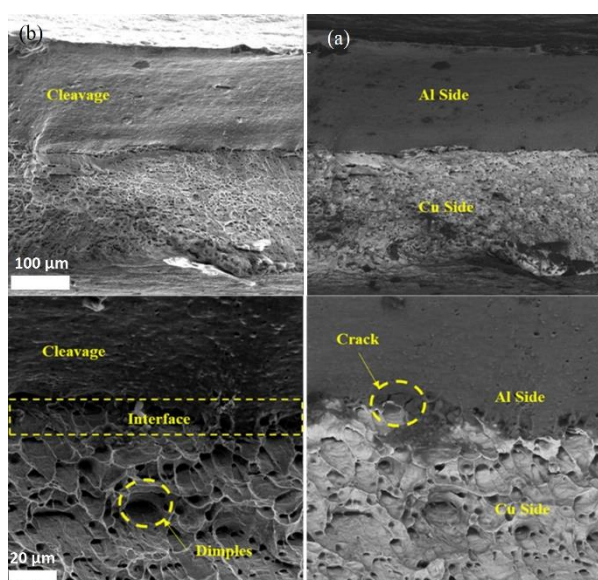
تحلیل نتایج SEM

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از تصاویر SEM پرداخته می‌شود. انواع مختلفی از شکست در فلزات رخ می‌دهد که نوع شکست می‌تواند وابسته به ماده، دما، حالت تنش و نرخ کرنش باشد. به منظور ارزیابی رفتار شکست، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تصویربرداری از سطح شکست نمونه‌ها پس از فرایند شکل‌دهی تدریجی و آزمون کشش

نتایج آزمون کشش در شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل مشاهده می‌شود که رفتار مکانیکی نمونه Al/Cu نسبت به نمونه Al کاملاً متفاوت بوده و رفتار کششی آلومینیوم پس از اتصال با مس به صورت کامل تغییر پیدا کرده است. نتایج کمی آزمون کشش در شکل (۷ - b) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که خواص مکانیکی نمونه Al/Cu (استحکام شکست، استحکام تسلیم و ازدیاد طول) نسبت به نمونه Al افزایش پیدا کرده است. افزایش چشم‌گیر سطح زیر منحنی تنش - کرنش در نمونه Al/Cu که نشان دهنده چقرمگی ایستایی ماده است، می‌تواند باعث افزایش مقاومت ماده در برابر اشاعه ترک شود. بهبود خواص ورق‌های دولایه Al/Cu نسبت به ورق‌های Al یکی از اهداف تولید ورق‌های دولایه یا چند لایه با مواد مختلف بوده است و بالا بودن استحکام شکست و شکل‌پذیری (درصد ازدیاد طول) نمونه Al/Cu تولید شده توسط جوشکاری انفجاری در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است. شایان ذکر است که بر اساس مطالعات صورت گرفته، استحکام شکست ورق‌های دولایه Al/Cu عموماً بین استحکام آلومینیوم خالص و مس خالص می‌باشد [19].

خواص مکانیکی ناحیه اتصال یا همان فصل مشترک آلومینیوم و مس می‌تواند بر رفتار کششی و به خصوص ازدیاد طول (کرنش شکست) نمونه‌های دولایه تأثیرگذار باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در سایر پژوهش‌ها [20] مشاهده شده است که سختی ناحیه پیوند بیشتر از نواحی مجاور است. این افزایش سختی را می‌توان به وقوع واکنش شیمیایی در حین جوشکاری انفجاری و ایجاد فاز متالورژیکی بسیار سخت بین لایه‌های Al و Cu نسبت داد. با توجه به اینکه سختی این ناحیه بیشتر از نواحی مجاور است، بنابراین امکان حرکت نابه‌جایی‌ها در این ناحیه کمتر از سایر نواحی است و عموماً این ناحیه نباید نقش زیادی در ازدیاد طول (کرنش شکست) داشته باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه پیوند نمی‌تواند دلیل مناسبی برای ازدیاد طول ورق دولایه باشد. سختی و استحکام بالاتر فصل مشترک ورق‌های دولایه به دلیل بروز واکنش‌های شیمیایی در حین فرایند تولید برخی ترکیبات بین‌فلزی، منجر به بهبود خواص استحکامی ورق‌های دولایه می‌شود. در نتیجه یکی از دلایل بهبود استحکام شکست و استحکام تسلیم ورق‌های دولایه که در شکل (۷) ارائه شده است،

موضوع می‌تواند به حضور ترکیبات ترد بین‌فلزی در فصل مشترک آلومینیوم و مس مربوط باشد. حضور حفرات و شکست مخروط و فنجان در سمت مس کاملاً مشهود است. این موضوع خود نشان دهنده شکست نرم است. در سطح شکست سمت مس ورق دولایه مشاهده می‌شود که فرایند شکست و جدایش به این صورت اتفاق افتاده است که در ابتدا حفرات با ابعاد کوچک‌تر ظاهر شده‌اند و در ادامه با افزایش تنش اعمالی در حین آزمون کشش، حفرات کوچک ایجاد شده دچار گسیختگی بیشتری شده و به هم پیوسته‌اند که نتیجه این فرایند تولید حفرات با ابعاد بزرگ‌تر و گسیختگی‌های بزرگ‌تر بوده است. در نهایت پس از عبور از استحکام شکست، جدایش و شکست اتفاق افتاده است.

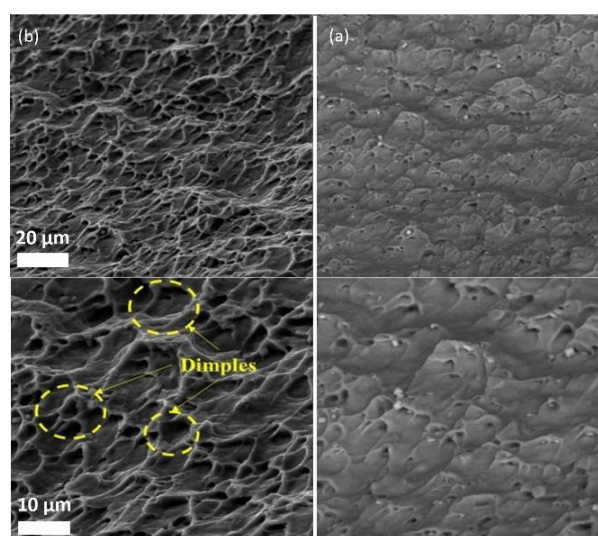


شکل ۹. سطح شکست ورق دولایه Al/Cu پس از آزمون کشش تک محوری در دو بزرگ‌نمایی مختلف: (a) تصویر SEM با الکترون‌های برگشتی و (b) تصویر SEM با الکترون‌های ثانویه

شکل (۱۰) نتایج سطح شکست نمونه دولایه Al/Cu را در فرایند تغییر شکل تدریجی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در این نمونه نیز شکست قسمت آلومینیومی کلیواژ بوده و شکست سمت مسی از نوع شکست نرم می‌باشد. بر اساس گزارش ارائه شده توسط راساد و همکاران [22] با افزایش سرعت تغییر شکل، تنش‌های برشی افزایش پیدا کرده و تولید حفرات و فضای خالی در سطح شکست افزایش پیدا می‌کند. در شکست نرم، حفراتی با رشد در جهت ضخامت تولید

استفاده شد. نتایج این بررسی در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) ارائه شده است.

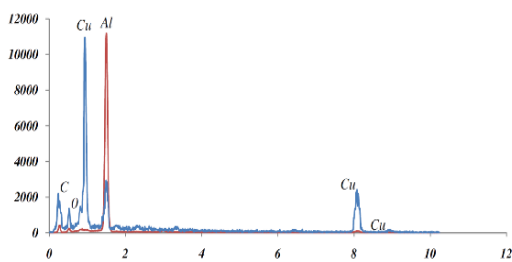
شکل (۸ - a) و (۸ - b) به ترتیب تصویر SEM با الکترون‌های برگشتی و ثانویه سطح شکست نمونه آلومینیومی را پس از آزمون کشش در دو بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد. در تصویر (a) الکترون‌های ثانویه عمق میدان جزئیات سطح شکست و در تصویر (b) الکترون‌های برگشتی فازهای ثانویه یا آلودگی‌های احتمالی سطحی نشان داده می‌شود. حالت شکست برای ورق Al با ساختار FCC، شکست نرم با فرورفتگی‌های عمیق و هم‌محور است. حضور حفره‌ها، کشیدگی و تعدد آن‌ها نشان دهنده شکست نرم است.



شکل ۸. سطح شکست ورق آلومینیوم پس از آزمون کشش تک‌محوری در دو بزرگ‌نمایی مختلف: (a) تصویر SEM با الکترون‌های برگشتی و (b) تصویر SEM با الکترون‌های ثانویه

ارزیابی سطح شکست ورق دولایه آلومینیوم و مس که در شکل (۹) ارائه شده است، نشان می‌دهد که حالت شکست غالب ورق دولایه در قسمت آلومینیوم، شکست ترد است. شکست کلیواژ در سمت آلومینیومی نمونه دولایه کاملاً مشهود است. دلیل تغییر مکانیسم شکست از حالت شکست نرم به شکست ترد می‌تواند به وقوع کار سرد و افزایش کرنش اعمال شده و در نتیجه افزایش تراکم ناب‌جایی‌ها باشد. از طرفی در فصل مشترک اتصال ورق مسی و آلومینیومی ترک‌هایی مشاهده می‌شود که این موضوع خود نشان دهنده رفتار ترد فصل مشترک است. این

ناحیه تیره‌رنگ در شکل (۱۱) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که این ناحیه دارای درصد کمی کربن است که این کربن می‌تواند از آلودگی‌های به دام افتاده حین فرایند تولید، محصولات ناشی از انفجار ضمن جوشکاری، آلودگی‌های ناشی از مراحل آماده‌سازی نمونه و همچنین از ترکیبات هیدروکربنی متصاعد شده از سطح مانت تحت خلأ ناشی شده باشد. به هر حال وجود این ترکیب پرکربن موضعی منجر به کاهش خواص مکانیکی نمونه دولایه نشده است (شکل ۷ - a). با توجه به نسبت پیک‌های عناصر در شکل (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت ترکیبات بین‌فلزی CuAl و Cu_9Al_4 در فصل مشترک تشکیل شده‌اند. افزایش چشم‌گیر خواص مکانیکی کامپوزیت دولایه را می‌توان به حضور این ترکیب‌های بین‌فلزی به ویژه Cu_9Al_4 که دارای سختی و استحکام بسیار بالایی است، نسبت داد [23].

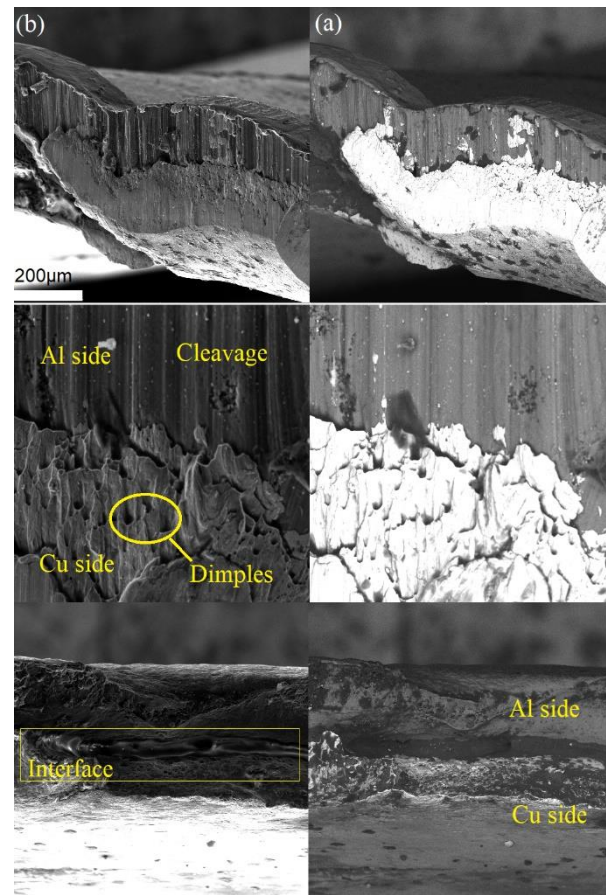


شکل ۱۱ نتایج آنالیز عنصری منطقه تیره‌رنگ در سطح مقطع نمونه Al/Cu

نقشه توزیع عنصری (X-Ray MAP)

به منظور بررسی توزیع عناصر در ناحیه اتصال و هر دو سمت نمونه دولایه از آنالیز عنصری MAP استفاده شده است. نتایج این بررسی در شکل (۱۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این شکل مشاهده می‌شود که در فصل مشترک اتصال دو فلز مس و آلومینیوم به یکدیگر هیچ گونه ناخالصی دیگر مشاهده نشده است که این خود نشان دهنده بهبود اتصال میان این دو فلز است. از طرفی مشاهده می‌شود که درهم‌تنیدگی مکانیکی در حین فرایند تولید در میان دو لایه روی داده و اتصال این دو ورق به صورت مکانیکی اتفاق افتاده است.

شده و تعداد گودی‌های بیشتری در این نوع از شکست تشکیل می‌گردد.



شکل ۱۰ ریزساختار شکست نمونه دولایه Al/Cu پس از فرایند تغییر شکل تدریجی: (a) تصویر SEM با الکترون‌های برگشتی و (b) تصویر SEM با الکترون‌های ثانویه

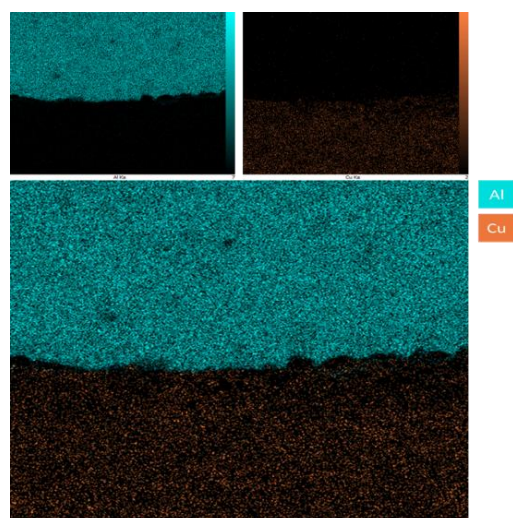
در نقاط محدودی از سطح مقطع شکست در شکل (۱۰)، یک ناحیه تیره‌رنگ نیز مشاهده می‌شود. این ناحیه تیره‌رنگ می‌تواند یک ترکیب بین‌فلزی بین آلومینیوم و مس باشد. حضور چنین ترکیب‌هایی در ریزساختار سطح مقطع ممکن است خواص مکانیکی ناحیه اتصال را تحت تأثیر قرار دهد و در برخی موارد ممکن است منجر به تضعیف خواص مکانیکی شود. اگر این لایه بین‌فلزی به صورت پیوسته باشد، به دلیل تردی این ترکیبات بین‌فلزی ممکن است رشد و اشاعه ترک در فصل مشترک به سرعت صورت بگیرد و در نتیجه مقاومت نمونه در برابر اشاعه ترک کاهش پیدا کند. به منظور شناسایی این ناحیه تیره‌رنگ از آنالیز EDS نقطه‌ای استفاده شد و نتایج آنالیز نقطه‌ای حاصل از

چالش برانگیز بود.

ورق دولایه Al/Cu خواص مکانیکی بهتری نسبت به ورق تک لایه دارد. بررسی های SEM و آنالیز MAP تأیید کردند که اتصال دارای کیفیت بالایی است، اما مستعد ترک خوردگی است. نتایج این پژوهش به بهینه سازی فرایند تولید و اتصال فلزات در صنایع مختلف کمک می کند و زمینه را برای تحقیقات بیشتر در جهت بهبود خواص مکانیکی این ورق ها فراهم می سازد.

واژه نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
شکست ترد	brittle fracture	واشکنی ترد
شکست کلیواژ	cleavage fracture	واشکنی شکافی
شکست نرم	ductile fracture	واشکنی نرم
گودی	dimple	
تراکم نابه جایی	dislocation density	چگالی نابه جایی
ازدیاد طول	elongation	ازدیاد طول کشامد
جوشکاری انفجاری	explosive welding	
سطح شکست	fracture surface	سطح واشکنی
کرنش شکست	fracture strain	کرنش واشکنی
استحکام شکست	fracture strength	تاب شکست
شکل پذیری	formability	
شکل دهی تدریجی	incremental forming	
کرنش پلاستیک	plastic strain	کرنش مومسان
آزمون کوانتومتري	Quantometer Analysis	تحلیل کوانتومتري
استحکام تسلیم	yield strength	تاب تسلیم



شکل ۱۲ نتایج آنالیز عنصری MAP برای نمونه دولایه Al/Cu

نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی رفتار مکانیکی و ریزساختار ورق دولایه Al/Cu تولید شده به روش جوشکاری انفجاری پرداخته است. تحلیل آزمون کشش نشان داد که نمونه دولایه در مقایسه با آلومینیوم خالص، دارای استحکام شکست و استحکام تسلیم بالاتری است، اما به دلیل حضور ترکیبات بین فلزی، شکست آن ترد رخ داده است. در مقابل، ورق آلومینیوم شکست نرم را نشان داد. در مقایسه عددی، استحکام شکست ورق دولایه برابر با ۳۱۷MPa و استحکام تسلیم آن ۲۹۳MPa اندازه گیری شد؛ در حالی که این مقادیر برای ورق آلومینیوم به ترتیب ۱۸۶MPa و ۱۵۳MPa بود که به ترتیب ۷۰٪ و ۹۱٪ افزایش را نشان می دهد. همچنین ازدیاد طول کل ورق Al/Cu معادل ۵/۸٪ و برای آلومینیوم برابر با ۷/۵٪ بود که بیانگر کاهش ۲۲/۶٪ در قابلیت تغییر شکل پلاستیک است.

در تصاویر SEM سطح شکست، مشاهده شد که در ناحیه اتصال آلومینیوم و مس، ترک هایی وجود دارد که نشان دهنده تأثیر ترکیبات بین فلزی بر کاهش شکل پذیری نمونه دولایه است. همچنین، بررسی آنالیز عنصری MAP نشان داد که فصل مشترک اتصال فاقد ناخالصی قابل توجهی بوده است که کیفیت اتصال مکانیکی مطلوب را تأیید می کند.

آزمون متالوگرافی نشان داد که پیداکردن محلول اچ مناسب برای هر دو فلز دشوار است و اچ جداگانه مورد نیاز است. پس از اچ مناسب، دانه های کشیده شده در اثر فرایند نورد در هر دو فلز دیده شدند، اما مشاهده جزئیات ساختاری آلومینیوم

تقدیر و تشکر

پژوهشی با شماره قرارداد ۱۴۰۴/۵/۹/۷۰۰۴ استخراج گردیده

است.

این مقاله با حمایت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی از طرح

مراجع

- [1] G. Vignesh et al., "Review on incremental sheetmetal forming process: deformation mechanisms and recent developments," *International Journal of Material Forming*, vol. 18, no. 2, p. 30, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12289-025-01895-7>
- [2] J. R. Duflou et al., "Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 1, pp. 253–256, 2008. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2008.03.030>
- [3] G. Payganeh et al., "Experimental Study and Simulation of Tube Hydroforming Process of Bi-layered Aluminum-Copper with Axial Feeding," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 28, no. 2, pp. 65–84, 2017. <https://doi.org/10.22067/fum-mech.v28i2.48455>
- [4] M. Honarpisheh and A. Gheysarian, "An Experimental Study on the process parameters of Incremental Forming of Explosively-Welded Al/Cu Bimetal," *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, vol. 7, no. 1, pp. 73–83, 2017. <https://doi.org/10.22061/jcarme.2017.646>
- [5] A. Zahedi Dizajyekan, "Investigation of Fracture Mechanism in Single Point Incremental Forming of AA5052 Aluminum Alloy Using the Bao-Wierzbicki Damage Model," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 4, pp. 63–76, 2023. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81834.1180>
- [6] A. Gheysarian and M. Honarpisheh, "Process Parameters Optimization of the Explosive-Welded Al/Cu Bimetal in the Incremental Sheet Metal Forming Process," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 43, no. 1, pp. 945–956, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0205-6>
- [7] A. Alaie et al., "Investigation of forming limit diagram and mechanical properties of the bimetallic Al/Cu composite sheet at different temperatures which fabricated by explosive welding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 235, no. 1–2, pp. 73–84, 2021. <https://doi.org/10.1177/0954405420949227>
- [8] P. Tayebi et al., "Experimental and Numerical Investigation of Forming Limit Diagrams during Single Point Incremental Forming for Al/Cu Bimetallic Sheets," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 2, p. 214, 2024. <https://doi.org/10.3390/met14020214>
- [9] M. Darvishi et al., "Effects of equal channel angular rolling process on the mechanical properties of Al-Cu two-layer sheets: experimental and numerical approaches," *Engineering Research Express*, vol. 5, no. 3, p. 035023, 2023. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ace6f5>
- [10] G. H. S. F. L. Carvalho et al., "Friction stir welding and explosive welding of aluminum/copper: process analysis," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 34, no. 11, pp. 1243–1250, 2019. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1644452>

- [11] G. H. S. F. L. Carvalho et al., "Weldability of aluminium-copper in explosive welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, no. 5–8, pp. 3211–3221, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03841-9>
- [12] L. Hanliang et al., "Interface microstructure morphology and formation evolution mechanism of Al-1060/Cu-T2 composites fabricated by explosive welding method," *Compos Interfaces*, vol. 29, no. 5, pp. 465–485, 2022. <https://doi.org/10.1080/09276440.2021.1971883>
- [13] A. Zahedi Dizajyekan et al., "Fracture investigation in single point incremental forming of the Al/Cu laminated sheets using coupled damage plasticity model," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 43, pp. 242–259, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.04.010>
- [14] A. Zahedi Dizaj Yekan et al., "Failure Analysis in Single-Point Incremental Forming of Bilayer Sheet Using the Ductile Fracture Criterion," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 1543–1554, 2020.
- [15] E04 Committee, "Practice for Microetching Metals and Alloys," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007. <https://doi.org/10.1520/E0407-07R15E01>
- [16] P. Schmalen et al., "Metallographic Studies of Dissimilar Al-Cu Laser-Welded Joints Using Various Etchants," *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 8, no. 1, pp. 3–11, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13632-018-0501-y>
- [17] D. PARK and H. KIM, "Electrochemical Etching of Aluminum through Porous Alumina," *Analytical Sciences/Supplements*, vol. 17asia, pp. a73–a76, 2001. <https://doi.org/10.14891/analscisp.17asia.0.a73.0>
- [18] L. Gao et al., "Microstructural characterization of aluminum alloys using Weck's reagent, part I: Applications," *Mater Charact*, vol. 107, pp. 426–433, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2015.01.005>
- [19] A. Zahedi et al., "Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 153–154, pp. 341–358, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2019.02.002>
- [20] F. a. Marandi et al., "An Experimental, Analytical, and Numerical Investigation of Hydraulic Bulge Test in Two-Layer Al-Cu Sheets," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 139, no. 3, p. 31005, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4034717>
- [21] H. Talebi-Ghadikolaee et al., "Formability Study in Roll Forming Process: Insights into the Influence of Process Parameters on Damage Distribution," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 115–128, 2024. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.84727.1207>
- [22] M. Arun Prasad and C. Sathiya Narayanan, "Experimental analysis on formability of Cupro-Nickel (90/10 Cu-Ni) during single point incremental forming process," *Mater Today Proceeding*, vol. 87, pp. 356–366, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.444>
- [23] M. H. M. Kouters et al., "Characterization of intermetallic compounds in Cu-Al ball bonds: Mechanical properties, interface delamination and thermal conductivity," *Microelectronics Reliability*, vol. 53, no. 8, pp. 1068–1075, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.02.020>

CONTENTS

Thermodynamic Evaluation of a Biomass-Based Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) System with a High-Performance Absorption Chiller and Hot-Box for Building Application	Arash Kalantari, Milad Mehrpooya, Alireza Pourmand, Majid Soltani	1
Investigation of the Hydrogen Increment to Natural Gas on Combustion Characteristic: Numerical Simulation	Ebrahim Afshar, Mahdiye Haratin Aval, Nabi Jahantigh	27
Analysis of Magneto Hydrodynamic Flow with Wall Injection Using Fractional Derivative	Mohammad Tolami, Akbar Nazari- Golshan Seyed Salman Nourazar	43
Force and Stress Analysis of the Pin of an Induction Furnace Pusher: The Effect of Radial and Axial Clearance between the Involved Members and the Length of the Pin Support	Mohamad Sadegh Mirjalili Mohammad Jafari Gelooyak Mohsen Soltani	65
Numerical Simulation of Magnetic Drug Targeting Efficiency in Cerebral Arteries of Diabetic Patients Based on CT Image-Based Geometry Reconstruction	Mohammad Ali Gholipour Shahraki, Behzad Ghasemi, Afrasiyab Raisi, Morteza Bayareh	83
Evaluation of the Human Brain Mechanical Response During an Impact with a Golf Ball	Keyvan Varmazyari, Akbar Allahverdizadeh, Farid Vakili-Tahami, Pezhman Namashiri	97
The Analysis of Fracture Phenomenon of the Deformed Aluminum- Copper Bimetallic Sheet in the Single Point Incremental Forming	Ali Zahedi, Zahra Sadat Amini Seyed Mohammad Arab	121



Ferdowsi University of Mashhad

JOURNAL OF APPLIED AND COMPUTATIONAL SCIENCES IN MECHANICS

ISSN: 2008-918X

Editor- in-Chief: Dr. Mehran Kadkhodayan

General Director: Dr. Hamid Niazmand

Concessionaire: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Dr. Akbar Afaghi Khatibi	Associate Professor	RMIT University, Australia
Dr. Kazem Abhary	Associate Professor	University of South Australia, Australia
Dr. Aliakbar Akbarzadeh	Professor	RMIT University, Australia
Dr. Hamed Haddad Khodaparast	Associate Professor	Swansea University, UK
Dr. Masoud Boroomand	Professor	Amirkabir University of Technology
Dr. S.Mohammad Reza Khalili	Professor	K.N. Toosi University of Technology
Dr. Ehsan Roohi	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Mahmoud Shariati	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Ebrahim Shirani	Professor	Isfahan University of Technology
Dr. Masoud Tahani	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Mohammad Reza Kazempour Mofrad	Professor	University of California, United States
Dr. Mehran Kadkhodayan	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Hamid Moeenfar	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Behdad Moghtaderi	Professor	University of Newcastle, Australia
Dr. Mohammad Reza Mahpeykar	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Simin Nasser	Professor	Kennesaw State University
Dr. Hamid Niazmand	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Mohammad Jonaidi	Assistant Professor	Kennesaw State University
Dr. Mohammad-Reza Pendar	Postdoctoral Fellow	University of Victoria
Dr. S. Mahmood Mousavi	Postdoctoral Fellow	University of Texas at Austin

Text Editor: E. Dehghan

Executive Director: T. Hooshmand

Typesetting: A. Noie

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics
Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

P. O. Box: 91775-1111, Mashhad, I.R. IRAN

Tel: +98 51 38806024

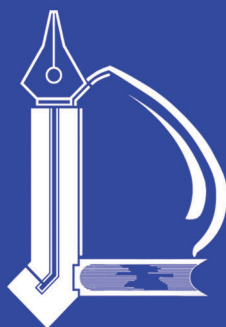
Fax: +98 51 38763301

Email: ejour@um.ac.ir

Web site: <http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir>

Indexed in: ISC, SID, Magiran, EBSCO, DOAJ

ISSN 2008 - 918X



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of
Applied and
Computational Sciences
in Mechanics

Serial No. 44

Vol. 38, No.2
Summer2026

Thermodynamic Evaluation of a Biomass-Based Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) System with a High-Performance Absorption Chiller and Hot-Box for Building Application	Arash Kalantari, Milad Mehrpooya Alireza Pourmand Majid Soltani	1
Investigation of the Hydrogen Increment to Natural Gas on Combustion Characteristic: Numerical Simulation	Ebrahim Afshar Mahdiye Haratin Aval Nabi Jahantigh	27
Analysis of Magneto Hydrodynamic Flow with Wall Injection Using Fractional Derivative	Mohammad Tolami, Akbar Nazari-Golshan Seyed Salman Nourazar	43
Force and Stress Analysis of the Pin of an Induction Furnace Pusher: The Effect of Radial and Axial Clearance between the Involved Members and the Length of the Pin Support	Mohamad Sadegh Mirjalili Mohammad Jafari Gelooyak Mohsen Soltani	65
Numerical Simulation of Magnetic Drug Targeting Efficiency in Cerebral Arteries of Diabetic Patients Based on CT Image-Based Geometry Reconstruction	Mohammad Ali Gholipour Shahraki, Behzad Ghasemi Afrasiyab Raisi Morteza Bayareh	83
Evaluation of the Human Brain Mechanical Response During an Impact with a Golf Ball	Keyvan Varmazyari, Akbar Allahverdzadeh Farid Vakili-Tahami Pezhman Namashiri	97
The Analysis of Fracture Phenomenon of the Deformed Aluminum- Copper Bimetallic Sheet in the Single Point Incremental Forming	Ali Zahedi, Zahra Sadat Amini Seyed Mohammad Arab	121