

- ۱ مطالعه تجربی، مدل سازی و شناسایی ناحیه تماس
بین دیسک و پدهای ترمز خودرو به کمک المان
لایه نازک

فهمیه نوحی - امین نیکوبین - محمدرضا آشوری

- ۱۵ بررسی عددی و تجربی چقرمگی شکست و مقاومت
به سایش سطوح پوشش داده شده به روش پاشش
حرارتی

مصطفی باران پور - میثم محمدی - افشین ایرانمنش

- ۳۱ بررسی اثر زبری سطح بر ضریب پسا در جریان
حول یک کپسول بازگشتی دوبعدی

سمیرا سورانی - مرتضی بیاره - علیرضا شاطری

- ۴۵ بررسی عددی پیش گرمکن هوا جهت تعیین تشکیل
شبنم در ورق های موجودار برای تعیین سطوح با
امکان خوردگی

حسن محمدی سبینی - حمیدرضا نظیف

- ۶۳ سیستم کمکی برای هدایت افراد دارای اختلالات
بینایی پشت میزهای کار

امیر محمد برسلانی - حمیدرضا محمدی دانیالی
آرمان مردانی

- ۸۳ تعیین زمان بحرانی منیولیشن دو بعدی میکرو نانو
ذرات با استفاده از معادله رگرسیون

معین طاهری - فرشته قانع





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	فهیمة نوحی - امین نیکوبین - محمدرضا آشوری	مطالعه تجربی، مدل سازی و شناسایی ناحیه تماس بین دیسک و پدهای ترمز خودرو به کمک المان لایه نازک
۱۵	مصطفی باران پور - میثم محمدی - افشین ایرانمنش	بررسی عددی و تجربی چقرمگی شکست و مقاومت به سایش سطوح پوشش داده شده به روش پاشش حرارتی
۳۱	سمیرا سورانی - مرتضی بیاره - علیرضا شاطری	بررسی اثر زبری سطح بر ضریب پسا در جریان حول یک کپسول بازگشتی دوبعدی
۴۵	حسن محمدی سبینی - حمیدرضا نظیف	بررسی عددی پیش گرمکن هوا جهت تعیین تشکیل شبنم در ورق های موجدار برای تعیین سطوح با امکان خوردگی
۶۳	امیر محمد برسلانی - حمیدرضا محمدی دانیالی آرمان مردانی	سیستم کمکی برای هدایت افراد دارای اختلالات بینایی پشت میزهای کار
۸۳	معین طاهری - فرشته قانع	تعیین زمان بحرانی منیپولیشن دو بعدی میکرو نانو ذرات با استفاده از معادله رگرسیون



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

Experimental Study, Modeling and Identification of the Contact Interface Between the Disc and Brake Pads with Thin layer element

Research Article

Fahimeh Noohi¹, Amin Nikoobin² , Mohammad Reza Ashory³

 [10.22067/jacsm.2025.91143.1306](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.91143.1306)

Abstract: The brake system is one of the main and important components of a vehicle, and recognizing the contact area between the disc and pads will help to better understand this system and prevent abnormal sounds during braking. In this paper, the goal is to investigate the contact area between the disc and the pads using a thin layer element. First, an experimental study and the finite element modeling of different parts of the structure have been considered. In this model, the contact area between the disc and the pads has been modeled with thin layer elements. Then by using experimental results, the contact parameters between the disc and the pads have been identified and the equivalent contact stiffness by increasing the braking pressure has been considered. Investigations show that by increasing the braking pressure, the contact stiffness has also increased and the accuracy of the presented model for modeling the contact area has been validated using experimental results. The results show that the presented model for modeling the contact area between the disc and the brake pads with a small error compared to the real model is a suitable and sufficiently accurate model and can be applied in various dynamic analyses of the brake system.

Keywords: Brake disc, Contact stiffness, modal analysis, mechanical joints, thin layer element

1- Introduction

Studies on mechanical joints have been conducted from the past until now. In almost all mechanical structures, there is at least one mechanical joint. Despite decades of efforts to model the behavior of structures with joints, it still remains one of the most challenging issues in structural dynamics. Modeling and studying the behavior of mechanical joints has attracted significant attention. Different types of joints exist in mechanical structures, such as welding, soldering, bolts, pins, and nuts. Among mechanical joints, bolted joints are of high importance and have been the subject of many studies on modeling and understanding the contact area in joints. Researchers have

used a combination of linear and torsional springs and a damper to simulate the effects of joint flexibility and have refined the model by minimizing the differences between model predictions and experimental measurement data [1,2].

Furthermore, studies have also focused on structural supports, which are a type of joint in mechanical structures that provide a better understanding of the structure. For example, researchers have examined and modeled the stiffness of structural support in beam-like structures. Additionally, researchers have looked into boundary conditions of a plate supported by an elastic support, proposing a new method for identifying parameters of a constrained rectangular plate supported by an elastic support [3]. The presence of defects such as cracks in structures can also be considered as a type of joint in structures. Researchers have studied cracks as joints in structures and modeled them using linear and torsional springs, providing a new approach to identify the position and severity of cracks in structures [4].

Various joint modeling methods have been used in the studies mentioned, including using generic elements and sets of springs and dampers to model the joint interface. Another modeling approach involves modeling the joint interface using thin-layer elements, where the mechanical properties of the layer represent the joint properties, leading to a good understanding of the contact interface in mechanical joints [5,6].

This article investigates the contact area between the disc and pads in automotive disc brakes, considering the thin layer element in the contact area. The aim is to study and identify the material properties of this layer. The material properties of the layer indicate the contact parameters between the two connected structures. To do this, first, the brake system is simulated, and then experimental study of the brake system at three different braking pressures is conducted. Subsequently, using the

* Manuscript received 2024 December 8, Revised 2025 February 5, Accepted 2025 May 6.

¹ PhD graduate, Modal Analysis Research Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

² Corresponding Author: Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Email: anikoobin@semnan.ac.ir

³ Associate Professor, Modal Analysis Research Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

experimental results, an attempt is made to identify the contact parameters of this model at all three pressures. The results show that the presented model for the contact area in this system has been successful and is capable of modeling this contact well at different braking pressures.

2- Finite Element Modelling

Modeling of this structure has been done in ANSYS finite element software. The purpose is to create an accurate model of the brake system that can be used for various dynamic analyses. The SOLID185 element is used for modeling the brake disc. The material properties of the brake disc are obtained by using experimental modal analysis under free boundary conditions. Next, a simplified model for the knuckle is considered, so that its material properties are similar to the real model and can be a good substitute in terms of inertia and mass. In the next step, the connection between the disc and knuckle is defined with linear springs in three directions. Boundary conditions applied to the simplified model of knuckle are similar to the real boundary conditions in the experimental model.

After that, the modeling of the pads is addressed. The pads are modeled using the SOLID185 element and appropriate material properties. The positions of the pads relative to the disc are designed so that there is a one-millimeter gap between them. In this one-millimeter gap, three-dimensional solid elements are modeled with different material properties from the disc and pads, and their values need to be identified.

For a more detailed examination of the contact area and considering the possibility of asymmetric pressure distribution in this part, the contact area between the disc and pad is divided into three parts with three different material properties defined for them. On the other hand, this area is divided into three sectors, each modeled by the elements with a different elastic modulus. This model has been shown Figure 1. The contact between the thin layer and the disc, as well as the pads, is defined as merging nodes defined between nodes with identical location. Next, by selecting the appropriate mesh size for different parts, the structure is meshed and boundary conditions is applied similar to experimental model. Then, by performing modal analysis on the simulated model, the natural frequencies of the structure are extracted.

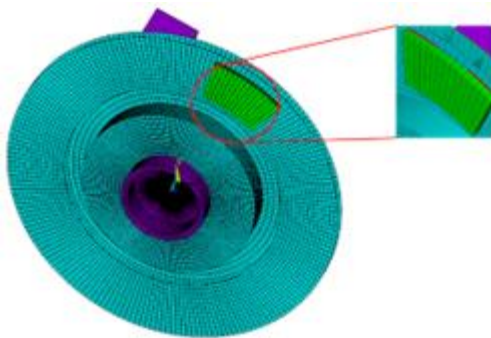


Fig 1. Simulated model with pads and contact area in ANSYS

3- Experimental Modal Test

Investigations and experimental studies have also been conducted on the disc brake system of the vehicle. To this end, various components of the brake system include brake discs, pads, calipers, pistons, and pads are provided. To apply braking pressure to this system, a hydraulic circuit is prepared and by using brake oil in this circuit and connection of the circuit to the caliper, this process takes place. This circuit consists of a brake oil reservoir, a motor, a three-way valve, an accumulator, a pressure gauge, and a manifold. The brake system assembly and circuit embedded in Figure 2 are shown. The structure is tested at three different braking pressures. Initially, pressures of 6bar and then pressures of 9bar and 12bar are applied to the pads, and each time a complete modal hammer test is performed on the structure. By using measuring force and acceleration signals, frequency response functions are calculated. By analyzing these functions, the natural frequencies of the structure are obtained.

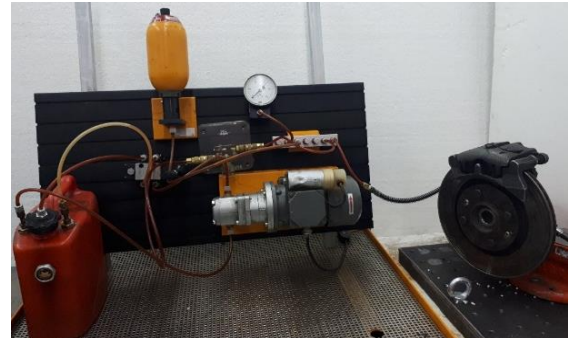


Fig 2. The experimental model and related hydraulic circuit

4- System Identification

To identify and update thin layer simulation model, the optimization toolbox of MATLAB software has been used. The identification process is carried out by using the natural frequencies obtained from experimental modal analysis as input to the problem. Initially, initial guesses for unknown parameters are given, and by calling the finite element model and solving it, the model natural frequencies are compared with test results, and the error between these two frequency vectors defines the objective function of the optimization process.

This process is repeated as necessary until the objective function reaches its minimum value. The updated natural frequencies of the model are closely matched to the test results, and the unknown parameters of the problem, i.e., the elastic modulus values in three sectors, are calculated. This identification process is first performed with the modal test results in the 6bar braking pressure. The same process is repeated for the test results 9bar and 12bar, and in each identification process, the elastic modulus values represent the contact stiffness at each pressure. These results are reported in Table 1 as the natural frequencies obtained from testing and updated simulation model, along with the error between them. Additionally, the identified elastic modulus values in all three stages are presented in Table 2.

The results in all three sectors show the trend of

changes in the elastic modulus of the sector is ascending with increasing pressure. This means that with increasing braking pressure, the elastic modulus of the thin layer, which represents the contact stiffness in the model, increases. The reported error percentages in Table 1 also indicate the accuracy of the model in providing dynamic structural responses.

5- Conclusion

As the results show, by defining the contact area in three sectors with different material properties, not only a more accurate model than the real model was created, but also the model allows for the examination of the distribution of pressure in the contact area. With an increase in braking pressure, the elastic modulus of all three sectors increased. This means that the contact stiffness between the disc and brake pads increased with increasing braking pressure, confirming the accuracy and precision of the simulated finite element model.

Table 1. Test and FE model natural frequencies and error between them

6 bar	Test	FEM	Err (%)
w ₁	375.0	371.6	0.9
w ₂	851.2	854.4	0.38
w ₃	1086.0	1089.0	0.28
w ₄	1298.0	1300.0	0.12
w ₅	1474.0	1436.0	2.6
w ₆	1848.0	1877.0	1.56
9 bar	Test	FEM	Err (%)
w ₁	380.29	372.1	2.2
w ₂	863.56	868.7	0.59
w ₃	1106.9	1118.0	0.97
w ₄	1319.2	1321.0	0.16
w ₅	1519.5	1447.0	4.8
w ₆	1894.0	1883.0	0.56
12 bar	Test	FEM	Err (%)
w ₁	382.51	372.6	2.02
w ₂	866.62	887.1	2.7
w ₃	1147.3	1153.0	0.49
w ₄	1344.5	1339.0	0.41
w ₅	1546.7	1462.0	3.8
w ₆	1904.5	1892.0	0.65

Table 2. Identified values for unknown parameters for all three working pressures

	E ₁ (Pa)	E ₂ (Pa)	E ₃ (Pa)
6 bar	3.938×10 ⁶	3.806×10 ⁸	4.192×10 ⁶
9 bar	9.87×10 ⁶	4.223×10 ⁸	9.778×10 ⁶
12 bar	1.682×10 ⁷	4.899×10 ⁸	1.776×10 ⁷

Therefore, it can be said that the thin layer element model for modeling the contact area between the disc and brake pads is an acceptable model that has been well validated through experimental studies. With validated finite element model presented in this article, many analyses can be implemented, especially in situations where conducting experiments on real structures is not feasible due to component complexity and lack of easy access to the structure.

Reference

- [1] S. Bograd, P. Reuss, A. Schmidt, L. Gaul and M. Mayer, "Modeling the dynamics of mechanical joints," *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 8, p. 2801, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.01.010>
- [2] F. Adel, S. Shokrollahi, "A Review of Bolted Connection Modeling Methods in Vibration Analysis," *Scientific Extension Journal of the Iranian Society of Mechanical Engineers*, vol. 27, no. 120, Pages 34, 2017.
- [3] H. Jalali, F. Noohi, "Boundary Condition Identification of a Clamped Beam in Flexible Support," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 28, no. 2, p. 174, 2017.
- [4] H. Jalali, F. Noohi, "A modal-Energy Based Equivalent Lumped Model for Open Cracks," *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 98, p. 50, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.04.038>
- [5] N. Jamia, H. Jalali, M. I. Friswell, H. H. Khodaparast and J. Taghipour, "Modelling the Effect of Pre-Load in a Lap-Joint by Altering Thin Layer Material Properties," *Journal of Nonlinear Structures & Systems*, vol. 1, p. 211, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77135-5_25
- [6] C. Yue, J. Chen, X. Zheng, C. Wang and H. Liu, "Thin-Layer Element Method for Multi-Stage Rotor Bolt Loosening Identification," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, no. 12, p. 6489, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-1106-9>



مطالعه تجربی، مدل سازی و شناسایی ناحیه تماس بین دیسک و پدهای ترمز خودرو به کمک المان لایه نازک*

مقاله پژوهشی

محمدرضا آشوری^(۳)امین نیکوبین^(۲) فهیمه نوحی^(۱) 10.22067/jacsm.2025.91143.1306

چکیده سیستم ترمز یک از اجزای اصلی و مهم یک خودرو است و شناخت ناحیه تماس بین دیسک و پد کمک شایانی به درک بهتر این سیستم در وضعیت ترمزگیری و ممانعت از صداهای ناہنجار هنگام ترمز خواهد نمود. در این مقاله هدف بررسی ناحیه تماس بین دیسک و پدها با استفاده از المان لایه نازک است. ابتدا به مدل سازی اجزای محدود قسمت های مختلف سازه پرداخته شده است. سپس ناحیه تماس بین دیسک و پدها با المان لایه نازک مدل سازی شده و در ادامه به کمک مطالعات تجربی، به شناسایی پارامترهای تماس بین دیسک و پدها و بررسی میزان سفتی تماس معادل در اثر افزایش فشار ترمزگیری پرداخته شده است. بررسی ها نشان می دهد با افزایش فشار ترمزگیری، سفتی تماس نیز افزایش یافته و دقت مدل ارائه شده برای مدل سازی ناحیه تماس با استفاده از نتایج تجربی معتبر سازی شده است. نتایج نشان می دهد که مدل ارائه شده برای مدل سازی ناحیه تماس بین دیسک و پدها با خطای اندک در مقایسه با مدل واقعی، مدلی مناسب و به اندازه کافی دقیق است و قابلیت کاربرد در انواع تحلیل های دینامیکی سیستم ترمز را داراست.

واژه های کلیدی دیسک ترمز، سفتی تماس، آنالیز مودال، اتصالات مکانیکی، المان لایه نازک.

مقدمه

اهمیت و کاربرد بالایی برخوردار بوده و مطالعات بسیار زیادی بر روی نحوه مدل سازی و همچنین شناخت ناحیه تماس در اتصالات پرداخته شده است [1,2]. برای مثال احمدیان و جلالی [3,4] به شناسایی پارامترهای تماس اتصال لبه ای در سازه های مونتاژ شده پرداختند. ناحیه تماس با استفاده از ترکیبی از فنرهای خطی و غیرخطی و یک دمپر برای شبیه سازی اثرات میرایی اتصال و مدل جنریک (Generic) مدل شده است. پارامترهای مدل، یعنی ثابت های فنر و ضریب دمپر، تابع تنش های معمولی و مماسی در سطح مشترک هستند و با به حداقل رساندن تفاوت بین پیش بینی های مدل و داده های اندازه گیری تجربی شناسایی می شوند. جامیا و همکاران [5] به تحلیل دینامیکی اتصالات پیچی

از گذشته تاکنون مطالعات بسیار زیادی بر روی اتصالات مکانیکی انجام شده است. تقریباً در تمام سازه های مکانیکی عملی، حداقل یک اتصال مکانیکی وجود دارد. پس از دهه ها تلاش برای مدل سازی رفتار سازه های دارای اتصالات، هنوز یکی از پیچیده ترین مسائل در دینامیک سازه است. مدل سازی و بررسی رفتار اتصالات مکانیکی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این تلاش ها در طول دهه های اخیر به دلیل پیشرفت در ابزارهای محاسباتی و تجهیزات تجربی تشدید شده است. در سازه های مکانیکی انواع اتصالات وجود دارد، نظیر جوش، لحیم، پرچ، پین و پیچ. در بین این اتصالات، اتصال پیچ و مهره ای از

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۹/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۲/۱۶ می باشد.

(۱) فارغ التحصیل دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی آنالیز مودال، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

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

(۳) دانشیار، آزمایشگاه تحقیقاتی آنالیز مودال، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

پرداختند. در این مقاله، به شبیه‌سازی و شناسایی المان محدود دو فلنج پیچ‌دار پرداخته شده که رفتار غیرخطی اتصال فلنج پیچ‌دار ناشی اصطکاک در رابط‌های تماس را در نظر گرفته است.

در زمینه این مطالعات، تکیه‌گاه نیز نوعی اتصال در سازه‌های مکانیکی می‌باشد که با شناخت این نوع اتصال می‌توان درک بهتری از سازه داشت. برای مثال جلالی و نوحی [6] به بررسی و مدل‌سازی سفتی تکیه‌گاه در سازه تیر مانند پرداختند. در این مقاله تکیه‌گاه با دو فنر خطی و پیچشی مدل‌سازی شده و مقادیر سختی این فنرها با استفاده نتایج مطالعات تجربی بر روی سازه تیر یک سر گیردار و روش‌های شناسایی به کمک حساسیت پارامترهای مودال حاصل شده اند. احمدیان و همکاران [7] به شناسایی شرایط مرزی یک ورق با تکیه‌گاه الاستیک پرداختند. تکیه‌گاه الاستیک به کمک فنرها و دمپر مدل‌سازی شده است. آنها روش جدیدی برای شناسایی پارامتر یک صفحه مستطیلی مقید شده توسط تکیه‌گاه الاستیک پیشنهاد نمودند. همچنین آسیب‌هایی مانند ترک در سازه نیز می‌تواند نوعی اتصال در سازه در نظر گرفته شود. جلالی و نوحی [8] با در نظر گرفتن ترک به عنوان اتصال در سازه و مدل‌سازی آن با فنرهای خطی و پیچشی، به مطالعه و بررسی ترک‌های تکی و چندگانه در سازه تیر مانند پرداخته و به رویکرد جدیدی برای شناسایی موقعیت و شدت ترک در سازه‌ها دست یافتند.

در مطالعاتی که پیش از این اشاره شد، مدل‌سازی تماس با استفاده از المان جنزیک و مجموعه‌های فنر و دمپر صورت گرفته است. یکی دیگر از روش‌های مدل‌سازی اتصالات، مدل‌سازی ناحیه تماس با المان لایه نازک است که خواص مواد مکانیکی این لایه نماینده خواص ناحیه تماس می‌باشد و با بررسی و شناسایی خواص مواد این لایه می‌توان به شناخت خوبی از ناحیه تماس در اتصالات مکانیکی رسید. در این زمینه، جامیا و همکاران [9] به بررسی یک اتصال لبه پیچ شده با استفاده از یک مدل سه بعدی دقیق و یک مدل تیر معادل دو بعدی پرداختند. در هر دو مدل، یک رویکرد المان لایه نازک اصلاح شده برای مدل‌سازی رابط تماس مشترک استفاده می‌شود که در آن خواص مواد لایه نازک بر روی رابط تماس متغیر در نظر گرفته می‌شود. شناسایی پارامترهای مدل با استفاده از ویژگی‌های مودال تجربی به‌دست آمده از آزمایش مودال انجام شده است. یائو و همکاران [10] یک روش مدل‌سازی دینامیکی جدید به نام روش المان لایه

نازک بهبود یافته برای استفاده در اتصالات پیچ‌دار موتور هواگرد پیشنهاد نمودند. این روش برای ساختار اتصالات پیچی شبیه‌سازی شده اعمال شده و با نتایج تجربی به منظور تأیید روش پیشنهادی مقایسه می‌شود. آنها اصول مدل‌سازی این روش جدید را مطالعه نموده و پارامترهای مواد المان لایه نازک پارتیشن بندی شده را بر اساس تکنیک سختی اتصالات پیچ‌دار و تئوری تماس مربوطه تعیین نمودند. عبدالرانی و همکاران [11] به بررسی رفتار دینامیکی سازه پیچ‌دار با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود و روش به‌روزرسانی پرداختند. در مدل اجزای محدود، از المان لایه نازک برای نشان دادن سطح تماس سازه پیچ دار استفاده شده است. سپس از روش به‌روزرسانی مدل برای به‌روزرسانی مدل FE سازه پیچ شده بر اساس نتایج تحلیل مودال تجربی استفاده می‌شود. ارلیش و همکاران [12] یک تکنیک کاهش مدل برای رویکرد مدل‌سازی المان لایه نازک و یک برنامه کاربردی برای به‌روزرسانی مدل ارائه نمودند. این کاهش بر اساس تجزیه و تحلیل حساسیت مقادیر ویژه است و از فرمول ساده میرایی مشترک در قالب میرایی هیسترتیک ثابت بهره می‌برد. تکنیک ارائه شده به طور قابل توجهی هزینه محاسباتی را برای محاسبه مجدد مقادیر ویژه پس از تغییر پارامترهای مشترک کاهش می‌دهد. قزوینی و همکاران [13] به به‌روزرسانی مدل المان محدود اتصالات پیچ و مهره هیبریدی کامپوزیت/آلومینیوم با استفاده از یک مدل اتصال جدید به نام "مدل لایه نازک درجه بندی شده (Thin Graded Layer Model)" پرداختند. مدل تماس صفحه دو بعدی ارائه شده، برای بررسی رفتار الاستیک خطی رابط تماس تحت پیش بارهای مختلف پیچ و شرایط مرزی بکار گرفته شده است. این مدل قابلیت پیش بینی رفتار مدل تجربی را داشته و می‌تواند برای تحلیل مودال رابط‌های اتصال هیبریدی استفاده شود. لیو و همکاران [14] به مدل‌سازی و تحلیل ارتعاشات غیرخطی صفحه نازک پیچ شده بر اساس روش مواد مجازی پرداختند. این مدل مشابه مدل لایه نازک بوده که برای شبیه‌سازی دو مشخصه توزیع غیریکنواخت فشار و خواص غیرخطی سختی و میرایی متغیر در اتصالات پیچ‌دار استفاده شده است. سه حالت توزیع پارامتر فشار غیر یکنواخت از مواد مجازی، خطی، سهمی و سینوسی، برای بررسی اثرات آنها بر دقت مدل‌سازی ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که وقتی مدول ماده مجازی توزیع غیریکنواخت دارد، دقت محاسبه مشخصه‌های سیستم از جمله

ناحیه تماس بین دیسک و پد ترمز و شناسایی پارامترهای اتصال تاثیر بسیار زیادی بر درک بهتر سیستم ترمز، ایجاد ایمنی بیشتر و جلوگیری از ناپایداری دیسک و بروز صداهای ناهنجار از سیستم ترمز در حین ترمزگیری و در نهایت بهبود عملکرد این سیستم خواهد شد. همانطور که گفته شد، تماس بین دیسک و پدهای ترمز در اثر فشار ترمزگیری نیز نوعی اتصال محسوب می شود که می توان با روش های موجود برای مدل سازی اتصالات، آنرا مدل سازی و مطالعه نمود. مدل های واقعی مانند سیستم ترمز خودرو در مقایسه با مدل های ساده دارای پیچیدگی زیادی بوده که انجام حل های دقیق برای آنها بسیار مشکل و گاهی ناممکن است. بنابراین مدل های شبیه سازی برای بررسی و تحلیل رفتار مدل های واقعی کارآمدتر هستند. بنابراین به دلیل پیچیدگی سیستم ترمز و ضرورت شناخت ناحیه اتصال در این مدل، از مدل سازی اجزای محدود برای مدل سازی کل سیستم و همچنین مدل لایه نازک برای مدل سازی ناحیه تماس بین دیسک و پدها استفاده شده است.

همانطور که بیان شد، در این مقاله به بررسی ناحیه تماس بین دیسک و پدها در ترمز دیسکی خودرو با در نظر گرفتن المان لایه نازک در ناحیه تماس پرداخته شده است. هدف بررسی و شناسایی خواص مواد این لایه است. همانطور که قبلا در مورد این مدل توضیح داده شد، خواص مواد این لایه بیانگر پارامترهای اتصال بین دو سازه متصل است. برای این کار، ابتدا شبیه سازی سیستم ترمز در نرم افزار اجزای محدود انجام شده و در ادامه به مطالعه تجربی سیستم ترمز در سه فشار مختلف ترمزگیری پرداخته شده است. در ادامه با استفاده از نتایج تجربی تلاش شده تا به شناسایی پارامترهای تماس این مدل در هر سه فشار پرداخته شود. نتایج نشان می دهد که مدل ارائه شده برای ناحیه تماس موجود در این سیستم موفق بوده و به خوبی توانایی مدل سازی این تماس را در فشارهای مختلف ترمزگیری دارد.

مدل سازی اجزای محدود

مدل سازی سازه در نرم افزار اجزای محدود ANSYS انجام شده است. هدف از این بخش ایجاد یک مدل دقیق از سیستم ترمز است که می توان از آن برای اعمال انواع تحلیل های دینامیکی استفاده نمود. برای مدل سازی دیسک ترمز از المان SOLID185 استفاده می شود. خواص مواد دیسک ترمز با استفاده از آزمایش

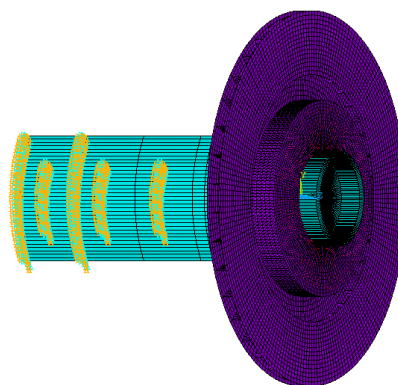
فرکانس های طبیعی در مقایسه با توزیع یکنواخت به وضوح بهبود می یابد. یوو و همکاران [15] روش المان لایه نازک را برای شناسایی شل شدن چند مرحله ای پیچ روتور مورد استفاده قرار دادند. به منظور حل مشکل شبیه سازی دشوار ساختار اتصال پیچی روتورها، این مقاله یک روش المان لایه نازک بهبود یافته را پیشنهاد می کند و آن را در شبیه سازی رابط اتصال پیچ اعمال می کند. مطالعات تجربی و مقایسه نتایج نشان می دهد که روش ارائه شده دارای دقت و کارایی بالایی در مطالعه شبیه سازی اتصالات پیچ روتور است. ون و گائو [16] مدل سازی دینامیکی پارامترهای المان لایه نازک در ناحیه اتصال پیچی یک کوپلینگ دیافراگمی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مدل سازی معادل المان لایه نازک برای در نظر گرفتن توزیع تنش پیش بار پیچ در مناطق اتصال تقسیم شده انجام دادند. به منظور محاسبه دقیق پارامترهای مواد هر منطقه و بهبود دقت این مدل، از روش شناسایی پارامتر بر اساس الگوریتم ژنتیک با تابع هدف مرتبط با فرکانس های آزمایش های مودال و شبیه سازی ها ساخته می شود. نتایج نشان می دهد که از میان پارامترهای ماده در هر ناحیه از مدل المان لایه نازک، مدول الاستیسیته تأثیر بیشتری بر دقت مدل داشته و نسبت پواسون و چگالی تأثیر کمتری بر مشخصه های دینامیکی مدل دارند.

در سازه های مکانیکی مونتاژ شده، گاهی تماس بین دو سازه با استفاده از اتصالات مکانیکی صورت نمی گیرد و ممکن است دو سازه در اثر فشار با یکدیگر دچار تماس شده و اتصال جدیدی در سازه ایجاد کنند. برای مثال سازه هایی که در اثر فشار در یکدیگر جاسازی می شوند و یا سطوحی که در اثر فشار (موقت یا دائم) به یکدیگر متصل می شوند مانند ناحیه تماس بین دیسک و پد ترمز در خودرو. زمانی که خودرو در حرکت است، تماسی بین دیسک و پدها وجود ندارد. به محض اعمال ترمزگیری توسط راننده، پدهای ترمز با دیسک در تماس قرار گرفته و موجب افت سرعت چرخش دیسک و در نهایت ایست خودرو می شود. در حین ترمزگیری، ناحیه تماس بین دیسک و پد ترمز تبدیل به اتصال جدیدی در سیستم ترمز خودرو شده که به طور کامل دینامیک این سیستم را تحت تاثیر قرار می دهد. سیستم ترمز یکی از اجزای اصلی و مهم یک خودرو است. تاکنون تلاش های بسیاری برای بهبود عملکرد این سیستم انجام شده است. پایداری دیسک ترمز از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین شناخت

در ادامه به مدل‌سازی پدها پرداخته شده است. با در نظر گرفتن خواص مواد متناسب و المان SOLID185 پدها مدل می‌شوند. موقعیت پدها نسبت به دیسک به نحوی طراحی شده که فاصله بین آنها یک میلی‌متر باشد. در این فاصله یک میلی‌متری المان‌های صلب سه بعدی مدل‌سازی می‌شوند که دارای خواص مواد متفاوت از دیسک و پدها بوده و مقادیرشان باید مورد شناسایی قرار گیرد. بنابراین لایه نازک تعریف شده در این ناحیه دارای ضخامت یک میلی‌متر است. مدل‌سازی ناحیه تماس دو بار انجام شده است. یک بار لایه نازک به صورت یکپارچه تعریف شده و تنها پارامتر متغیر در این مدل، مدول الاستیک است. در مرحله دوم، برای بررسی دقیقتر ناحیه تماس و در نظر گرفتن احتمال توزیع نامتقارن در این قسمت، ناحیه تماس بین دیسک و پد به سه قسمت تقسیم شده و سه خواص مواد مختلف برای آنها تعریف می‌گردد. این کار به این دلیل انجام شده که ممکن است تماس بین پدها و دیسک متقارن نبوده و فشار یک قسمت نسبت به سایر قسمت‌ها متفاوت باشد. بنابراین این ناحیه به سه قطاع تقسیم شده که هر قطاع با یک المان با مدول الاستیک متفاوت مدل‌سازی شده است. تصویر مدل شبیه سازی شده در شکل (۲-الف) نشان داده است. برای نمایش بهتر ناحیه تماس با سه المان متفاوت، از نمایش پد جلویی خودداری به عمل آمده و تصویر ناحیه تماس مجدداً در قسمت (ب) شکل (۲) ارائه شده است. تماس بین لایه نازک با دیسک و همینطور پدها در نرم‌افزار به صورت ادغام گره‌های متناظر تعریف شده است.

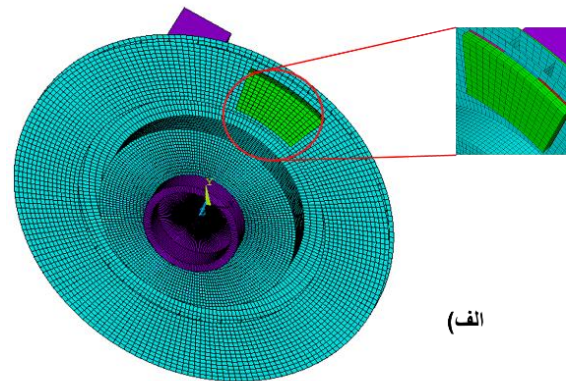
در ادامه با انتخاب اندازه مناسب برای مش بندی قسمت‌های مختلف، سازه مش بندی شده و شرایط مرزی مشابه شرایط مرزی اعمال شده به سازه در آزمایشگاه به مدل اعمال می‌گردد. به این صورت که مدل ساده شده سگدست به نحوی که قبلاً توضیح داده شد، گیردار شده و همچنین طرف دیگر پدها که با دیسک در تماس نیست، مقید شده است. مدل‌سازی و مش بندی دیسک به عنوان اثرگذارترین عضو این مجموعه، به صورت دقیق‌تر انجام شده است. سازه مش برای دیسک به دلیل دایره بودن مختصات ثابت نیست، بنابراین برای بررسی همگرایی مش در این مدل، متوسط سازه مش برای دیسک به عنوان متغیر تعریف شده است. با تغییر این پارامتر از یک سانتیمتر تا یک میلی‌متر، تغییرات اولین فرکانس طبیعی به عنوان پاسخ سیستم مورد بررسی

مودال تجربی دیسک با شرایط مرزی آزاد به دست می‌آید. به این صورت که ابتدا دیسک با شرایط مرزی آزاد مورد مطالعه تجربی قرار گرفت. مدل دیسک ترمز به طور همزمان شبیه سازی شده و این مدل با استفاده از نتایج تجربی در یک فرآیند شناسایی مورد به‌روزرسانی قرار گرفت. به عنوان نتیجه، خواص مواد دیسک به طور دقیق شناسایی گردید. این مقادیر برای چگالی و مدول الاستیک دیسک به ترتیب $\rho = 7884 \text{ kg/m}^3$ و $E = 1.9388 \times 10^5 \text{ MPa}$ به دست آمده است. در ادامه یک مدل ساده شده برای سگدست (Knuckle) در نظر گرفته شده است، به نحوی که خواص مواد آن مشابه مدل واقعی (چدن) بوده و بتواند از نقطه نظر ممان اینرسی و جرم، جایگزین خوبی از سگدست واقعی باشد. در مرحله بعد، اتصال بین دیسک و سگدست با فنرهای خطی در سه جهت [17] تعریف می‌شود. قبل از مدل‌سازی پدها، با استفاده از نتایج آزمایش مودال آزمایشی بر روی مجموعه دیسک، پولی و سگدست و انجام یک فرآیند به‌روزرسانی، سفتی فنرهای نشان‌دهنده سطح تماس بین دیسک و سگدست شناسایی می‌شوند. مقادیر شناسایی شده برای این پارامترها برابر با $k_x = 1.829 \times 10^7 \text{ N/m}$ و $k_y = 1.671 \times 10^7 \text{ N/m}$ و $k_z = 2.503 \times 10^7 \text{ N/m}$ است. شرایط مرزی اعمال شده بر روی مدل سگدست مشابه شرایط مرزی موجود در مدل تجربی است. همانطور که در قسمت مطالعه تجربی توضیح داده خواهد شد، سگدست از یک بازو در گیره بسته شده، بنابراین در مدل ساده شبیه سازی شده سگدست، موقعیت‌های متناظر به صورت گیردار تعریف شده و در شکل (۱) نشان داده شده است.

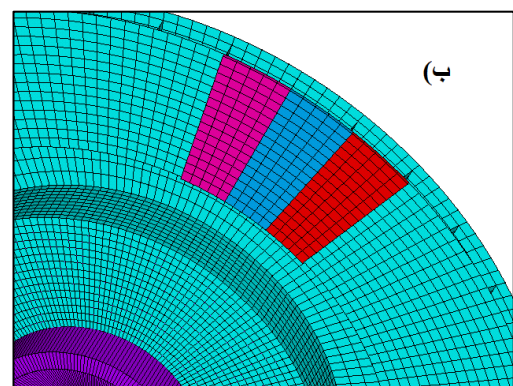


شکل ۱ مدل دیسک و سگدست شبیه سازی شده به همراه شرایط مرزی اعمال شده

قرار گرفته و در شکل (۳) نشان داده شده است.



(الف)

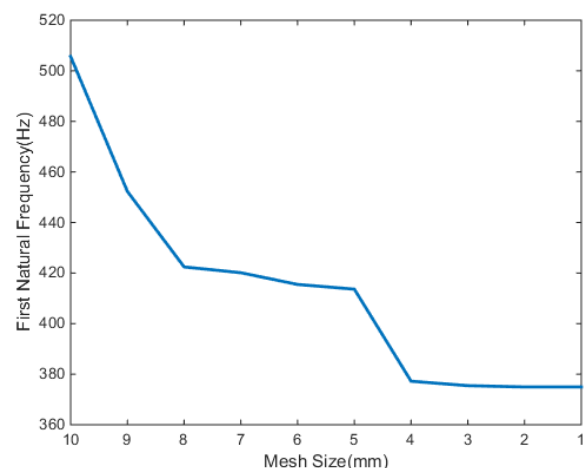


(ب)

شکل ۲ (الف) مدل شبیه سازی شده نرم افزار اجزای محدود ANSYS به همراه پدها، (ب) تصویر ناحیه تماس تقسیم شده به سه قطاع



شکل ۴ تصویر سازه مورد بررسی و مدار هیدرولیک تعبیه شده



شکل ۳ نمودار همگرایی مش برای مدل شبیه سازی شده

مدل اصلی دیسک ترمز $2/3$ میلیمتر انتخاب شده است. سایر قسمت های این مجموعه با طراحی ساده تر و مش بندی سبک تر مدل سازی شدند، به نحوی که در ارائه خواص دینامیکی مشابه مدل واقعی عمل کرده و در عین حال حجم محاسبات را کاهش داده و موجب صرفه جویی در زمان و هزینه می گردد. در ادامه با انجام تحلیل مودال روی مدل شبیه سازی شده، فرکانس های طبیعی سازه استخراج می شوند.

تست مودال تجربی

بررسی ها و مطالعات تجربی نیز بر روی سیستم ترمز دیسکی خودرو انجام شده است. برای این کار ابتدا اجزای مختلف سیستم ترمز فراهم می شود. این اجزای عبارت از دیسک ترمز، سگدست، کالیپر، پولی و پدها است. این اجزای به یکدیگر مونتاژ شده و در نهایت مجموعه سیستم ترمز، در گیره کارگاهی محکم بسته شده است. برای اعمال فشار ترمزگیری به این سیستم، یک مجموعه مدار هیدرولیک تهیه شده و با استفاده از روغن ترمز در این مدار و اتصال مناسب مدار به کالیپر، این مهم اتفاق می افتد. این مدار متشکل از مخزن روغن ترمز، موتور، دنده سه زمانه، شیر یک طرفه، آکومولاتور، گیج فشار و منیفلد است. مجموعه سیستم ترمز و مدار تعبیه شده در شکل (۴) نشان داده شده است.

سازه در این وضعیت در سه فشار مختلف ترمزگیری مورد آزمایش قرار می گیرد. ابتدا فشار 6 bar و سپس فشار 9 و 12 bar بار به پدها اعمال شده و هر بار تست چکش مودال کامل بر روی سازه انجام شده است. تجهیزات مورد استفاده در این تست، عبارت از چکش ارتعاشی ($BK8202$) برای اعمال نیروی تحریک، نیرو سنج $BK8200$ به همراه آمپلی فایر $A2647$ برای

همانطور که از نمودار پیداست، از اندازه متوسط مش برابر سه میلیمتر، پاسخ دینامیکی سیستم ثابت شده و تغییراتی ندارد. بنابراین همگرایی مش صورت گرفته و متوسط سائز مش برای

شناسایی سیستم

همانطور که قبلاً بیان شد، ناحیه تماس بین دیسک و پدها با المان لایه نازک مدل سازی شده است. در این مقاله هدف بررسی و شناسایی ناحیه تماس بین دیسک و پدها بوده و برای نیل به این مهم، می بایست خواص مواد این لایه مورد شناسایی قرار گیرد. همانطور که از مطالعات پیشین مشخص است [18] المان لایه نازک، المانی با ضخامت بسیار اندک (در محدوده یک الی دو میلیمتر) است. این لایه مجازی بوده، بنابراین فاقد جرم است و مدول الاستیک این لایه بیانگر سفتی تماس است. بنابراین تنها خواص مورد تعریف برای این لایه، مدول الاستیک (پارامتر مجهول تحت شناسایی) و ضریب پواسون می باشد. همانطور که در قسمت شبیه سازی بیان شد، ناحیه تماس یک بار به صورت یکپارچه و بار دیگر به سه قطاع تقسیم شده و هر قطاع دارای مدول الاستیک متفاوت نسبت به قطاع دیگر است. بنابراین پارامترهای مدول الاستیک برای سه قطاع تعریف شده در ناحیه تماس مجهولات مسئله بوده که باید مورد بررسی و شناسایی قرار بگیرند.

برای شناسایی و به روز رسانی هر دو مدل لایه نازک شبیه سازی شده، از جعبه ابزار بهینه سازی نرم افزار متلب استفاده شده است. فرآیند شناسایی به این ترتیب است که فرکانس های طبیعی حاصل از آزمایش مودال تجربی به عنوان ورودی به مسئله داده می شود. در ادامه مقادیر حدس اولیه ای برای پارامترهای مجهول داده شده و با فراخوانی مدل اجزای محدود توسط متلب و حل آن، پاسخ های مدل (فرکانس های طبیعی) با نتایج تست مقایسه شده و خطای بین این دو بردار فرکانس، تابع هدف پروسه بهینه سازی تعریف شده است. در واقع تابع هدف به صورت رابطه زیر تعریف شده است:

$$\log(\text{norm}(\text{Er})) = \text{تابع هدف} \quad (۱)$$

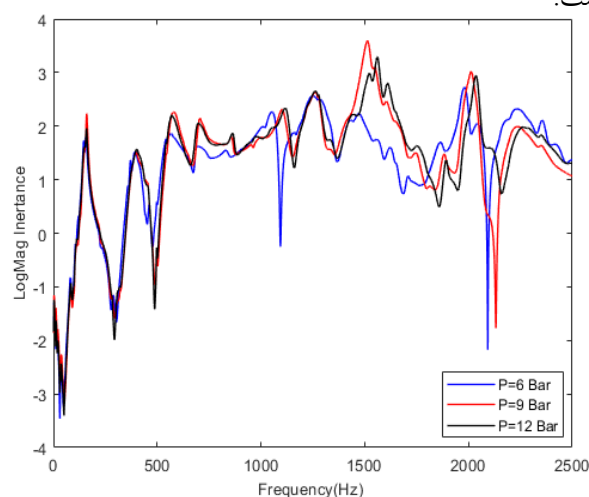
که

$$\text{Er} = \frac{|w_a^2 - w_e^2|}{w_e^2} \quad (۲)$$

در این رابطه w_e بیانگر بردار فرکانس های طبیعی حاصل از تست مودال تجربی و w_a بردار فرکانس های طبیعی حاصل از مدل شبیه سازی شده است. این فرآیند به تعداد لازم تکرار شده تا در نهایت تابع هدف به مینیمم مقدار خود برسد. در مدلی که سراسر ناحیه تماس با یک ماده تعریف شده، فرکانس های طبیعی

محاسبه میزان نیروی اعمالی و شتاب سنج DJB A120V برای محاسبه پاسخ سازه به نیروی تحریک ورودی و دستگاه آنالیزر BK3560D برای دریافت و تحلیل نتایج است. محدوده فرکانسی آزمایش صفر تا ۳۲۰۰ هرتز می باشد. در این آزمایش شتاب سنج ثابت بوده و اعمال تحریک در نقاط مختلف سازه با استفاده از چکش صورت گرفته است.

با اجرای آزمایش و اندازه گیری سیگنال های نیرو و شتاب، توابع پاسخ فرکانسی (شکل ۵) با استفاده از آنالیزر و نرم افزار تست محاسبه شده اند. پس از پایان آزمایش، توابع پاسخ فرکانسی مذکور به نرم افزار تحلیل ارسال و تحلیل شده اند. در نتیجه این تحلیل، فرکانس های طبیعی به دست آمده اند. این آزمایش در سه فشار مختلف انجام شده و نتایج آن به صورت فرکانس های طبیعی در هر سه فشار ترمزگیری در جدول (۱) گزارش شده است.



شکل ۵ توابع پاسخ فرکانسی منتج از تست مودال تجربی در هر سه فشار کاری

جدول ۱ فرکانس های طبیعی حاصل تست مودال تجربی در هر سه فشار کاری

شماره مود	6 bar (Hz)	9 bar (Hz)	12 bar (Hz)
۱	375.0	380.29	382.51
۲	851.2	863.56	866.62
۳	1086.0	1106.9	1147.3
۴	1298.0	1319.2	1344.5
۵	1474.0	1519.5	1546.7
۶	1848.0	1894.0	1904.5
۷	1961.0	2027.8	2031.3

و مقادیر شناسایی شده برای مدول الاستیک در هر سه فشار کاری در جداول (۲) و (۳) گزارش شده است.

جدول ۲ فرکانس‌های حاصل از مدل و آزمایش و خطای مابین در هر سه فشار برای مدل لایه نازک یکپارچه

6 bar	آزمایش	شبیه سازی	خطا(%)
w ₁	375.0	368.4	1.7
w ₂	851.2	870.7	2.3
w ₃	1086.0	1075.5	0.96
w ₄	1298.0	1359.6	4.7
w ₅	1474.0	1425.3	3.3
w ₆	1848.0	1790.5	3.1
9 bar	آزمایش	شبیه سازی	خطا(%)
w ₁	380.29	372.7	2.0
w ₂	863.56	894.5	3.6
w ₃	1106.9	1082.9	2.2
w ₄	1319.2	1366.3	3.6
w ₅	1519.5	1438.3	5.3
w ₆	1894.0	1855.1	2.05
12 bar	آزمایش	شبیه سازی	خطا(%)
w ₁	382.51	373.1	2.5
w ₂	866.62	906.4	4.6
w ₃	1147.3	1121.0	2.3
w ₄	1344.5	1385.3	3.04
w ₅	1546.7	1452.0	6.1
w ₆	1904.5	1863.2	2.2

جدول ۳ مقادیر شناسایی شده برای پارامترهای مجهول در هر سه فشار کاری برای مدل لایه نازک یکپارچه

12 bar	9 bar	6 bar	
1.39×10^8	1.17×10^8	9.62×10^7	E(Pa)

با بررسی جدول دوم مشاهده می‌شود که درصد خطاهای فرکانسی نسبتاً زیاد است. این در حالی است که در هر فشار کاری تنها یک پارامتر کل فرآیند شناسایی را کنترل نموده و بوضوح یک متغیر برای شناسایی چنین سیستم پیچیده‌ای کافی نبوده و نمی‌تواند بخوبی تابع هدف را به مینیمم مقدار خود برساند. این درحالی است که توزیع فشار هم در سرتاسر ناحیه تماس ثابت فرض شده است، در صورتی که در شرایط واقعی ممکن است این توزیع یکنواخت نباشد. با تعریف یکپارچه لایه

نازک با یک مدول الاستیک اثر این مورد قابل بررسی و مشاهده نمی‌باشد. این مسئله، ضرورت مدل‌سازی مرحله دوم را آشکار می‌سازد. در ادامه مدل دوم یعنی مدلی که ناحیه تماس به صورت سه قطاع با خواص مواد متفاوت تعریف شده مورد بررسی و شناسایی قرار می‌گیرد.

در این حالت، فرکانس‌های طبیعی مدل با دقت کافی به نتایج تست نزدیک شده و پارامترهای مجهول مسئله، یعنی مقادیر مدول الاستیک در سه قطاع محاسبه می‌گردند. این پروسه شناسایی، ابتدا با استفاده از نتایج تست مودال در فشار ترمزگیری ۶bar انجام شده است. همین فرآیند برای نتایج تست ۹ و ۱۲bar نیز تکرار شده و در هر فرآیند شناسایی، مقادیر مدول الاستیک بیانگر سفتی تماس در هر فشار شناسایی می‌گردد. در ادامه فرکانس‌های طبیعی حاصل از تست و مدل شبیه سازی بروز شده و خطای مابین در جدول (۴) گزارش شده است. همچنین مقادیر مدول الاستیک شناسایی شده در هر سه مرحله در جدول (۵) ارائه شده است.

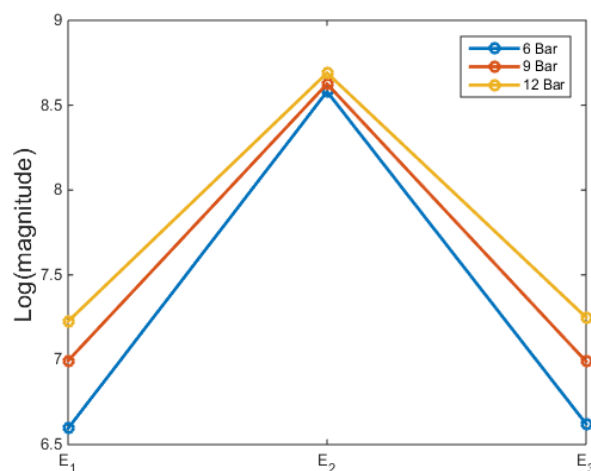
جدول ۴ فرکانس‌های حاصل از مدل و آزمایش و خطای مابین در هر سه فشار برای مدل لایه نازک با سه قطاع

6 bar	آزمایش	شبیه سازی	خطا(%)
w ₁	375.0	371.6	0.9
w ₂	851.2	854.4	0.38
w ₃	1086.0	1089.0	0.28
w ₄	1298.0	1300.0	0.12
w ₅	1474.0	1436.0	2.6
w ₆	1848.0	1877.0	1.56
9 bar	آزمایش	شبیه سازی	خطا(%)
w ₁	380.29	372.1	2.2
w ₂	863.56	868.7	0.59
w ₃	1106.9	1118.0	0.97
w ₄	1319.2	1321.0	0.16
w ₅	1519.5	1447.0	4.8
w ₆	1894.0	1883.0	0.56
12 bar	آزمایش	شبیه سازی	خطا(%)
w ₁	382.51	372.6	2.02
w ₂	866.62	887.1	2.7
w ₃	1147.3	1153.0	0.49
w ₄	1344.5	1339.0	0.41
w ₅	1546.7	1462.0	3.8
w ₆	1904.5	1892.0	0.65

جدول ۵ مقادیر شناسایی شده برای پارامترهای مجهول در هر سه فشار کاری برای مدل لایه نازک با سه قطاع

E_3 (Pa)	E_2 (Pa)	E_1 (Pa)	
4.192×10^6	3.806×10^8	3.938×10^6	6 bar
9.778×10^6	4.223×10^8	9.87×10^6	9 bar
1.776×10^7	4.899×10^8	1.682×10^7	12 bar

همانطور از جدول (۵) پیداست، در هر سه قطاع روند تغییرات مدول الاستیک قطاع با افزایش فشار صعودی است. یعنی با افزایش فشار ترمز، مدول الاستیک لایه نازک که نماینده سفتی تماس در مدل است افزایش می‌یابد. درصد خطای گزارش شده در جدول (۴) نیز دقت خوب مدل را به جهت ارائه پاسخ دینامیکی سازه نشان می‌دهد. نمودار تغییرات مدول‌های الاستیک سه قطاع با افزایش فشار ترمزگیری در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۵ نمودار تغییرات مدول الاستیک سه قطاع با تغییر فشار ترمزگیری

نتیجه‌گیری

در بین مدل‌های موجود برای مدل‌سازی ناحیه تماس در سازه‌های مکانیکی، المان لایه نازک مدلی نسبتاً ساده و در عین حال پرکاربرد می‌باشد که مشابه سایر المان‌های موجود برای مدل‌سازی تماس عمل نموده و شناخت خواص مواد این لایه به منزله شناخت ناحیه تماس در اتصالات مکانیکی می‌باشد. در این مقاله به بررسی ناحیه تماس بین دیسک و پدهای ترمز در سیستم

ترمز خودرو با استفاده از المان لایه نازک پرداخته شد. ابتدا سازه تحت مطالعه تجربی قرار گرفته و سپس مدل اجزای محدود آن در دو حالت شبیه‌سازی شد. در ادامه با استفاده از نتایج تست مدل موجود بروز شده و پارامترهای مجهول ناحیه تماس یعنی مدول الاستیک قطاع‌های تعریف شده در ناحیه تماس مورد شناسایی قرار گرفتند. همانطور که از نتایج پیداست، مدل لایه نازک یک‌کارچه با یک مدول الاستیک برای ناحیه ماس بین دیسک و پدها به اندازه کافی دقیق نبوده و توان ارائه مجدد نتایج تجربی با خطای کم را ندارد. همچنین با این مدل امکان بررسی توزیع فشار در ناحیه تماس وجود ندارد و فشار در این ناحیه یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. در حالی که با تعریف ناحیه تماس در سه قطاع با خواص مواد متفاوت نه تنها مدل دقیق تری نسبت به مدل واقعی ایجاد شده، بلکه مدل امکان بررسی توزیع غیریکنواخت فشار در ناحیه تماس را نیز داراست. با افزایش فشار ترمزگیری، مدول الاستیک هر سه قطاع افزایش یافته است. این بدان معناست که سفتی تماس بین دیسک و پدهای ترمز با افزایش فشار ترمز روند افزایشی داشته و درستی و دقت مدل اجزای محدود شبیه سازی شده را تأیید می‌کند. بنابراین می‌توان گفت مدل المان لایه نازک برای مدل‌سازی ناحیه تماس بین دیسک و پدهای ترمز مدل قابل قبولی است که با مطالعات تجربی بخوبی معتبرسازی شده است. با داشتن چنین مدل‌های اجزای محدود معتبرسازی شده ای مانند مدل ارائه شده در این مقاله، می‌توان بسیاری از تحلیل‌ها را بر روی آن پیاده‌سازی نمود، خصوصاً در شرایطی که به دلیل پیچیدگی اجزای و در دسترس نبودن راحت سازه، امکان انجام آزمایش بر روی سازه واقعی امکان پذیر نباشد. یکی از تحلیل‌های بسیار مهم بر روی سیستم ترمز خودرو، تحلیل پایداری است که با داشتن چنین مدلی می‌توان این نوع تحلیل را روی سازه اعمال نمود و شرایط پایداری بهتر دیسک ترمز را بررسی نموده و به کم شدن صداهای ناهنجار هنگام ترمزگیری مانند جیغ ترمز کمک نمود. مطالعه و بررسی در این زمینه جزء اهداف آتی نویسندگان خواهد بود.

	Finite Element Modelling	مدل سازی اجزای محدود
	Modal Analysis	تحلیل مودال
	Experimental modal test	تست مودال تجربی

تقدیر و تشکر

واژه نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
المان جنریک	Generic Element	بُن پاره، سازک
المان سالید	Solid Element	
مدل لایه نازک درجه بندی شده	Thin Graded Layer Model	
سگدست	Knuckles	سگک

مراجع

- [1] S. Bograd, P. Reuss, A. Schmidt, L. Gaul and M. Mayer, "Modeling the dynamics of mechanical joints," *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 8, p. 2801, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.01.010>
- [2] F. Adel, S. Shokrollahi, "A Review of Bolted Connection Modeling Methods in Vibration Analysis," *Scientific Extension Journal of the Iranian Society of Mechanical Engineers*, Year 27, No. 120, Pages 34, 2017.
- [3] H. Ahmadian, H. Jalali, "Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures," *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, p. 1041, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.08.015>
- [4] H. Ahmadian, H. Jalali, "Generic element formulation for modelling bolted lap joints," *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 5, p. 2318, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.10.006>
- [5] N. Jamia, H. Jalali, J. Taghipour, M. I. Friswell and H. H. Khodaparast, "Nonlinear Dynamic Analysis of Bolted Joints: Detailed and Equivalent Modelling," *Journal of Nonlinear Structures & Systems*, vol. 1, pp. 215, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47626-7_31
- [6] H. Jalali, F. Noohi, "Boundary Condition Identification of a Clamped Beam in Flexible Support," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 28, no. 2, p. 174, 2017.
- [7] H. Ahmadian, M. Esfandiar and H. Jalali, "Boundary Condition Identification of a Plate on Elastic Support," *International Journal of Acoustics and Vibration*, vol. 19, no. 4, p. 282-286, 2014.
- [8] H. Jalali, F. Noohi, "A modal-Energy Based Equivalent Lumped Model for Open Cracks," *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 98, p. 50, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.04.038>
- [9] N. Jamia, H. Jalali, M. I. Friswell, H. H. Khodaparast and J. Taghipour, "Modelling the Effect of Pre-Load in a Lap-Joint by Altering Thin Layer Material Properties," *Journal of Nonlinear Structures & Systems*, vol. 1, p. 211, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77135-5_25
- [10] X. Yao, J. Wang X. Zhai, "Research and application of improved thin-layer element method of aero-engine bolted joints," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 231, no. 5, p. 1-17, 2016. <https://doi.org/10.1177/0954410016643978>

- [11] M. N. Abdul Rani, M. A. Yunus, Z. Yahya, M. Rusli and A. R. Bahari, "Model updating of a bolted joint contact surface using thin layer element parameters," The 5th International Conference on Automotive Innovation and Green Energy Vehicle, 2022, vol. 2998, no. 1, p. 1-12. <https://doi.org/10.1063/5.0188547>
- [12] C. Ehrlich, A. Schmidt and L. Gaul, "Reduced thin-layer elements for modeling the nonlinear transfer behavior of bolted joints of automotive engine structures," *Journal of Archive of Applied Mechanics*, vol. 86, p. 59, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00419-015-1109-1>
- [13] A. N. Ghazvini, S. Shokrollahi and H. Jalali, "Finite Element Model Updating of Hybrid Composite/Aluminum Bolted Joints Using Thin Graded Layer Model," *SSRN papers*, p. 1-35, 2023. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4446581>
- [14] X. Liu, W. Sun, H. Liu, D. Du and H. Ma, "Semi-analytical modeling and analysis of nonlinear vibration of bolted thin plate based on virtual material method," *Journal of Nonlinear Dynamics*, vol. 108, no. 2, p. 1247, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07288-8>
- [15] C. Yue, J. Chen, X. Zheng, C. Wang and H. Liu, "Thin-Layer Element Method for Multi-Stage Rotor Bolt Loosening Identification," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, no. 12, p. 6489, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-1106-9>
- [16] H. Wen, S. Gao, "Dynamic modeling method and parameter calibration of subarea thin-layer elements in bolted connection area of diaphragm coupling," *Physica Scripta*, vol. 100, no. 3, p. 036008, 2025.
- [17] H. Jalali, H. H. Khodaparast and M. I. Friswell, "The Effect of Preload and Surface Roughness Quality on Linear Joint Model Parameters," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 447, p. 186, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.01.050>
- [18] D. Sun, L. Zhao, G. Liang and H. Zhou, "Prediction of Bolted Joint Dynamics Based on the Thin-Layer Element of Nonlinear Material," *Journal of Annales de Chimie Science des Matériaux*, vol. 43, no. 5, p. 311, 2019. <https://doi.org/10.18280/acsm.430506>



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

Numerical and Experimental Investigation of Fracture Fatigue and Resistance of Coating in Abrasion due to the Thermal Spray Method

Research Article

Mostafa Baran Pour¹, Meisam Mohammadi² , Afshin Iranmanesh³

 [10.22067/jacsm.2025.90568.1295](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.90568.1295)

Abstract : Fracture toughness is one of the important variables in engineering designs. For repair and maintenance of tools operating in corrosive, abrasive, oxidation or thermal environment, thermal spray method is used to increase the toughness. Depending on the loading conditions and material properties, various methods are used for determining the toughness. In the present study, ASTM standard is used for experimental tests and determination of K_{IC} . Latter, finite element software is applied for simulating and toughness analysis. Finally, the results of experimental and finite element methods are compared. Also, the method of thermal spray is determined based on the working conditions in addition to increasing the toughness.

Keywords: ASTM Standard, Thermal spray method, Fracture toughness, Finite element solution, Abrasion, Corrosion.

1. Introduction

Fracture toughness is an important issue in engineering designs with special importance due to the working situation [1]. Hence, in engineering applications, surface quality of the tools is important. Thermal spray method is one the usual methods for increasing the surface strength [2]. It is shown high strength parts have low fracture toughness [3]. In order to determine the toughness of the coated parts, and depending on the type of loading and material, different methods are used. In this study, the effect of various factors on the quality of the surface coating and the toughness of the parts hardened by thermal spray has been investigated experimentally and by numerical modeling.

2- Drop test simulation (Numerical solution) both experimentally and by numerical modeling.

In order to numerically investigate the effect of effective parameters on toughness, ANSYS software has been used. Considering that the experimental tests are of the impact type, the collision has been modeled in ANSYS finite element software with the help of the Structural and Ls Dyna modules.

3- Experimental Tests

Materials

In this study, Stainless Steel of grade 304 is used.

Preparing samples

Sample preparation was done at Razi Laboratory and tests were done in the reference laboratory of Vali Asr University of Rafsanjan. In order to perform the thermal spraying process and determine the desired mechanical properties, samples were prepared according to ASTM standards in dimensions of 2.5 x 48 x 146 mm with an increase of 92.3% using a laser cutting machine from a 2.5 mm sheet. For spraying, the samples must have a certain roughness and the surface of the samples must be cleaned to be free from any external contamination.

Spraying process

In order to investigate various parameters, laboratory conditions were determined and specified for the samples. The factors investigated included spray angle, number of spray passes, spray temperature, speed of the coating particle launcher, etc., which were investigated at each stage depending on the experience of the laboratory operator and the design of the experiments.

Determination of spraying conditions

In this study, considering the capabilities of the devices and the practical experiences of the laboratory user, the test conditions were selected and four conditions were selected as simultaneous examination conditions [4]. Then, in order to examine the spray distance and the effect of the spray angle individually on the toughness, spraying was carried out at two different angles and two different distances, considering the same conditions.

* Manuscript received 2024 November 2, Revised 2025 April 6, Accepted 2025 July 11.

¹ M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

² Corresponding author: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. **Email:** meisam.mohammadi@vru.ac.ir

³ M.Sc., Department of Civil Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

Table 1. Spraying characteristics

Test Number	Angle of spraying (In degrees)	Spraying distance	Speed of projectile (m/s)
1	30	35	1.5
2	0	30	1.5
3	40	40	1.3
4	15	20	1
5	30	20	2
6	30	35	2
7	40	20	2
8	10	20	2

In all cases, the air pressure is 5 bars and the oxygen pressure is 6.8 bars [5].

For preparation, metallographic polishing and etching methods are sufficient for electrically conductive materials. Non-conductive materials are usually coated with a thin layer of carbon, gold, or gold alloys. In this study, Stellite 6 powder, a cobalt-based alloy, was used as a coating under high-speed conditions. Stellite 6 powders have high corrosion and wear resistance due to the presence of materials such as chromium and cobalt. In Table 2., some characteristics of Stellite 6 is tabulated.

Table 2. Constituent elements of Stellite 6 powder

Element	W	Ni	Mn	Si	Fe	C	Mo	Co	Cr
Weight percentage	4.5	3	2	1.5	3	1.2	1.5	Bal	29

4- Results

After preparing the samples and fixing them with clamps on the table inside the acoustic chamber, the spraying process was performed. A selection of the spraying results is presented in the tables below.

Table 3. Results of test 1.

Passes No.	Pass temperature (In Celsius)	Thickness increment in each pass (In Micron)
1-2	100	25
3	160	47
4	158	60
5-6	140	100-130

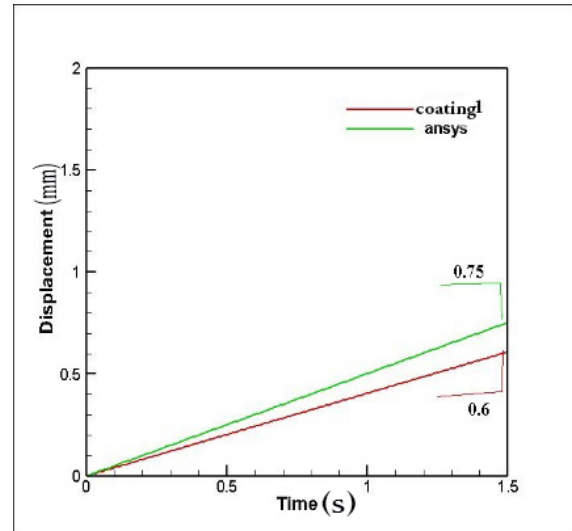
Table 4. Results of test 2.

Passes No.	Pass temperature (In Celsius)	Thickness increment in each pass (In Micron)
1-2	170	60-65
3-4	173	90-130

Drop weight test in 1 meter height

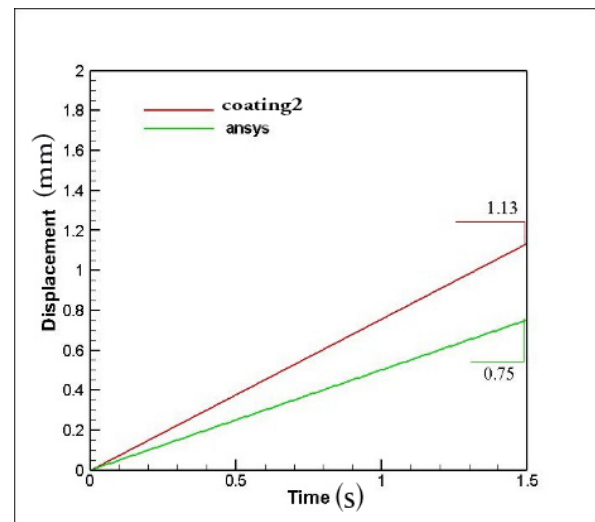
The drop weight test device available in the composite materials laboratory of Vali-e- Asr University of

Rafsanjan was used to conduct the experiment. The operation of this device is based on two displacement sensors and a contact load sensor. The contact load sensor is made of piezoelectric material and can withstand impacts up to 1200 kilo Newtons. The displacement sensor is also capable of storing 800 data sets during the test. Depending on the type of fixtures in the device, samples with dimensions of 10*10 to 25*25 can be used with four-sided clamping boundary conditions.

**Figure 1. Impact test of sample 1, spray distance 35 cm, spray angle 30, spray gun speed 1.5**

As conclusion, the following results can be mentioned:

- ✓ The results of the impact test show that, considering that these coatings are used against factors such as corrosion and abrasion, for parts that are in impact environments and need to be coated, paying attention to the type of coating and coating conditions can provide optimal impact resistance and, as a result, increase the life of the coating.

**Figure 2: Impact test of sample 2, spray distance 35 cm, spray angle 0 degrees, spray gun speed 1.5**

- ✓ The result is that by increasing the spray angle, the fracture toughness increases by 42%.
- ✓ By increasing the spray distance, the fracture toughness decreases by 8%.
- ✓ In the case of the maximum distance of 40 centimeters and the spray angle of 40 degrees, the amount of powder consumption and the time of working with the machine are the highest due to the increase in the spraying stages, and a fracture toughness value of 217 was obtained in this case.

Reference

- [1] [Drilling Industry Magazine](#), No 12 and 13, p. 164, 2017.
 - [2] Saini, H. D. Kumar and V.N. Shukla, "Hot Corrosion behaviour of Nanostructured Cermet based Coatings Deposited by Different Thermal Spray Techniques: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, 2017.
 - [3] J.A. Joyce, D. Wells, B. Stoltz, L. Shelton, P. Jacobs and R.E. Link, "Evaluating the Fracture Toughness of Layered Pressure Vessel Steels," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 207, 2018.
 - [4] S. Matthews, and L.M. Berger, "Inter-diffusion between thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings and an Alloy 625 substrate during long-term exposure at 500 °C, 700 °C and 900 °C," *Journal of Alloys and Compounds*, vol 770. 2019.
 - [5] R. Ahadi, H. Harati Zadeh and M. Mohammadi, "Investigation of mechanical properties and abrasion resistance of titanium-based ceramic nanocoatings," M.Sc. Thesis, *Shahrood Univesrity*, Iran, 2019.
-



بررسی عددی و تجربی چقرمگی شکست و مقاومت به سایش سطوح پوشش داده شده به روش پاشش حرارتی*

مقاله پژوهشی

مصطفی باران پور^(۱) میثم محمدی^(۲) افشین ایرانمنش^(۳)

doi 10.22067/jacsm.2025.90568.1295

چکیده چقرمگی شکست به عنوان یک متغیر مهم در طراحی های مهندسی از اهمیت و جایگاه ویژه ای برخوردار است. بدین منظور برای طراحی، تعمیر و نگهداری قطعاتی که در محیط های تحت سایش، خوردگی، اکسیداسیون و حرارت قرار می گیرند، به منظور افزایش چقرمگی و مقاومت آن ها در برابر عوامل ذکر شده از پوشش های مقاوم سطحی به روش پاشش حرارتی استفاده می شود. به منظور تعیین چقرمگی قطعات پوشش داده شده و بسته به نوع بارگذاری و ماده، از روش های مختلفی استفاده می شود. در این پژوهش از استاندارد ASTM برای تعیین ابعاد و اندازه قطعات آزمایش تجربی و محاسبه KIC به عنوان متغیر چقرمگی استفاده شده است. سپس با استفاده از نرم افزارهای اجزای محدود به شبیه سازی و تحلیل چقرمگی شکست قطعه پوشش داده شده پرداخته شده است و در انتها دو روش تجربی و اجزای محدود مقایسه گردیده است. همچنین انتخاب نوع پوشش و روش پوشش دهی مناسب با توجه به محیط کارکرد قطعه (خوردگی، سایش، اکسیداسیون) به منظور افزایش چقرمگی قطعات از دیگر اهداف این پژوهش است.

واژه های کلیدی استاندارد ASTM، روش پاشش حرارتی، چقرمگی شکست، حل اجزای محدود، سایش، خوردگی.

مقدمه

شیرآلات هستند. در محیط های دارای خوردگی، سایش، حرارت و اکسیداسیون اتصالات ممکن است کارایی مناسبی نسبت به اهداف تعیین شده نداشته باشند یا در محیط های پرفشار دچار شکست یا ترک گردند. و خطرات جبران ناپذیری به بار آورند [1]. با توجه به موارد ذکر شده، در نظر گرفتن چقرمگی شکست (Fracture toughness) به عنوان عامل مهمی در کارایی قطعات می باشد. از آنجایی که معمولاً قطعات با استحکام بالا مقدار چقرمگی شکست پایینی دارند. با استفاده از پوشش های مناسب می توان به مواد با استحکام و چقرمگی بالایی دست یافت [2,3]. پژوهشگران مختلفی به بررسی انواع روش های پوشش دهی و همچنین متغیرهای موثر در این امر پرداختند. در این پژوهش ها تحلیل و بررسی ترک خوردگی ها و میزان چسبندگی پوشش های فلزات به تحلیل چقرمگی شکست مورد بررسی قرار گرفت [4]

مسائلی نظیر سایش و خوردگی از عوامل تأثیرگذار بر روی تولید مداوم می باشد و می تواند در برخی شرایط کاری باعث کاهش کیفیت محصولات صنعتی و یا باعث ایجاد و رشد ترک یا شکست در قطعات شود. به عبارت دیگر با توجه به پیشینه صنعت نفت و گاز، راهبردی بودن اکثر قطعات صنعت نفت و گاز، همچنین قدیمی بودن فناوری اکثر قطعات و با توجه به محدودیت تامین قطعات، باید به دنبال روش های جدیدی برای افزایش عمر و مقاومت قطعات به غیر از مرحله ساخت و طراحی بود. در صنایع، از خطوط لوله برای انتقال محصولات به دلیل هزینه پایین، امن بودن و تسریع در فرآیند انتقال استفاده می شود. اتصالات بکار رفته در خطوط لوله با توجه به نوع کارایی انواع مختلفی دارند، که یکی از اتصالات مهم در فرآیندهای انتقال،

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۸/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۲۱ می باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. Email: meisam.mohammadi@vru.ac.ir

(۳) مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

مطابقت بسیار خوبی نشان دادند. بر اساس نتایج این پژوهش روش نمونه‌های دیسک برزیلی با ترک مرکزی شون که یکی از روش‌های استاندارد پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ می‌باشد. هم در حالت کشش و هم در حالت برش مناسب‌ترین روش بوده است.

هاشمی و همکارانش به تعیین تجربی و عددی چقرمگی شکست با استفاده از اطلاعات آزمایش ضربه شاری در فولاد لوله‌های انتقال گاز با گرید APIX65 پرداختند [10]. در این پژوهش از یک روش نیمه-تجربی جهت محاسبه چقرمگی شکست لوله‌های فولادی (با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱۴/۳ میلی‌متر) با توجه به اطلاعات موجود در آزمایش ضربه شاری استفاده شد. از نتایج حاصله مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط چقرمگی شکست برای فولاد مورد آزمایش بدست آمد. همچنین از حل المان محدود نمونه آزمایش C(T) با استفاده از تئوری اصلاح شده گرسون جهت محاسبه میزان گشودگی نوک ترک (در حالت بحرانی) با سه ضخامت مختلف نمونه انجام گردید. که نشان دهنده مطابقت مناسب مقادیر بدست آمده برای این فولاد در دمای محیط است.

آشنای قاسمی و همکارانش به بررسی تجربی اثر دما روی پاسخ ضربه‌ای سرعت پایین صفحات آلومینیوم شیاردار تعمیر شده توسط وصله‌های کامپوزیتی چند لایه دارای لایه فلزی پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد دما تاثیر بسیار بر روی رفتار ضربه‌ای و استحکام ضربه‌ای وصله‌ها و نمونه تعمیر شده دارد به‌طوری‌که باعث کاهش ۲۰ درصدی مقاومت به ضربه در دماهای بالاتر و پایین‌تر محیط می‌شود. [11]

شبیه‌سازی آزمایش ضربه (حل عددی)

به منظور شبیه‌سازی برخورد در نرم افزار اجزای محدود انسیس ماژول‌های structural و Ls Dyna فعال گردیده است. سپس با توجه به سه بعدی بودن قطعه از گروه LS-DYNA Explicit المان 3D Solid 164 انتخاب شده است. در ادامه، با توجه به اینکه قطعه پایه و پرتابه هر دو از جنس فولاد و دارای خواص یکسان هستند اما ماده پوشش دارای خواص متفاوت است، باید در انتخاب مواد دو نوع ماده انتخاب گردد که در زمان ایجاد شبکه با انتخاب نوع ماده برای هر کدام خواص ماده انتخابی اعمال گردد. به منظور شبیه‌سازی قطعه و پوشش از قسمت Create-

[6]. خوش نژاد به بررسی و تعیین خواص مکانیکی پوشش‌های مقاوم حرارتی پلاسما اسپری، تحت بارگذاری‌های حرارتی به روش تست فرورونده بر روی بستر از جنس سوپر آلیاژ GTD111 پرداخت [7]. مقدار تخلخل نمونه‌ها با استفاده از نفوذ آب بدست آمد. مقدار سختی و مدول الاستیک لایه‌های پوشش را با استفاده از آزمون نانوفروروندگی محاسبه و همچنین مقدار سختی لایه‌های پوشش با استفاده از روش میکروسختی سنجی بدست آمد. مقایسه نتایج نشان داد که مقادیر تعیین شده همپوشانی خوبی با مقادیر تجربی دارد.

شریفی مدل‌سازی برخورد ذرات مذاب به لایه را مورد بررسی قرار داد [8]. بدین منظور پوشش تحت تاثیر شکل، میزان پخش شدن ذره و یا قطره برخورد یافته می‌تواند از پیوستگی و انجام مناسب‌تر برخوردار باشد و کمتر تخلخل داشته باشد. از نشان دادن این پوشش‌ها بر روی قطعات مکانیکی در راستای تقویت خصوصیات سایش و خوردگی این قطعات استفاده می‌شود. در این پژوهش مدل‌سازی قطره برخورد یافته به یک سطح صلب با سرعت بالا در لحظه برخورد (یک متر بر ثانیه) در نرم افزار Ls-Dyna و در حالت برخورد عمودی با زیر لایه مدل انجام شده است. و بعد از اطمینان از صحت نتایج با توجه به مقایسه آن با نتایج مرجع، مدل تعمیم داده شده است. همچنین به محاسبه ضرابی همچون پهن شدگی، ارتفاع حداکثر قطره، فشار گذاری داخلی قطره با استفاده از تغییر در میزان ضرایب اصطکاک زیر لایه، سرعت قطره و زاویه برخورد پرداخته شد.

منصوری به ارزیابی دقت روش‌های مختلف اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ در شرایط کشش و برش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی پرداخت [9]. این پایان نامه تلاشی برای مقایسه‌ای بین شش روش تعیین چقرمگی مود کششی و سه روش تعیین چقرمگی شکست مود برشی سنگ‌ها بر اساس میزان حساسیت نتایج آن‌ها به تغییر اندازه نمونه‌ها و تغییر طول ترک در نمونه‌هاست. در ابتدا نمونه ترک‌دار لازم، بلور مصنوعی با مصالح گچ ساخته شد. سپس نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف به طور جدا تجزیه و تحلیل کردند. میزان حساسیت نتایج به تغییر اندازه طول ترک مشخص شد. و سپس با نرم افزار Abaqus نحوه توزیع تنش و جابه جایی‌ها در نمونه‌های دیسکی ترک‌دار و نیم دیسکی ترک‌دار بررسی شد. رفتار شکست نمونه‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی عددی مقایسه و نتایج



(الف) نمونه های آزمایش



(ب) برش نمونه های آزمایش

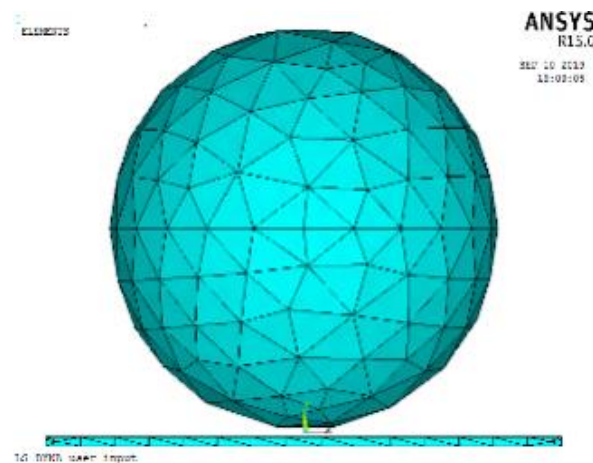
شکل ۲ نمونه های آماده شده

به جهت اینکه در عملیات پوشش دهی نمونه ها ثابت نگه داشته شوند، به فاصله ۲۴ mm در عرض نمونه و ۲/۵ mm از لبه، سوراخ هایی ایجاد شد تا نمونه ها در هنگام عملیات پوشش دهی بر روی سطح به وسیله پرچ به میز کار ثابت گردند. در این عملیات از دستگاه فرز fp4mk.f ساخت ماشین سازی تبریز مستقر در آزمایشگاه مرجع دانشگاه ولی عصر رفسنجان استفاده شد. همچنین به منظور کنترل فرایند پاشش برای ثابت نگه داشتن نمونه ها، از پروفیل فولادی با مقطع مربع جهت پیچ کردن نمونه ها در محل های سوراخ شده استفاده شده است. به علاوه، به منظور جلوگیری از افزایش مصرف پودر مخصوص پوشش دهی، نمونه ها در فاصله بسیاری نزدیکی از هم قرار داده شدند.



شکل ۳ نمونه های آماده شده جهت فرایند پوشش دهی

Volumes-Block-By Dimension ابعاد مورد نظر وارد و برای رسم گلوله از قسمت Sphere Create-Volumes-Sphere-Solid استفاده شده است. همچنین جهت ایجاد شبکه پرتابه و پوشش دادن گوشه های کروی آن از قالب tetrahedral و برای ایجاد شبکه سطح پایه و پوشش اعمال شده بر روی آن از قالب Quadrilateral استفاده شده است. همچنین جهت تعریف تماس بین گوی و سطح از LS Surface to surface-Automatic و جهت تعریف تماس بین سطح پایه و پوشش مسیر LS DYNA options-Contact-Define Contact استفاده شده است. همچنین برای اینکه در آزمایش برخورد مقدار جابجایی به صورت واقعی نمایش داده شود، قطعه از چهار طرف مقید گردیده است. سپس سرعت پرتابه و زمان حل اعمال و نتایج بدست آمده است.



شکل ۱ مدل سازی انجام شده در نرم افزار انسیس

آزمایش تجربی

مواد و تجهیزات

در این پژوهش از فولاد ضدزنگ ۳۰۴ استفاده شده است.

آماده سازی نمونه ها

به منظور انجام فرایند پاشش حرارتی و تعیین خواص مکانیکی مورد نظر، نمونه ها طبق استاندارد در ابعاد $۱۴۶ \times ۴۸ \times ۲/۵$ میلی متر با درصد افزایش ۹۲/۳٪ با استفاده از دستگاه برش لیزری از ورق ۲/۵ میلی متر تهیه شدند.

بر روی حالت خودکار درب اتاقک بسته شد و ابتدا شیر اکسیژن ورودی و ازت را باز و پودر درون دستگاه پاشش پودر (Feed Powder) ریخته شد. قبل از شروع فرآیند پاشش، تفنگ پاشش را پاک‌سازی و با زدن دکمه تزریق پودر و شروع فرآیند پاشش به صورت خودکار انجام می‌شود. تمامی شرایط نظیر نسبت سوخت، آب ورودی و خروجی به تفنگ پاشش و غیره را در لحظه می‌توان مشاهده و ثبت نمود. همچنین اگر دمای قطعه کار در پاس اول بیشتر از ۱۲۰ درجه سلسیوس باشد باعث ایجاد تخلخل زیاد می‌گردد و باید فرآیند پاشش قطع گردد. بعد از هر مرحله پاشش بلافاصله با استفاده از ترمومتر دستی دمای قطعه اندازه‌گیری شده و بعد از سرد شدن با استفاده از کولیس ضخامت پوشش اندازه‌گیری می‌شود. توجه شود که دمای قطعه در هنگام خنک کاری نباید کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس شود. زیرا مقدار مصرف پودر را برای پاس‌های بعدی افزایش می‌دهد و ممکن است تخلخل ایجاد شود. میزان تخلخل مجاز متناسب با استاندارد مورد استفاده نباید بیشتر شود.

نحوه و انتخاب شرایط پاشش

در این پژوهش با توجه به قابلیت دستگاه‌ها و تجارب عملی کاربر آزمایشگاه، شرایط آزمایش انتخاب و چهار شرط به عنوان شرایط بررسی همزمان انتخاب گردید. سپس به منظور بررسی فاصله پاشش و تأثیر زاویه پاشش به صورت منفرد بر روی میزان چقرمگی، با در نظر گرفتن شرایط یکسان و در دو زاویه مختلف و دو فاصله مختلف پاشش انجام شد [13].

در تمامی مراحل فشار هوا ۵ bar و فشار اکسیژن ۶/۸ bar در نظر گرفته شد.

ابتدا با توجه به محدودیت اندازه نمونه‌ها و محفظه میکروسکوپ، نمونه‌ها توسط دستگاه وایر کات (Wire cut) برش داده شده‌اند [13]. به منظور آماده‌سازی، روش‌های صیقلی و حکاکی متالوگرافی برای مواد هادی الکتریسته کافی هستند. مواد غیرهادی معمولاً با لایه نازکی از کربن، طلا یا آلیاژهای طلا پوشش داده می‌شوند. در نمونه‌هایی که دارای پوشش هستند با توجه به نوع فرآیند پاشش حرارتی، تخلخل ایجاد شده در نمونه‌ها متفاوت است. اساساً در فرایندهای پاشش حرارتی میزان تخلخل نسبت به سایر روش‌های پوشش‌دهی بالاست. به همین دلیل در هنگام بررسی چقرمگی شکست با توجه به اینکه شکل

سپس قبل از عملیات پوشش‌دهی و به منظور ایجاد قفل‌شدگی مکانیکی لازم بین ذرات پاشش شده و سطح پایه، بر روی سطح نمونه‌ها باید به اندازه کافی زبری سطح R_a مناسب ایجاد گردد و سطح نمونه‌های مونتاژ شده را جهت فرآیند پوشش دهی متالورژیکی آماده کرد. تا فرآیندهایی نظیر نفوذ، جوش خوردگی سطوح و چسبندگی مناسب ایجاد گردند و ذرات پوشش داده‌شده درون پستی و بلندی‌های ایجاد شده قرار گیرند. در نتیجه چسبندگی مناسب ایجاد نمایند. [12] برای این هدف، از دستگاه بلاست دستی استفاده شده است. یک نازل پاشش درون دستگاه وجود دارد که فشار هوای فشرده را روی ۵ تا ۶ بار قرار داده و ذرات اکسید آلومینیوم با دانه‌بندی ۲۴-۲۰ میکرون از درون نازل بر روی سطح قطعه پاشش می‌شوند. سپس سطح آماده‌سازی شده و قبل از انجام پاشش با استفاده از نازل کمپرسور هوا برای ایجاد سطح قطعه عاری از هرگونه گرد و خاک باشد تمیزکاری صورت می‌گیرد.



شکل ۴ دستگاه سند بلاست

فرایند پاشش

بدین منظور ابتدا برای تنظیم زاویه پاشش از یک ابزار اندازه‌گیری زاویه استفاده گردید. سپس از تنظیم‌کننده شعله پرتاب گر که طول آن ۳۶ سانتی‌متر است و همراه با برل دستگاه که با توجه نوع پودر متفاوت است (در این پژوهش از برل با طول ۸ سانتی‌متر) استفاده شده است. فاصله پرتاب گر تا قطعه متناسب با شرایط مدنظر تنظیم گردید. سپس با کد نویسی سرعت پرتاب گر و تنظیمات مربوط به پاشش و تعداد پاس‌های پاشش تنظیم و یک مرحله به صورت دستی نحوه پاشش بررسی شد. با تنظیم

استفاده نمی‌شوند. که در این پژوهش از پودر با کد تولید ۴۲۰۰۶ و مقدار سختی HRC ۴۰-۴۶ با دانه‌بندی ۲۰ تا ۵۳ میکرون استفاده گردید.

جدول ۱ خصوصیات پاشش

شماره آزمایش	فاصله پاشش	زاویه پاشش (درجه)	سرعت پرتاب گر
۱	۳۵	۳۰	۱/۵
۲	۳۰	۰	۱/۵
۳	۴۰	۴۰	۱/۳
۴	۲۰	۱۵	۱
۵	۲۰	۳۰	۲
۶	۳۵	۳۰	۲
۷	۲۰	۴۰	۲
۸	۲۰	۱۰	۲

نتایج

بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها و ثابت نمودن آن‌ها به وسیله گیره بر روی میز درون محفظه آکوستیک، فرآیند پاشش انجام شد. با توجه به مقدار حرارت و رنگ قطعه در هنگام پاشش برای جلوگیری از خمش نمونه‌ها در اثر حرارت زیاد جذب شده توسط نمونه‌ها و با توجه به شرایط مختلف در نظر گرفته شده برای آزمایش‌ها، نتایج مربوط به پاشش در جداول (۲) تا (۷) ارائه شده است.

جدول ۲ عناصر تشکیل دهنده پودر استلایت ۶

عصر	Co	Mo	C	Fe	Si	Mn	Ni	W	Cr
درصد وزنی	Bal	۱/۵	۱/۲	۳	۱/۵	۱	۳	۴/۵	۲۹

جدول ۳ نتایج مربوط به شرایط آزمایش شماره ۱

تعداد پاس	دمای پاس (درجه سلسیوس)	ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱-۲	۱۰۰	۲۵
۳	۱۶۰	۴۷
۴	۱۵۸	۶۰
۵-۶	۱۴۰	۱۰۰-۱۳۰

حاصل از میکروسختی جهت بدست آوردن متغیر چقرمگی مهم است ممکن است در اثر برخورد میکرو سختی در اطراف تخلخل‌ها شکل مناسبی مشاهده نگردد. لذا بدین منظور ابتدا نمونه‌ها در آزمایشگاه متالورژی رازی با استفاده از پوشش طلا آماده‌سازی شده است.



شکل ۵ پوشش دهی نمونه‌ها با طلا

در این پژوهش از پودر با نام تجاری استلایت ۶ به عنوان یکی از آلیاژهای پایه کبالت تحت شرایط سرعت بالا به عنوان پوشش استفاده شد. پودرهای استلایت ۶ به دلیل وجود موادی همچون کروم و کبالت مقاومت به خوردگی و سایش بالایی دارند. این پودرها با توجه به نحوه استفاده در اندازه‌های مختلفی در بازار عرضه می‌شوند که محققان و صنعتگران با توجه به محیط کارکرد قطعه و شرایطی که از تحلیل‌ها و محاسبات مهندسی برای سازه‌ها و قطعات به دست می‌آورند، برای ایجاد خواص دلخواه از آن‌ها استفاده می‌نمایند. برخی از ویژگی‌های این پودر در جدول (۱) ارائه شده است. اندازه پودر در تعیین روش پوشش دهی مؤثر است. به همین منظور برای انجام فرآیند از روش اسپری سوخت و اکسیژن با سرعت زیاد HVOF که یکی از پیشرفته ترین روش‌های پاشش می باشد، استفاده شده است. در این روش پودر با اندازه متغیر بین ۲۰ میکرون تا ۵۳ میکرون را با سرعت ۱۲۰۰ متر بر ثانیه بر روی سطح پاشش می شود که در فرایند پاشش، ترکیب دانه‌بندی ریز و درشت باعث چسبندگی بهتر در این پوشش خواهد شد. پودرهای با اندازه بزرگ‌تر به دلیل آسیب رساندن به تفنگ دستگاه پاشش و اینکه ذرات در حین فرایند پاشش ممکن است به ۷۵٪ نقطه ذوب خود نرسند و به دلیل عدم ذوب مناسب ذرات، پوشش مناسبی به دست نیاید به تنهایی

پاشش در پاس‌های کاری بیشتر انجام شود. اما به دلیل افزایش فاصله پاشش، دمای قطعه امکان ایجاد سه مرحله پاشش به صورت هم‌زمان را ایجاد می‌کند، که در این سه مرحله مقدار پاشش در محدوده دو آزمایش شماره ۱ و ۲ است. که نشان‌دهنده تأثیر سرعت پرتاب‌گر بر فرآیندهای پاشش حرارتی است. با توجه به این نکته که هزینه کار کردن با دستگاه‌های پاشش حرارتی به نوع سوخت، قیمت بالای دستگاه، نیروی انسانی، هدر رفت پودر و ... بستگی دارد، زمان انجام پاشش حرارت در این آزمایش از سایر روش‌ها کمتر است.

جدول ۶ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۴

تعداد پاس	دمای پاس (درجه سلسیوس)	ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱	۱۳۰	۴۰
۲-۳	۲۲۰	۹۰-۱۰۰

در آزمایش شماره ۴ به دلیل فاصله بسیار کم پاشش نسبت به سایر روش‌ها در اولین پاس‌کاری دمای نمونه به بالاترین حد خود رسیده و امکان استفاده از پاس‌های بعدی به دلیل تغییر شکل دادن ورق نبود. به همین دلیل بعد از سرد شدن تا محدوده دمای ۴۰ درجه سلسیوس، دوباره فرآیند پاشش انجام شده و به همین دلیل دمای نمونه بعد از اتمام پاس ۳ به حدود ۲۲۰ درجه سلسیوس رسیده است. این حالت از نمونه آزمایش شماره ۳ که هر ۳ پاس به صورت هم‌زمان انجام شده نیز بیشتر است.

جدول ۷ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۵-۶

ضخامت پوشش	دمای پاس	تعداد پاس	
۵۲	۲۴۳	۳	زاویه ۱
۷۳	۳۰۰	۳	زاویه ۲

این آزمایش در شرایط کاملاً یکسان و با دو زاویه متفاوت انجام شده است و نشان‌دهنده این است که با اعمال ۳ پاس بر روی هر کدام از نمونه‌ها به دلیل زاویه کمتر در نمونه آزمایش با زاویه شماره ۲ مقدار دما بسیار بیشتر از نمونه شماره ۱ است.

در آزمایش شمار ۱ با توجه به شرایط آزمایش نمونه‌ها در هر مرحله از حرکت ربات که از قسمت بالای قطعه شروع به حرکت و تا انتهای قطعه رسیده و به اندازه ۴ میلی‌متر پایین‌تر رفته و دوباره در جهت عکس عملیات پاشش را انجام داده به طور متوسط در هر مرحله ۳۲/۵ میکرون را در ۶ مرحله حرکت ربات که پاس کاری نامیده می‌شود را لایه نشانی کرده است. با توجه به نتایج تجربی کار با دستگاه پاشش حرارتی (HVOF)، در هر پاس کاری باید حدود ۲۵ میکرون پاشش شود که پس از انجام ۶ مرحله باید حدود ۱۵۰ میکرون پاشش شده باشد. دلیل این اختلاف با توجه به اینکه در ۴ پاس کاری اول به طور متوسط بین ۱۵ میکرون لایه نشانی انجام شده است. به دلیل دمای بالای قطعه و تخلخل ذاتی نمونه‌های پوشش در پاس‌کاری ۶-۵ در حدود ۷۰ میکرون لایه نشانی می‌شود؛ که نشان‌دهنده‌ی این است، که با افزایش دمای قطعه مقدار لایه نشانی افزایش یافته، اما ساختارهای متخلخل ایجاد می‌نماید.

جدول ۴ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۲

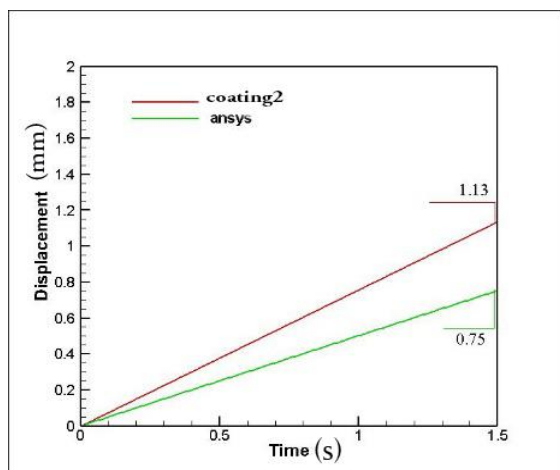
تعداد پاس	دمای پاس (درجه سلسیوس)	ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱-۲	۱۷۰	۶۰-۶۵
۳-۴	۱۷۳	۹۰-۱۳۰

به دلیل زاویه عمود پاشش بر سطح نمونه‌ها و فاصله پاشش کمتر نسبت به آزمایش شماره ۱ در ۴ پاس‌کاری به صورت دو مرحله هم‌زمان مقدار پاشش مشابه حالت آزمایش شماره ۱ است. که نتیجه می‌شود هر چه زاویه پاشش به حالت عمود نزدیک‌تر باشد مقدار لایه نشانی افزایش می‌یابد. و به دلیل نزدیک‌تر شدن فاصله پاشش دمای نمونه نسبت به آزمایش شماره ۱ افزایش پیدا کرده است.

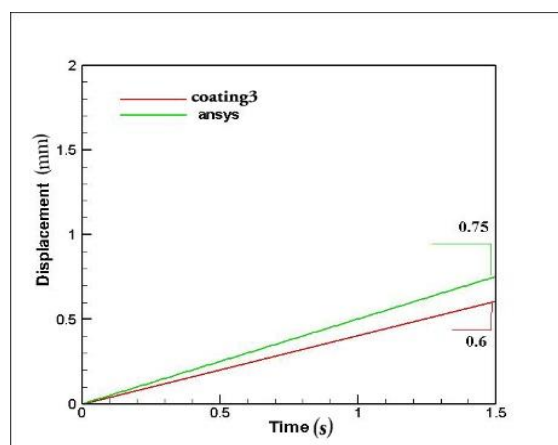
جدول ۵ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۳

پاس پوشش	دمای پاس (درجه سلسیوس)	ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱-۲-۳	۱۸۰	۱۱۰-۱۱۵

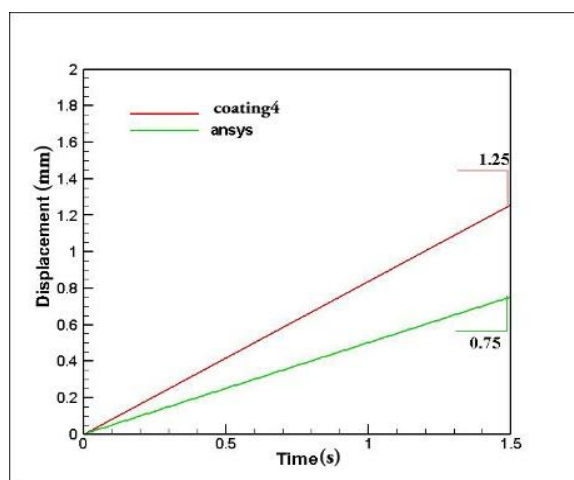
در آزمایش شماره ۳ به دلیل افزایش زاویه پاشش باید مقدار



شکل ۷ آزمایش ضربه نمونه ۲، فاصله پاشش ۳۵cm، زاویه پاشش صفر درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱/۵



شکل ۸ آزمایش ضربه نمونه ۳، فاصله پاشش ۴۰cm، زاویه پاشش ۴۰ درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱/۳



شکل ۹ آزمایش ضربه نمونه ۴، فاصله پاشش ۲۰cm، زاویه پاشش ۱۵ درجه، سرعت تفنگ پاشش

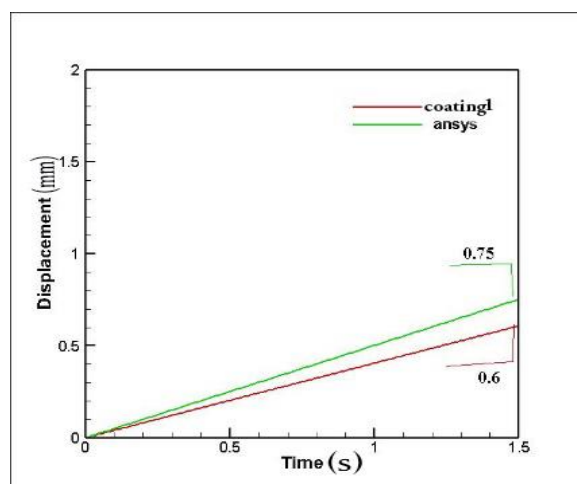
جدول ۸ نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۷-۸

فاصله مختلف	تعداد پاس	دمای پاس	ضخامت پوشش
فاصله ۱	۳	۲۰۰	۶۵
فاصله ۲	۳	۲۷۸/۵	۱۰۰

این آزمایش در شرایط کاملاً یکسان با دو فاصله متفاوت با اعمال ۳ پاس کاری انجام شد. که نشان دهنده افزایش دما در نمونه آزمایش با فاصله کمتر است. همچنین مقدار لایه نشانی نیز با کمتر شدن فاصله افزایش یافته است. اما به دلیل افزایش دما، سطوح متخلخل تری نسبت به نمونه شماره ۱ ایجاد می نماید. که در محیط های خورنده مواد درون حفره ها قرار گرفته و کارایی قطعه و میزان عمر پوشش را کاهش می دهد.

آزمایش ضربه در ارتفاع ۱ متر

از دستگاه تست سقوط وزنه موجود در آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه ولی عصر رفسنجان برای انجام این آزمایش استفاده گردید. عملکرد این دستگاه بر پایه دو حسگر جابجایی و نیروسنج تماسی است. که حسگر نیروسنج تماسی از جنس پیزو الکتریک و امکان تحمل ضربه تا ۱۲۰۰ کیلونیوتن را دارد. همچنین سنسور جابجایی نیز قابلیت ذخیره ۸۰۰ داده را در حین انجام تست دارد که با توجه به نوع فیکسچرهای دستگاه می توان از قطعات در ابعاد ۱۰*۱۰ تا ۲۵*۲۵ با شرایط مرزی چهار طرف گیردار استفاده نمود.



شکل ۶ آزمایش ضربه نمونه ۱، فاصله پاشش ۳۵cm، زاویه پاشش ۳۰ درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱/۵

جدول ۹ نتایج سختی برای نمونه با شرایط یکسان و فواصل مختلف

نام آزمایش	عدد سختی در نقاط اندازه‌گیری شده (HV)			سختی میانگین
فاصله پاشش ۳۵ cm	۷۷۸	۸۰۷	۸۲۵	۸۰۳
فاصله پاشش ۲۵ cm	۶۷۳	۷۰۵	۶۹۵	۶۹۱

از نتایج بالا نتیجه می‌شود در شرایط یکسان با افزایش فاصله پاشش مقدار سختی پوشش افزایش یافته است از آنجایی که در فرآیندهای پاشش حرارتی دمای جذب‌شده توسط سطح زیر لایه در میزان تخلخل و سختی سطح بسیار مؤثر است. هر چه فاصله پاشش کمتر باشد میزان دمای جذب‌شده توسط قطعه افزایش می‌یابد. در نتیجه مقدار سختی کمتری نسبت به حالت با فاصله بیشتر دارد.

جدول ۱۰ نتایج پاشش در زاویه‌های متفاوت

نام آزمایش	عدد سختی در نقاط اندازه‌گیری شده (HV)			سختی میانگین
زاویه پاشش ۴۰ درجه	۸۴۰	۸۱۹	۸۲۷	۸۲۹
زاویه پاشش ۱۰ درجه	۷۶۴	۷۶۴	۷۲۹	۷۵۲

از مقایسه نتایج پاشش در زاویه‌های متفاوت نتیجه می‌شود، با افزایش زاویه پاشش مقدار سختی پوشش نیز افزایش می‌یابد. هر چه زاویه پاشش بیشتر باشد ضخامت پوشش اعمال‌شده کمتر می‌شود و لایه نشانی در پاس‌های کاری بیشتر انجام می‌شود.

نتایج چقرمگی شکست

با استفاده از نتایج میکروسختی و در اختیار داشتن طول ترک، با کمک رابطه زیر مقادیر چقرمگی شکست برای نمونه‌ها تعیین می‌شود [14].

$$K_{IC} = 0.016 \left[\frac{E}{H} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{P}{C^2} \right] \quad (1)$$

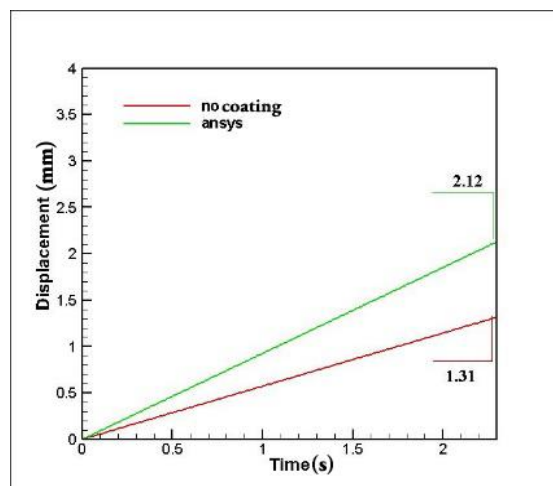
L: مقدار طول ترک از انتهای نقطه اثر

A: مرکز فرورونده تا انتهای نقطه اثر

C: فاصله مرکز فرورونده تا انتهای ترک

E: مدول الاستیسته پوشش

H: سختی پوشش



شکل ۱۰ آزمایش نمونه بدون پوشش ۱

آزمایش سختی

آزمایش سختی سنجی به منظور بررسی سختی پوشش‌های اعمال‌شده در شرایط دمایی ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۴۱٪ انجام شد. به منظور استخراج دقیق مقدار سختی مطابق با استاندارد بر روی هر نمونه در ۳ نقطه با فاصله ذکر شده در استاندارد مقادیر سختی به دست آمده سپس برای هر نمونه مقدار سختی میانگین به عنوان سختی پوشش به دست آمده است.

جدول ۸ نتایج آزمایش سختی در بررسی شرایط پاشش به صورت هم‌زمان

شماره آزمایش	عدد سختی در نقاط اندازه‌گیری شده (HV)			سختی میانگین
آزمایش ۱	۷۱۰	۷۰۸	۷۱۲	۷۱۰
آزمایش ۲	۶۹۰	۷۰۳	۷۱۱	۷۰۱
آزمایش ۳	۸۵۶	۸۱۶	۸۰۷	۸۲۶
آزمایش ۴	۸۰۸	۸۵۹	۷۸۰	۷۸۲

نتایج آزمایش سختی بر روی پوشش‌ها نشان می‌دهد، که نمونه با شرایط پاشش شماره ۳ بیشتر مقدار سختی و نمونه با شرایط پاشش شماره ۲ کم‌ترین مقدار سختی را دارد که نشان‌دهنده این است با افزایش مقدار زاویه پاشش و فاصله پاشش و کاهش سرعت تفنگ پاشش، نمونه‌های با سختی بیشتر می‌توان به دست آورد. همچنین با مقایسه آزمایش با شرایط پاشش ۱ و ۴ نتیجه می‌شود که، سرعت تفنگ انفجاری مهم‌ترین عامل افزایش سختی است.

جدول ۱۳ تاثیر زاویه پاشش بر چقرمگی شکست

K _c	H	E	C	A	L	زاویه پاشش
۱۳۹	۸۲۹	۲۱۳	۱۴/۷۶۱	۶/۹۳۱	۷/۸۳	۴۰
۹۸	۷۵۲	۲۱۳	۱۹/۶۶	۹/۵۲۷	۱۰/۱۳۳	۱۰

نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی عوامل مختلف بر کیفیت پوشش سطح در روش پاشش حرارتی و تاثیر آنها بر مقدار چقرمگی سطح بررسی شد. در پایان نتایج زیر قابل بیان است:

۱. نتایج آزمایش ضربه نشان می‌دهد با توجه به اینکه از این پوشش‌ها در برابر عواملی همچون خوردگی، سایش استفاده شده است، برای قطعاتی که در محیط‌های تحت ضربه قرار دارند و نیاز به پوشش دهی دارند توجه به نوع پوشش و شرایط پوشش دهی می‌تواند مقاومت به ضربه‌های بهینه و در نتیجه افزایش عمر پوشش را به همراه داشته باشد.

۲. نتیجه می‌شود با افزایش زاویه پاشش مقدار چقرمگی شکست ۴۲٪ افزایش می‌یابد.

۳. با افزایش فاصله پاشش مقدار چقرمگی شکست ۸٪ کاهش می‌یابد.

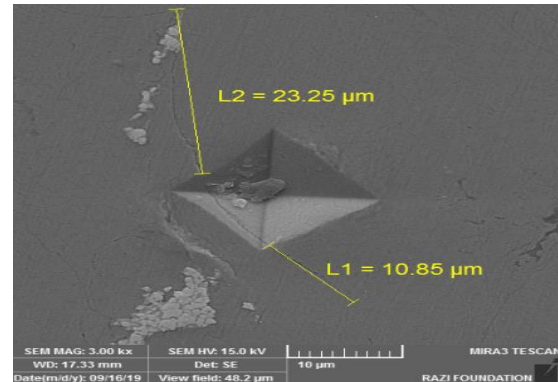
۴. در حالت بیشترین مقدار فاصله ۴۰ سانتی‌متر و زاویه پاشش ۴۰ درجه میزان مصرف پودر و زمان کار با دستگاه با توجه به افزایش مراحل پاشش بیشترین مقدار است و مقدار چقرمگی شکست ۲۱۷ در این حالت به دست آمده است.

واژه نامه

پیشنهادی ویراستار	واژه لاتین	پیشنهادی نویسنده
	Fracture toughness	چقرمگی شکست
	Finite element	اجزای محدود
	Valves	شیر آلات
	Coating adhesion	چسبندگی پوشش
افشانک پلاسما	Plasma spray	اسپری پلاسما

K_c: چقرمگی شکست

جهت بدست آوردن متغیر طول ترک (C) از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده و همچنین جهت مشخص نمودن مقدار دقیق طول ترک از نرم افزار دیجی مایزر بر پایه پردازش تصویر استفاده گردیده است.



شکل ۱۱ ترک های سطحی نمونه ها

یکی از علل عدم کارایی مناسب پوشش‌ها وجود تخلخل در نمونه است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است میزان تخلخل نمونه بسیار زیاد است از طرف دیگر ذوب ناقص ذرات نیز باعث ایجاد پوشش‌های متخلخل می‌گردد و این تخلخل‌ها در هنگام فعالیت قطعات محل قرارگیری مواد خورنده هستند و باعث کاهش عمر قطعات می‌گردند.

جدول ۱۱ چقرمگی شکست

شماره آزمایش	K _c	H	E	C	A	L
۱	۱۶۳	۷۱۰	۲۱۳	۱۴/۰۵	۸/۵۸	۵/۴۷۲
۲	۱۶۸	۷۰۱	۲۱۳	۱۳/۸۱	۸/۱۵	۵/۶۶
۳	۲۱۷	۸۲۶	۲۱۳	۱۱/۰۲	۵/۷۲	۵/۳۰۵
۴	۱۸۱	۷۸۲	۲۱۳	۱۲/۶۵	۷/۷۷	۴/۸۸۱

جدول ۱۲ تاثیر فاصله پاشش بر چقرمگی شکست

فاصله پاشش	K _c	H	E	C	A	L
۳۵	۱۶۹	۸۰۳	۲۱۳	۱۳/۱۳۹	۵/۹۰۵	۷/۲۳۴
۲۵	۱۸۲	۶۹۱	۲۱۳	۹/۹۷۶	۵/۳۳۷	۴/۶۳۹

	Acoustic enclosure	محفظه آکوستیک
یا "کارگیر" یا "گیراوار"	Fixture	فیکسچر
سوختیژن کوتاه شده سوخت و اکسیژن	High velocity oxy-fuel spraying HVOF	اسپری سوخت و اکسیژن با سرعت زیاد

تقدیر و تشکر

آزمون فروشدگی	Penetration test	تست فرو رونده
مدول یانگ؛ پیمون یانگ	Youngs moduls	مدول الاستیک
	Charpy impact test	آزمون ضربه شاریپی
ماشین شن پاش	Blast machine	دستگاه بلاست
	Feed powder	دستگاه پاشش پودر
	Thermometer	ترمومتر
"سیمبری"	Wire cut	دستگاه وایر کات

مراجع

- [1] "Drilling Industry Magazine," no 12 and 13, p. 164, 2017.
- [2] Saini, H. D. Kumar and V. N. Shukla, "Hot Corrosion behaviour of Nanostructured Cermet based Coatings Deposited by Different Thermal Spray Techniques: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.055>
- [3] J. A. Joyce , D. Wells, B. Stoltz, L. Shelton, P. Jacobs and R. E. Link, "Evaluating the Fracture Toughness of Layered Pressure Vessel Steels," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 207, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.039>
- [4] F. Fanicchia, X. Maeder, J. Ast, A. A. Taylor, Y. Guo, M. N. Polyakov, J. Michler and D. A. Axinte "Residual stress and adhesion of thermal spray coatings: Microscopic view by solidification and crystallisation analysis in the epitaxial CoNiCrAlY single splat," *Materials & Design*, vol. 153, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.040>
- [5] P. Lin, J. Guan, H. Peng and J. Shi, "Horizontal cracking and crack repair analysis of a super high arch dam based on fracture toughness," *Engineering Failure Analysis*, vol. 97, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.036>
- [6] H. F. Li, Q. Q. Duan, P. Zhang, X. H. Zhou, B. Wang and Z. F. Zhang "The quantitative relationship between fracture toughness and impact toughness in high-strength steels," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 211, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.03.003>
- [7] E. PourSaidi and M. KhoshNejhad, "Investigation and determination of changes in mechanical properties of plasma spray heat-resistant coatings under thermal loading using the indentation test method," Master Thesis, Zanjan Univesrity, Iran, 2017.
- [8] M. E. Alami, S. Feli and Gh. Sarifi, " Modeling the impact of molten particles on the substrate," Master Thesis, Razi Univesrity, Iran, 2012.

- [9] S. Mansouri, S. Mirzaei, M. Shariati and N. Ziari, "Evaluation of the accuracy of different methods for measuring rock fracture toughness in tension and shear conditions using laboratory studies and numerical modeling," Master Thesis, Shahrood Univesrity, Iran, 2013.
- [10] S. H. Hashemi, M. KimiaBakhsh and M. Rezai Yekta, "Experimental and numerical determination of fracture toughness using Charpy impact test data in API X65 grade gas transmission pipe steel," ISME 2011. <https://doi.org/10.22060/mej.2013.316>
- [11] F. Ashna Ghasemi, F. Ali Gholi Zade and A. Poor Kamali, "Experimental Investigation of the Effect of Temperature on the Low Velocity Impact Response of Grooved Aluminum Plates Repaired by Metal Laminated Composite Adhesives (FML)," *Modares Mechanical Engineering Journal*, vol. 14, no. 9, 2014.
- [12] R. Ahadi, H. Harati Zadeh and M. Mohammadi, "Investigation of mechanical properties and abrasion resistance of titanium-based ceramic nanocoatings," Master Thesis, Shahrood Univesrity, Iran, 2019.
- [13] S. Matthews, and L.M. Berger, "Inter-diffusion between thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings and an Alloy 625 substrate during long-term exposure at 500 °C, 700 °C and 900 °C," *Journal of Alloys and Compounds*, vol 770. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.189>
- [14] S. Nouroozi, R. Moharrami, H.R. Salimi and M. Jalali, "Evaluation of the effect of effective parameters of HVOF thermal spraying process on residual stress and bond strength of WC-12Co coating ," Master Thesis, Nooshirvani Babol Univesrity, Iran, 2013.



Study of the roughness effect on drag coefficients in a flow around a 2D re-entry capsule*

Research Article

Samira Sourani¹, Morteza Bayareh² , and Alireza Shateri³

 [10.22067/jacsm.2025.93726.1333](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.93726.1333)

Abstract--In this paper, numerical simulations are used to evaluate pressure and velocity variations at different points on the capsule's surface at three different Reynolds numbers. The results indicate that the surface roughness of the capsule can lead to increased friction in the boundary layer and pressure drop in the rear region of the capsule, which affects the drag coefficient and contributes to the formation of vortex regions. The final values of the drag coefficient for Reynolds numbers of 10^2 , 10^3 , and 10^6 are 1.69, 1.687, and 1.63, respectively, which indicates that the drag coefficient decreases with an increase in the Reynolds number. The roughness influences the distribution of pressure and velocity contours, causing instability and non-uniformity in the flow. The maximum pressure in the presence of roughness decreases by 1.35 Pa compared to the smooth condition. This study can help improve their performance under various operational conditions.

Keywords: Terms--Re-entry capsule, Surface roughness, Vortex, Drag coefficient, Pressure coefficient.

1- Introduction

The term capsule is generally used to describe various types of spacecraft, including crewed spacecraft, planetary probes, and flight maneuvers [1]. Over a period of more than 60 years, experimental and computational studies on the aerothermodynamics of reentry capsules have been conducted [2]. Research on safe reentry initially began analytically and was later supplemented with experimental tests for verification. The return of the capsule from orbit to Earth consists of three essential phases: entry, descent, and landing [1]. Due to the lack of control surfaces in most reentry capsules, determining and controlling aerodynamic forces and moments throughout the return trajectory at all speeds is of particular importance [3]. Dutta et al. [6] compared pre-flight atmospheric models with in-space measurements, which indicated under-predictions in the upper atmosphere. Priyadarshi and Mittal [7] optimized

system-level design objectives, cross-range, and total mass within a multi-objective and multi-disciplinary framework. Their effort was to improve the accuracy of the participating strands while maintaining the execution speed of the strand modules. The configuration features were analyzed on the Pareto front and compared with the optimization results that used a less accurate aerodynamic model.

The literature review shows that the effect of roughness on the hydrodynamics of flow around a return capsule has not been examined so far. On the other hand, placing two stepped surfaces in the rear section of the capsule and examining their effect on the changes in pressure coefficient and drag coefficient is another innovation of the present work. Accordingly, in the present study, the effect of roughness on the aerodynamics of capsule motion and its drag coefficient has been examined using ANSYS Fluent software. Next, the geometry, governing equations, numerical grid used, and simulated boundary conditions are examined, followed by the presentation of the simulation results.

2- Problem Description

The geometry selected in the present study is a reentry capsule, the dimensions and geometric specifications of which are shown in Fig. 1. The basis for selecting the geometry in this study is inspired by the study of Edquist et al. [6]. The basic reentry capsule consists of three analytical surfaces, which are a spherical section, a toroidal section, and an incomplete conical section, along with a step at the rear of the reentry capsule.

* Manuscript received 2025 May 26, Revised 2025 June 18, Accepted 2025 July 12.

¹ Master student, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

² Corresponding author. Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Email: m.bayareh@sku.ac.ir

³ Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

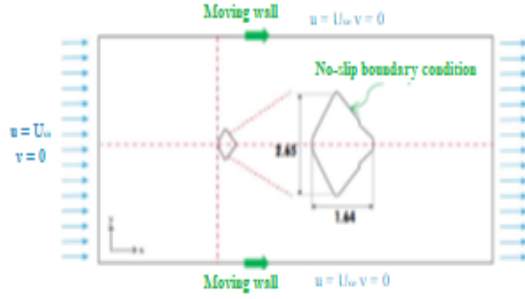


Fig. 1. Schematic of the entry capsule and boundary conditions.

3- Governing Equations

Assuming a turbulent and unsteady flow, the averaged continuity and Navier-Stokes equations for an incompressible fluid are expressed as follows.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

where $\bar{u}_i$, $\bar{p}$, ν , and ρ represent the mean velocity, mean pressure, kinematic viscosity, and fluid density, respectively. Additionally, u'_i and u'_j are the fluctuating velocity components. To model the term $\overline{u'_i u'_j}$, the k- ϵ turbulence model is used.

4- Grid Study And Validation

To ensure the accuracy of fluid properties near the wall, a boundary layer mesh with a maximum of $y^+ = 12$ is considered. The distance from the first node to the surface of the body is 0.0001 meters with a growth rate of 1.2. It should be noted that the number of computational elements in the selected network is 823946. Fig 2 illustrates a schematic of the grid used for the present simulations.

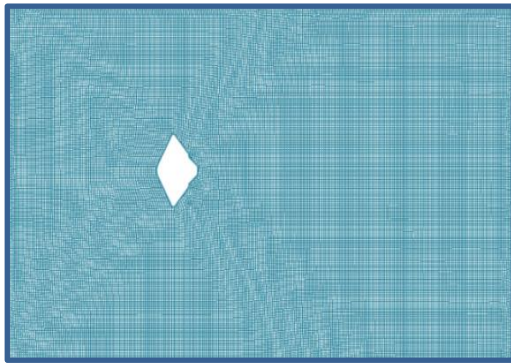


Fig. 2. Schematic of the grid employed for the present simulations.

To ensure the accuracy of the present numerical solution, the results obtained from the flow around a two-dimensional cylinder with a circular cross-section, as presented by Singh and Mittal [7], are compared with the results obtained from the present work. They used a

turbulent model of large eddy simulation and reported the pressure and drag coefficients at various angles. Table I shows the changes in the pressure coefficient with respect to the angle. This angle at the front stagnation point is equal to zero and gradually increases until it reaches an angle of 190 degrees at the rear of the cylinder. The values mentioned in this table indicate a good agreement between the results obtained from the two turbulence models mentioned, namely, the large eddy simulation turbulence model and the k- ϵ turbulence model.

Tabel. I Comparison of pressure coefficient values obtained from the current work and the results reported by Singh and Mittal [7].

Angle (degree)	0	20	40	60	80
Present work	1	0.59	-0.535	-1.841	-2.446
Singh and Mittal [7]	1	0.58	-0.52	-1.738	-2.43

5- Results

The surface roughness of the capsule can significantly affect its aerodynamic performance. Surface roughness can affect boundary layer formation, turbulence generation, and pressure distribution. In general, a rough surface increases flow attachment and separation in specific areas, which leads to an increase in drag force. In this study, a roughness of 0.5 mm is applied to the surface of the capsule, and the results of the changes in the drag coefficient are shown in Fig. 3. The maximum pressure in the presence of roughness decreases by 1.35 Pa compared to the smooth condition. The maximum velocity also changes to 98.8 m/s, which, compared to previous values, results in a decrease in velocity.

6- Conclusion

This paper analyzes the impact of surface roughness on the drag coefficient, pressure coefficient, and the dynamic behavior of the flow around reentry capsules. The results of the numerical simulations indicate that surface roughness significantly affects the drag force and boundary layer characteristics. For three Reynolds numbers, the results indicate a decrease in the drag coefficient with an increase in the Reynolds number. Additionally, under rough conditions, the drag force is on average 15 percent higher than under smooth conditions. At the nose of the capsule's front curve, the highest pressure exists, which increases to 3.97×10^{-7} Pa for $Re = 10^2$. The stable value of the drag coefficient for $Re = 10^2$, 10^3 , and 10^6 is 1.69, 1.687, and 1.63, respectively, indicating that the drag coefficient decreases with an increase in the Reynolds number.

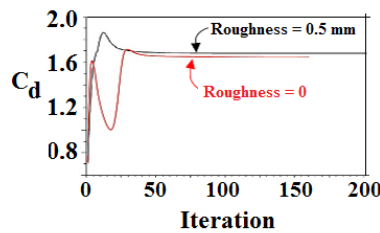


Fig. 3. The effect of surface roughness on the changes in drag coefficient around the recirculating capsule at $Re = 10^3$.

References

- [1] J. Gal-Edd and A. Chevront, "The OSIRIS-REx Asteroid Sample Return Mission operations design," IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, pp. 1-9, 2015. doi: 10.1109/AERO.2015.7118883.
- [2] R. Mehta, "Influence of geometrical parameters of reentry capsules on flow characteristics at Mach 6," *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, vol. 11, p. 177, 2024. <https://doi.org/10.12989/aas.2024.11.2.177>
- [3] P.A. Boeder, C.E. Soares, "Mars 2020: mission, science objectives and build, Systems Contamination: Prediction, Control, and Performance," *SPIE*, pp. 1148903, 2020.
- [4] S. Dutta, C.D. Karlgaard, D. Kass, M. Mischna, G.G. Villar, "Postflight Analysis of Atmospheric Properties from Mars 2020 Entry, Descent, and Landing," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 60, pp. 1022-1033, 2023. <https://doi.org/10.2514/1.A35561>
- [5] P. Priyadarshi, S. Mittal, "Multi-objective Multi-disciplinary Design Optimization of a Semi-Ballistic Reentry Module," 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, p. 9127, 2010. <https://doi.org/10.2514/6.2010-9127>
- [6] K. Edquist, P. Desai, M. Schoenenberger, "Aerodynamics for the Mars Phoenix Entry Capsule, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit," AIAA2008G7219, 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-7219>
- [7] S.P. Singh, S. Mittal, "Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis," *Int J Numer Meth Fluids*, vol. 47, pp. 75-98, 2005. <https://doi.org/10.1002/fld.807>



بررسی اثر زبری سطح بر ضریب پسا در جریان حول یک کپسول بازگشتی دوبعدی*

مقاله پژوهشی

سمیرا سورانی^(۱) مرتضی بیاره^(۲) علیرضا شاطری^(۳)

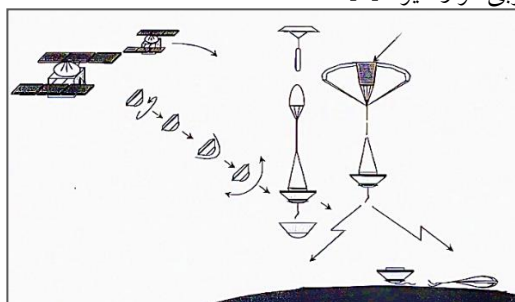
doi 10.22067/jacsm.2025.93726.1333

چکیده در طراحی کپسول‌های بازگشتی به دلیل عدم وجود سطوح کنترلی، همواره به مقوله پایداری دینامیکی توجه شایانی می‌شود. این مطالعه به بررسی جریان اطراف کپسول بازگشتی در شرایط مختلف جریانی و تأثیر زبری سطح بر کانتورهای فشار و سرعت می‌پردازد. جریان اطراف کپسول به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل آیرودینامیکی از جمله طراحی هندسی و ویژگی‌های سطحی است. در این بررسی، از شبیه‌سازی عددی جهت ارزیابی تغییرات فشار و سرعت در نقاط مختلف سطح کپسول در سه عدد رینولدز متفاوت استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که زبری سطح کپسول می‌تواند منجر به افزایش اصطکاک در لایه مرزی و افت فشار در ناحیه پشتی کپسول شود که این امر بر ضریب پسا تأثیر می‌گذارد و به ایجاد نواحی گردابی کمک می‌کند. مقدار پایدار ضریب پسا برای اعداد رینولدز ۱۰۲، ۱۰۳ و ۱۰۶ به ترتیب برابر با ۱/۶۹، ۱/۶۸۷ و ۱/۶۳ است که نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا کاهش می‌یابد. همچنین، توزیع کانتورهای فشار و سرعت تحت تأثیر این زبری‌ها قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که سطوح زیر باعث ناپایداری و عدم یکنواختی در جریان می‌شوند. حداکثر فشار در حضور زبری نسبت به حالت بدون زبری به مقدار ۳۵/۱ پاسکال کاهش می‌یابد. این مطالعه می‌تواند به بهبود عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف کاربردی کمک کند.

واژه‌های کلیدی کپسول بازگشتی، زبری سطح، ورتکس، ضریب پسا، ضریب فشار.

مقدمه

های بازگشتی به دلیل پیچیدگی تأثیر پارامترها بر یک‌دیگر و همچنین عدم درک صحیح فیزیکی گردابه‌های جدا شده، باعث شده تا این موضوع هنوز یکی از مباحثی باشد که در دنیا پس از دهه‌ها بررسی و تحقیق همچنان مورد مطالعه به صورت عددی و تجربی قرار گیرد [4].



شکل ۱ نحوه‌ی فرود کپسول بازگشتی [1]

اصطلاح کپسول معمولاً برای توصیف انواع فضاپیماها از جمله فضاپیماهای سرنشین‌دار، کاوشگرهای سیاره‌ای و مانورهای پروازی به کار می‌رود [1]. طی دوره‌ای بیش از ۶۰ سال، مطالعات تجربی و محاسباتی بر روی آیرودینامیک کپسول‌های بازگشتی انجام شده است [2]. تحقیقات در زمینه بازگشت سالم در ابتدا به صورت تحلیلی شروع و سپس برای اطمینان از آزمایشات تجربی بهره برده شده است. بازگشت کپسول از مدار فضایی به زمین شامل سه مرحله اساسی است: ورود، کاهش ارتفاع و فرود (شکل ۱) [1]. به دلیل عدم وجود سطوح کنترلی در اکثر کپسول‌های بازگشتی به جو، تعیین و کنترل نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی در طول مسیر برگشت در همه سرعت‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است [3]. موضوع ناپایداری دینامیکی کپسول -

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۱۱/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.

(۲) نویسنده مسئول: استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.

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

پارامترهای تاثیرگذار بر پایداری دینامیکی به دو دسته کلی پارامترهای هندسی (هندسه قسمت جلو، شعاع واسط، شکل قسمت انتهایی، زبری و مرکز جرم) و پارامترهای محیطی (زاویه حمله، فرکانس نوسان، عدد ماخ، عدد رینولدز و شرایط اتمسفری پرواز) قابل تقسیم هستند. سان و همکاران [5] یک الگوریتم شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی و تحلیل ویژگی‌های آیرودینامیکی یک کپسول بازگشتی با مخروط معکوس بزرگ و سر تیز در حین ورود مجدد فضاپیما به جو ارائه دادند. این الگوریتم اثرات گاز واقعی در دماهای بالا را در نظر می‌گرفت و از معادلات انتقال مؤلفه‌ای برای واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌کرد. نتایج نشان دادند که ویژگی‌های آیرودینامیکی کپسول به طور عمده تحت تأثیر زاویه حمله تنظیمی و ارتفاع پرواز قرار دارند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این اطلاعات برای دینامیک پرواز ورود مجدد و طراحی مسیر پرواز حیاتی است و ایمنی و قابلیت اطمینان را تضمین می‌کند. فضاپیمای مریخ ۲۰۲۰ در تاریخ ۱۸ فوریه ۲۰۲۱ با موفقیت مریخ‌نورد پرسپورنس و هلیکوپتر اینجنویتی را در دهانه جیزرو فرود آورد. ترتیب ورود، فرود و نشستن مأموریت عمدتاً بر اساس مأموریت آزمایشگاه علمی مریخ در سال ۲۰۱۲ بود. دوتا و همکاران [6] مدل‌های جوی پیش از پرواز را با اندازه‌گیری‌های درون‌سفینه مقایسه کردند که نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های کمتر از حد در جو بالایی بودند. پربادارشی و میتال [7] بهینه‌سازی اهداف طراحی سطح سیستم، دامنه عرضی و جرم کل را در یک چارچوب چندهدفه و چندرشته‌ای انجام دادند. تلاش آن‌ها برای بهبود دقت رشته‌های شرکت‌کننده در عین حفظ سرعت اجرای ماژول‌های رشته‌ای بود. ویژگی‌های پیکربندی‌ها در جبهه پارتو تحلیل و با نتایج بهینه‌سازی که از مدل آیرودینامیکی کمتر دقیق استفاده می‌کرد، مقایسه شد. آلن و اگرز [8] مفاهیم بدنه صاف را برای کپسول بازگشتی به جو معرفی کردند که گرمایش آیرودینامیکی را کاهش می‌داد و اصطکاک هوایی بالایی ایجاد می‌کرد. بابینوکس و همکاران [9] تأثیر شکل هندسی روی میرایی نوسانات حرکت را در ورود به اتمسفر سیاره مریخ مورد تحلیل قرار دادند. رسلر و سیزر [10] تأثیر مغناطیس و الکترومغناطیس را روی عملکرد آیرودینامیکی وسیله و همچنین بر روی فاصله موج ضربه‌ای ایجاد شده بر روی بدنه بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد این اثر باعث پخش و فاصله گرفتن قابل ملاحظه موج ضربه‌ای از

بدنه می‌شود. اصلانف [11] حرکت و کنترل به کمک طناب را برای یک کپسول بازگشتی مورد بررسی قرار داد. کارایی فرآیند ترمزگیری کپسول به زاویه انحراف بستگی داشت. هدف نویسنده یافتن قانون کنترل طول بود که امکان افزایش زاویه انحراف نسبت به عمود محلی را فراهم کند. او نتیجه گرفت که قانون کنترل ممکن است در مرحله نهایی به دو گزینه ممکن برای انجام مانور بازگشت به کمک طناب اعمال شود: رهاسازی ایستا و پویا. شبیه‌سازی‌های عددی نشان دادند که اعمال قانون کنترل امکان کاهش طول مورد نیاز برای مانور بازگشت به جو را فراهم می‌کند. کیز و هفتر [12] به مطالعه جت خلاف جریان پرداخته و دریافتند که استفاده از این جت موجب افزایش درگ در هنگام فرود در اتمسفر می‌شود که این درگ با افزایش فشار کل جت خروجی افزایش می‌یابد. فدل و همکاران [13] قابلیت اجرایی سیستم کنترل آیرودینامیکی بر روی یک کپسول بازگشتی مکانیکی قابل استقرار را بررسی کردند تا دقت فرود را افزایش دهند. استراثری کنترل شامل انحراف مستقل فلاپ‌ها برای تنظیم کپسول و تولید نیروی بالابر و نیروی جانبی بود. یک الگوریتم کنترل توسعه و پیاده‌سازی شد و در یک محیط شبیه‌سازی آزمایش شد که نتایج خوبی در کاهش پراکندگی‌ها در محل فرود نشان داد. کلیف و توماس [14] به بهینه‌سازی ضرایب آیرودینامیکی کپسول آپولو برای بهبود پایداری به صورت عددی و تجربی پرداختند. یانگ و رادسپیل [15] به کمک شبیه‌سازی عددی، رفتار دینامیکی کپسول آپولو و تأثیر هندسه جلو و پشت بر رفتار گشتاور پیچشی را بررسی کردند. بروک و همکاران [16] به کمک نتایج تست تونل باد محدوده بالستیک یک کپسول بازشونده بازگشتی و پایداری دینامیکی را بررسی و سپس با شبیه سازی عددی رفتار توزیع فشار در چند نقطه را بررسی کردند. استرن و همکاران [17] نیز پایداری دینامیکی یک کپسول بازگشتی در نوسانات آزاد را بررسی نمودند. پری و همکاران [18] رفتار آیرودینامیکی و آیرودینامیک حرارتی یک کپسول را پس از باز کردن چتر نجات در مرحله ورود مجدد به جو مریخ بررسی و مدل اختشاشی شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ (LES) استفاده گردید. نتایج نشان دادند که امواج ضربه‌ای و انبساطی، گرادیان‌های فشار بالا، چگالی، دما و جریان حرارتی به سمت جریان هوا و بدنه وجود دارد که به تولید، جذب و تقویت آشفته‌گی از طریق امواج ضربه‌ای اشاره دارد. پلاکو و همکاران

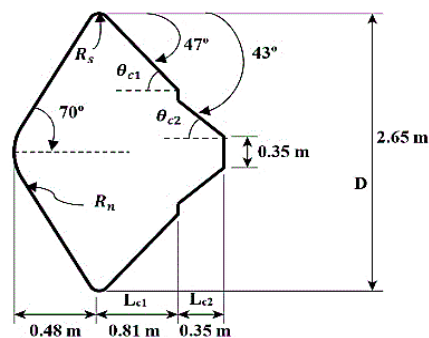
آورده می‌شود.

توصیف مسأله

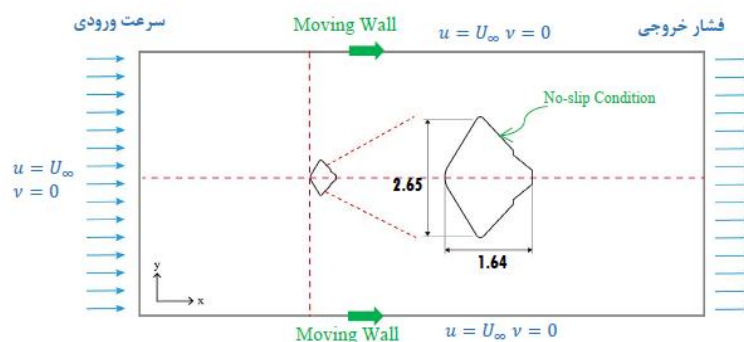
هندسه انتخاب شده در پژوهش حاضر یک کپسول بازگشتی است که در شکل (۲-الف) ابعاد و مشخصات هندسی آن نشان داده شده است. مبنای انتخاب هندسه در این پژوهش الهام گرفته از مطالعه ادکوئیست و همکاران [20] است. کپسول بازگشتی مبنا از سه سطح تحلیلی تشکیل شده که عبارت است از یک بخش کروی، یک بخش حلقوی و یک بخش مخروطی ناقص به همراه یک پله در عقب کپسول بازگشتی. اگر چه مجموعه منحصر به فردی از پارامترهای هندسی برای توصیف این پیکربندی وجود ندارد، ولی پارامترهای مورد نیاز برای تعریف شکل کپسول بازگشتی چنین است: شعاع دماغه کپسول (R_n)، شعاع جانبی کپسول (R_s)، طول قسمت مخروطی اول (L_{c1})، طول قسمت مخروطی دوم (L_{c2})، زاویه قسمت مخروطی اول (θ_{c1})، زاویه قسمت مخروطی دوم (θ_{c2}) و قطر کپسول (D) [17]. شکل (۲-ب) دامنه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی مسأله حاضر را نشان می‌دهد که در بخش بعد به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

[19] شبیه‌سازی‌هایی با دقت بالا برای بررسی حرکت یک کپسول ورودی در رژیم پرواز مافوق صوت در زوایای حمله مختلف در جو مریخ انجام دادند. هدف درک پدیده‌های بحرانی ناپایدار که در مرحله فرود به وجود می‌آیند و نیز طراحی بهینه برای اطمینان از ورود ایمن به جو بود. آن‌ها گزارش کردند که الگوهای اغتشاشی به دست آمده از مدل اغتشاشی شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ به ما این امکان را می‌دهند که خواص جریان و پاسخ کپسول را هم در فضا و هم در زمان ارزیابی کنیم و توجه ویژه‌ای به تحلیل حرکات آشفته‌ای که مسئول دینامیک نوسانی و ناپایدار هستند، داشته باشیم.

تاریخچه مطالعات عددی پیشین نشان می‌دهد اثر زبری بر هیدرودینامیک جریان حول کپسول برگشتی تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. از سوی دیگر، قرار دادن دو سطح پله‌ای شکل در بخش عقبی کپسول و بررسی اثر آن‌ها بر تغییرات ضریب فشار و ضریب پسا دیگر نوآوری کار حاضر است. بر این اساس، در پژوهش حاضر، اثر زبری بر آیرودینامیک حرکت کپسول و ضریب پسای آن با کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت بررسی شده است. در ادامه هندسه، معادلات حاکم، شبکه عددی استفاده شده و شرایط مرزی شبیه‌سازی شده بررسی و سپس، نتایج شبیه‌سازی



(الف)



(ب)

شکل ۲ (الف) هندسه کپسول بازگشتی و (ب) دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مسأله حاضر

معادلات حاکم

با فرض جریان مغشوش و ناپایا، معادلات متوسط‌گیری شده پیوستگی و ناویر-استوکس برای یک سیال تراکم‌ناپذیر به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

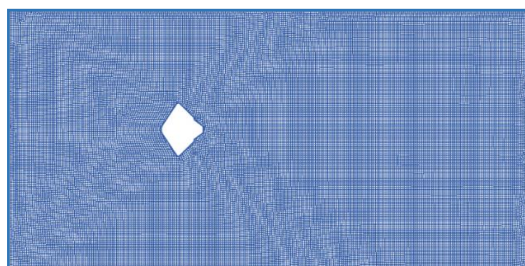
که $\bar{u}_i$ ، $\bar{p}$ و ν و ρ به ترتیب نمایانگر سرعت متوسط، فشار متوسط، لزجت سینماتیکی و چگالی سیال هستند. همچنین، u'_i و $\overline{u'_i u'_j}$ مولفه‌های نوسانی سرعت هستند. جهت مدل کردن جمله $\overline{u'_i u'_j}$ از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استفاده می‌شود. این مدل اغتشاشی مدلی دو معادله‌ای است که در عین ساده بودن، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و به طور گسترده‌ای در دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان مغشوش در اطراف هندسه‌های پیچیده مانند کپسول‌های بازگشتی استفاده می‌شود. این مدل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اتلاف آن (ϵ) حل می‌کند و فرض می‌کند که لزجت آشفتگی ایزوتروپیک است. این مدل می‌تواند ویژگی‌های مهم جریان مانند وقوع جدایش جریان و رفتار لایه مرزی را به خوبی به تصویر بکشد که در شبیه‌سازی جریان حول کپسول برگشتی قابل مشاهده هستند.

در تحلیل جریان پایا و تراکم‌ناپذیر در اطراف یک کپسول بازگشتی، تعریف شرایط مرزی مناسب بسیار اهمیت دارد؛ زیرا این شرایط موجب می‌شود که رفتار جریان در ورودی و خروجی و همچنین در سطوح تماس با مرز مشخص شود. شرط مرزی عدم لغزش روی سطوح کپسول در نظر گرفته شده و سطوح بالا و پایین دامنه محاسباتی همان سرعت جریان آزاد در ورودی را دارند. مطابق شکل (۵)، دامنه محاسباتی در جهت جریان تا ده برابر قطر هیدرولیکی کپسول در پشت جسم ادامه یافته است تا امکان مشاهده تغییرات جریان در پشت کپسول و نیز محاسبه دقیق‌تر ضرایب پسا و افت فشار حاصل گردد. سرعت جریان در راستای عمودی در ورودی و دیواره‌ها صفر است. سیال مورد استفاده در این پژوهش هوا است اما به دلیل سرعت اندک، جریان سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است.

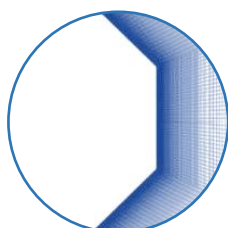
مطالعه شبکه

انتخاب نوع شبکه محاسباتی بستگی به شکل هندسی مدل و پیچیدگی جریان دارد. در اینجا به دلیل هندسه دوبعدی و ناپایا بودن جریان از مش ساختاریافته استفاده شده است [21]. اندازه مش باید به گونه‌ای انتخاب شود که قادر به نمایش جزئیات مهم جریان باشد. مش‌های ریزتر دقت بیشتری دارند، ولی زمان محاسبه را افزایش می‌دهند. در شکل (۳-الف) شبکه‌بندی هندسه کپسول بازگشتی نشان داده شده است. توجه ویژه به مش اطراف سطوح مرزی ضروری است، زیرا رفتار جریان در این نواحی نقش مهمی ایفا می‌کند. از آنجا که شبکه‌بندی مناسب و دقیق می‌تواند به بهبود نتایج شبیه‌سازی و کاهش خطاهای تحلیلی کمک کند، باید شبکه محاسباتی را در نزدیکی سطوح مرزی ریزتر و منظم‌تر طراحی کرد (شکل ۳-ب).

در شبیه‌سازی جریان سیال اطراف یک کپسول بازگشتی، شبکه‌بندی یک مرحله بحرانی است که تأثیر زیادی بر دقت و کیفیت نتایج شبیه‌سازی دارد. برای شبکه‌بندی هندسه از شبکه‌بندی ساختاریافته استفاده شده است. برای اطمینان از دقیق بودن خواص سیال در نزدیکی دیواره، شبکه بندی لایه‌مرزی با حداکثر $y^+ = 12$ در نظر گرفته شده است. فاصله اولین گره تا سطح جسم 0.001 متر با نرخ رشد $1/2$ است. لازم به ذکر است که تعداد المان‌های محاسباتی شبکه انتخاب شده برابر با 823946 است.



(الف)



(ب)

شکل ۳ (الف) شبکه‌بندی با سازمان حول کپسول بازگشتی و (ب)

شبکه‌بندی در لایه مرزی اطراف کپسول بازگشتی

اعتبارسنجی

جهت اطمینان از حل عددی حاضر، نتایج حاصل از جریان حول یک استوانه دوبعدی با سطح مقطع دایره که توسط سینگ و میتال [22] ارائه شده است، با نتایج حاصل از کار حاضر مقایسه می-گردد. آن‌ها از مدل اغتشاشی شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ استفاده نموده و ضرایب فشار و پسا را در زوایای مختلف گزارش نمودند. جدول (۱) تغییرات ضریب فشار را به ازای زاویه نشان می‌دهد. این زاویه در نقطه سکون جلویی برابر با صفر است و بتدریج زیاد می‌شود تا به زاویه ۱۹۰ درجه در پشت استوانه برسد. مقادیر ذکر شده در این جدول بیانگر تطابق مناسب بین نتایج حاصل از دو مدل اغتشاشی ذکر شده؛ یعنی، مدل اغتشاشی شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ و مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$ است.

جدول ۱ مقایسه مقادیر ضریب فشار به دست آمده از کار و حاضر و نتایج گزارش شده توسط سینگ و میتال [22]

زاویه (درجه)	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰
کار حاضر	۱	۰/۵۹	-۰/۵۳۵	-۱/۸۴۱	-۲/۴۴۶
سینگ و میتال [20]	۱	۰/۵۸	-۰/۵۲	-۱/۷۳۸	-۲/۴۳

نتایج

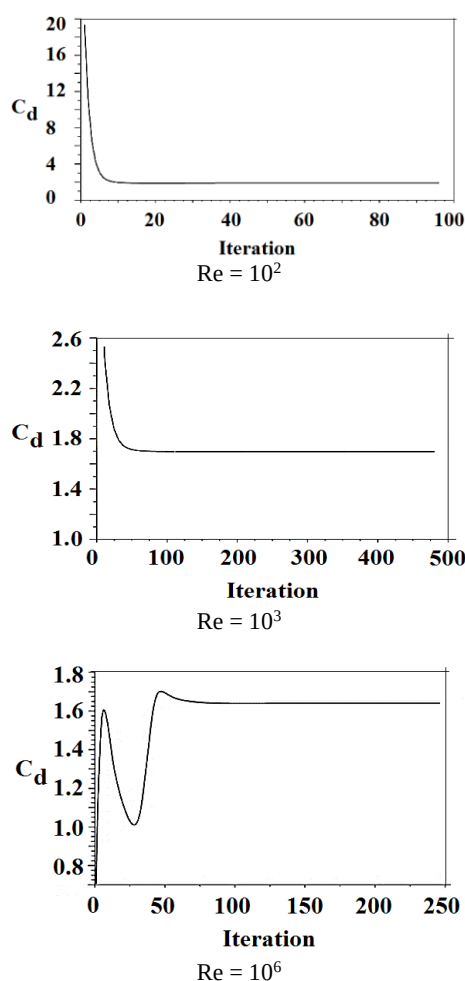
کپسول‌های بازگشتی به طور خاص در سیستم‌های انتقال سیالات و جمع‌آوری داده‌ها به کار می‌روند. بررسی کانتورهای فشار و سرعت در اطراف این کپسول‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط جریان، از جمله توزیع فشار و رفتار سیال در نقاط مختلف کپسول ارائه دهد. این داده‌ها به مهندسان این امکان را می‌دهد که عملکرد بهینه‌تری را در طراحی کپسول‌ها و سیستم‌های هیدرولیکی داشته باشند. از نظر تحلیل عددی، استفاده از روش‌های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند به شبیه‌سازی و مطالعه رفتار جریان در اطراف کپسول کمک کند. در این مطالعه، تمرکز بر روی بررسی کانتورهای فشار و سرعت در سه عدد رینولدز 10^2 ، 10^3 و 10^6 است که تأثیرات مختلف پارامترهای جریانی مانند سرعت ورودی و چگالی سیال را در نتیجه نهایی مورد بررسی قرار خواهد داد (شکل ۴). توزیع سرعت و فشار اطراف کپسول بازگشتی دوبعدی ویژگی‌های متمایزی در رژیم‌های جریان آرام و مغشوش نشان می‌دهند. در جریان آرام، نواحی بازچرخش پایداری در پشت کپسول شکل می‌گیرد که با گردابه‌های کم‌سرعت و لایه برشی مشخصی که از نقطه جدایش شروع می‌شود، شناخته می‌شود. خطوط فشار

نشان‌دهنده انبساط سریع در گوشه کپسول است و پس از آن یک موج شوک فشرده‌سازی مجدد در جریان پایین‌دست قرار دارد که جریان را هم‌راستا می‌کند. لایه برشی آرام دارای گرادیان‌های سرعت هموار و مشتقات نزدیک به صفر در لبه‌های خود است. در جریان مغشوش، توزیع سرعت نشان‌دهنده کوچک شدن نواحی بازچرخش است که به طور مستقیم بر ضریب پسا تأثیر می‌گذارد.

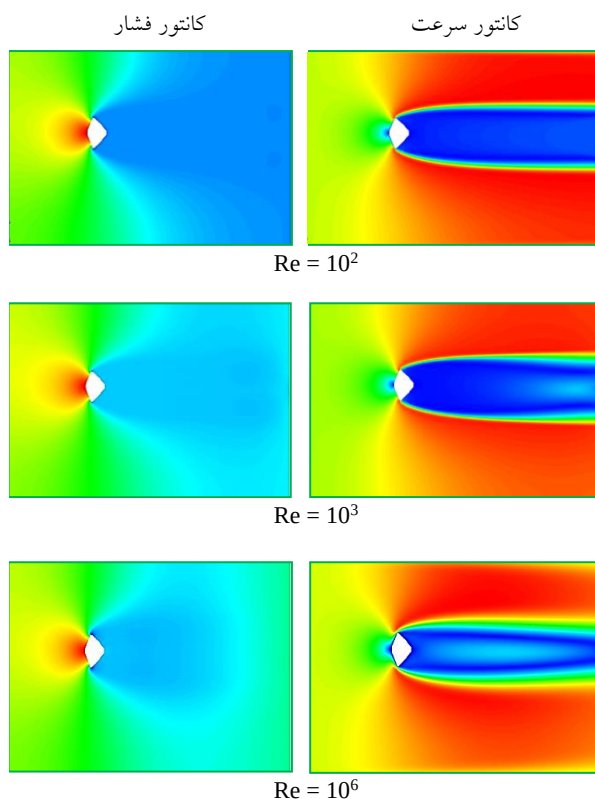
شکل (۴) نشان می‌دهد که در دماغه منحنی جلوی کپسول بازگشتی بیشترین فشار وجود دارد که برای عدد رینولدز 10^2 این مقدار تا $3/97 \times 10^{-7}$ پاسکال افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش فشار در عدد رینولدز 10^3 به $4/83 \times 10^{-6}$ پاسکال می‌رسد که نشان می‌دهد در جریان آرام با افزایش عدد رینولدز، میزان فشار در دماغه منحنی جلوی کپسول افزایش می‌یابد. در پشت کپسول افت فشار وجود دارد که بیشترین میزان افت به پشت منحنی‌های بالایی و پایینی کپسول مربوط است. در اعداد رینولدز 10^2 و 10^3 کمترین فشار به ترتیب برابر با $2/24 \times 10^{-7}$ و $9/76 \times 10^{-6}$ پاسکال است. کانتور فشار برای عدد رینولدز 10^6 به دلیل آشفتگی جریان مقادیر بسیار بزرگتری را نشان می‌دهد. همانند دو حالت قبل، بیشترین فشار متعلق به دماغه منحنی جلوی کپسول است که مقدار 45 پاسکال و بیشترین میزان افت فشار که برای پشت منحنی‌های بالایی و پایینی کپسول است و عدد $17/8$ پاسکال را نشان می‌دهد.

تحلیل کانتور سرعت نشان می‌دهد که در لایه مرزی اطراف کپسول کمترین مقدار سرعت رخ می‌دهد زیرا به دلیل گرادیان فشار معکوس در جلو و پشت کپسول، نقاط سکون در این محل‌ها اتفاق می‌افتد؛ یعنی، سرعت در این نقاط به صفر می‌رسد. بیشترین مقدار سرعت هم مطابق شکل در نواحی دور از کپسول اتفاق می‌افتد که بیشترین مقدار آن برای اعداد رینولدز 10^2 و 10^3 برابر با $8/71 \times 10^{-3}$ و $8/92 \times 10^{-3}$ متر بر ثانیه است. مقایسه کانتورهای سرعت در این دو عدد رینولدز نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، ناحیه افت سرعت در جلوی کپسول کوچکتر شده و کاهش سرعت در پشت کپسول بیشتر می‌شود. کانتور سرعت برای عدد رینولدز 10^6 که جریان مغشوش است نشان می‌دهد نقاط سکون در جلو و پشت کپسول اتفاق می‌افتد اما حداکثر مقدار سرعت به عدد $9/17$ متر بر ثانیه می‌رسد.

فشاری اما افزایش اصطکاک سطحی می‌شود که منجر به دینامیک پیچیده درگ تحت تأثیر رهاسازی گردابه‌ها و نوسانات موج شوک می‌گردد. در اینجا، به دلیل هندسه خاص کپسول بازگشتی، محل جدایش جریان در دو رژیم آرام و مغشوش تفاوتی ندارد. محاسبه ضریب پسا برای جریان با سه عدد رینولدز 10^2 ، 10^3 و 10^6 صورت گرفته است (شکل ۵). مقدار پایدار ضریب پسا برای اعداد رینولدز 10^2 ، 10^3 و 10^6 به ترتیب برابر با $1/69$ ، $1/63$ و $1/687$ است که نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا کاهش می‌یابد. نحوه تغییر این دو پارامتر در شرایط مختلف جریان، غیرخطی و پیچیده است. در جریان‌های آرام، ضریب پسا تقریباً ثابت می‌ماند، در حالی که با افزایش عدد رینولدز به محدوده‌های انتقالی و مغشوش، ضریب پسا نوساناتی را تجربه می‌کند که ناشی از جدا شدن جریان و تغییرات فشار دینامیکی است.



شکل ۵ تغییرات ضریب پسا حول کپسول بازگشتی در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۴ کانتورهای سرعت و فشار در اعداد رینولدز مختلف

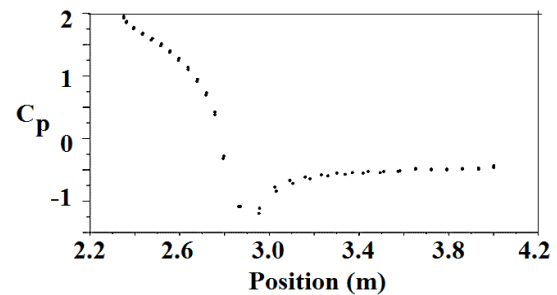
ضریب پسا

تحلیل ضریب پسا برای درک هیدرودینامیک جریان سیالی حول کپسول‌های بازگشتی بسیار مفید است. نیروی پسا ناشی از اصطکاک دیواره و تغییرات فشار است و شرایط مرزی تعیین‌شده در مسأله نقش کلیدی در تحلیل دقیق‌تر این نیرو ایفا می‌کند. شرایط مرزی ورودی بر رفتار سیال و توزیع سرعت تأثیر دارد. با فرض سرعت ثابت و یکنواخت در ورودی، می‌توان به پیش‌بینی دقیق‌تری از حرکت جریان به سمت کپسول و تعامل آن با سطح کپسول دست یافت. همچنین، شرایط مرزی خروجی و دیواره نیز در تعیین توزیع فشار و نیروی اصطکاک مؤثر هستند. ضریب درگ برای یک کپسول بازگشتی دوبعدی تفاوت‌های قابل توجهی بین رژیم‌های جریان آرام و مغشوش نشان می‌دهد. در جریان آرام، ضریب درگ نسبتاً پایداری را به دلیل لایه‌های مرزی نرم و الگوهای جدایش پیش‌بینی‌پذیر نشان می‌دهند که در آن پسای فشاری به دلیل نواحی بازچرخش پایدار پشت کپسول غالب است. با این حال، مدل‌های آرام معمولاً ضریب پسا را کمتر از داده‌های تجربی پیش‌بینی می‌کنند، زیرا ویژگی‌های ناپایدار جریان را به‌درستی شبیه‌سازی نمی‌کنند. در جریان مغشوش، اختلاط بیشتر و تأخیر در جدایش لایه مرزی باعث کاهش پسای

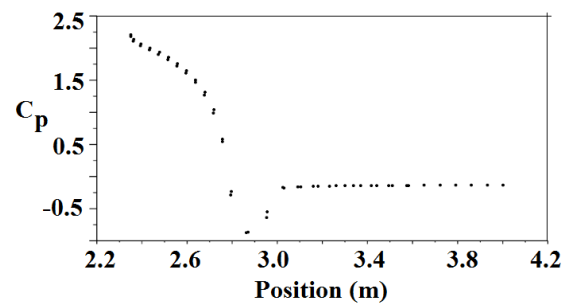
بیشتر باعث ضخیم‌تر شدن لایه برشی و کاهش گستره منطقه بازچرخشی می‌شود و بازیابی فشار پایه را بهبود می‌بخشد. توزیع ضریب فشار در بخش جلویی کپسول کمتر به نوع جریان وابسته است و بیشتر تحت تأثیر اثرات تراکم‌پذیری و برخورد امواج ضربه‌ای قرار دارد. شکل (۶) تغییرات ضریب فشار را در سه عدد رینولدز 10^2 ، 10^3 و 10^6 نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود نقطه‌ای که بیشترین فشار را در کپسول متحمل می‌شود دماغه‌ی جلوی آن است و حداقل فشار وارده در انحنای بالایی و پایینی آن اتفاق می‌افتد.

اثر زبری

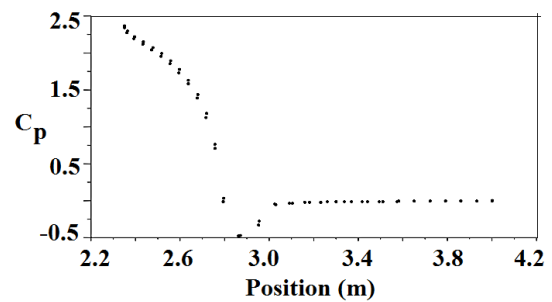
زبری سطح کپسول می‌تواند به طرز قابل توجهی بر روی عملکرد آیرودینامیکی آن تأثیر بگذارد. زبری‌های سطحی می‌توانند بر تشکیل لایه مرزی، تولید آشفتگی و توزیع فشار موثر باشند. به طور کلی، یک سطح زبر سبب افزایش اکتساب و جدایی جریان در نواحی مشخصی می‌شود که این امر منجر به افزایش نیروی پسا می‌گردد. زبری بیشتر سطح کپسول معمولاً به افزایش اصطکاک در لایه مرزی و در نتیجه افزایش ضریب پسا منجر می‌شود که این به دلیل ایجاد تنش‌های برشی بیشتر بر سطح کپسول است. همچنین، زبری می‌تواند فرآیند جدایش جریان را به تأخیر بیندازد، که این موضوع در نواحی تحت فشار پایین (ناحیه پستی کپسول) باعث ایجاد ناحیه خالی و افت فشار می‌شود. به علاوه، این ویژگی زبری می‌تواند بر تعاملات بین جریان و سطح کپسول تأثیر بگذارد که به نوبه خود باعث افزایش نیروی پسا خواهد شد. در این پژوهش زبری برابر با 0.5 میلی‌متر روی سطح کپسول اعمال شده و نتایج تغییرات ضریب پسا در شکل (۷) نشان داده شده است. زبری سطحی همچنین تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و توزیع کانتورهای فشار و سرعت دارند. در سطوح زبر، جریان به دلیل وجود ناهمواری‌ها در سطح، می‌تواند جدا شده و جریان‌های گردابی را ایجاد کند. این جریان‌های گردابی می‌توانند سبب ایجاد نقاط فشار پایین و ناپایداری‌های جریان شوند که در نهایت به تغییر کانتورهای فشار منجر می‌شود. در مقابل، در سطوح صاف یا با زبری کمتر، جریان می‌تواند به طور یکنواخت‌تری بر روی سطح کپسول حرکت کند و کانتورهای فشار و سرعت به طور بهینه‌تری توزیع شوند. این رفتار به‌ویژه در ناحیه پستی کپسول که احتمال جدایش جریان



$Re = 10^2$



$Re = 10^3$



$Re = 10^6$

شکل ۶ تغییرات ضریب فشار حول کپسول بازگشتی در اعداد رینولدز مختلف

ضریب فشار

ضریب فشار برای کپسول بازگشتی در جریان‌های پایا و تراکم‌ناپذیر به عنوان یک پارامتر کلیدی در تحلیل دینامیک سیالات تعریف می‌شود که تغییرات فشار در سطوح کپسول را نسبت به فشار مرجع (عموماً فشار آزاد) اندازه‌گیری می‌کند. در جریان آرام، لایه مرزی در ناحیه شانه کپسول به طور ناگهانی جدا می‌شود و یک منطقه بازچرخشی با فشار پایین در بخش پستی ایجاد می‌کند که ناشی از تکامل لایه برشی آزاد و اختلاط محدود مومنوم است. این موضوع باعث افت قابل توجه ضریب فشار در ناحیه پشت کپسول می‌شود و مقدار آن تحت تأثیر موج انبساطی قرار می‌گیرد. در مقابل، در جریان مغشوش، اختلاط

۵. زبری سطح کپسول تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آیرودینامیکی آن دارد. زبری‌های سطحی می‌توانند بر تشکیل لایه مرزی، تولید آشفتگی و توزیع فشار مؤثر باشند. در این پژوهش، زبری برابر با 0.5 میلی‌متر روی سطح کپسول اعمال شده و نتایج نشان می‌دهد که این زبری سبب افزایش ضریب پسا و تغییر در الگوی جریان و توزیع کانتورهای فشار و سرعت می‌شود.

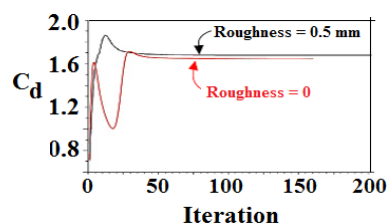
علائم و اختصارات

A	مساحت مبنا
C_D	ضریب پسا
D	قطر کپسول بازگشتی
g	شتاب جاذبه
L	طول کپسول بازگشتی
L_C	طول قسمت مخروطی کپسول بازگشتی
m	جرم کپسول بازگشتی
P	فشار
Pr	عدد پرانتل
Re	شعاع زمین
R_n	شعاع دماغه کپسول بازگشتی
R_s	شعاع جانبی کپسول بازگشتی
S	مساحت سطح کپسول
t	زمان
α	زاویه حمله
θ_C	زاویه قسمت مخروطی کپسول بازگشتی
θ_n	زاویه قسمت کروی دماغه کپسول بازگشتی
μ	لزجت دینامیکی
ρ	چگالی

واژه نامه

پیشنهادی ویراستار	واژه لاتین	پیشنهادی نویسنده
	Re-entry capsule	کپسول بازگشتی
	Drag coefficient	ضریب پسا
	Pressure coefficient	ضریب فشار

بیشتر است، اهمیت دارد. حداکثر فشار در حضور زبری نسبت به حالت بدون زبری به مقدار $35/1$ پاسکال کاهش می‌یابد. مقدار ماکزیمم سرعت هم تا $8/98$ متر بر ثانیه تغییر کرده و در مقایسه مقادیر قبلی کاهش سرعت را نیز به دنبال دارد.



شکل ۷ تأثیر زبری سطح بر تغییرات ضریب پسا حول کپسول بازگشتی در عدد رینولدز 10^3

نتیجه‌گیری

این پژوهش به تحلیل تأثیر زبری سطح بر ضریب پسا، ضریب فشار و رفتار دینامیک جریان اطراف کپسول‌های بازگشتی پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که زبری سطح به‌طور قابل توجهی بر نیروی پسا و ویژگی‌های لایه مرزی تأثیر می‌گذارد. نتایج عمده پژوهش حاضر به شرح زیر است:

۱. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده برای سه عدد رینولدز مختلف، نتایج نشان‌دهنده کاهش ضریب پسا با افزایش عدد رینولدز است. همچنین، در شرایط زبری، نیروی پسا به‌طور میانگین ۱۵ درصد بیشتر از شرایط صاف است.

۲. در دماغه منحنی جلوی کپسول بیشترین فشار وجود دارد که برای عدد رینولدز 10^2 این مقدار تا $3/97 \times 10^{-7}$ پاسکال افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش فشار در عدد رینولدز 10^3 به $4/83 \times 10^{-6}$ پاسکال می‌رسد که نشان می‌دهد در جریان آرام با افزایش عدد رینولدز، میزان فشار در دماغه منحنی جلوی کپسول افزایش می‌یابد. در اعداد رینولدز 10^2 و 10^3 کمترین فشار به‌ترتیب برابر با $2/24 \times 10^{-7}$ و $9/76 \times 10^{-6}$ پاسکال است.

۳. مقدار پایدار ضریب پسا برای اعداد رینولدز 10^2 ، 10^3 و 10^6 به ترتیب برابر با $1/69$ ، $1/687$ و $1/63$ است که نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا کاهش می‌یابد.

۴. نقطه‌ای که بیشترین فشار را در کپسول متحمل می‌شود دماغه‌ی جلوی آن است و حداقل فشار وارده در انحنای بالایی و پایینی آن اتفاق می‌افتد.

تقدیر و تشکر

	Vortex	گردابه
	Turbulence model	مدل اغتشاشی

مراجع

- [1] J. Gal-Edd and A. Chevront, "The OSIRIS-REx Asteroid Sample Return Mission operations design," *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, pp. 1-9, 2015.
- [2] R. Mehta, "Influence of geometrical parameters of reentry capsules on flow characteristics at Mach 6," *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, vol. 11, p. 177, 2024.
- [3] P. A. Boeder, C. E. Soares, "Mars 2020: mission, science objectives and build, Systems Contamination: Prediction, Control, and Performance," *SPIE*, p. 1148903, 2020. <https://doi.org/10.1117/12.2569650>
- [4] G. Pezzella, A. Viviani, "Aerodynamic analysis of a manned space vehicle for missions to Mars," *Journal of Thermodynamics*, vol. 2011, p. 857061, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/857061>
- [5] B. Sun, W. Chen, C. Huang, Y. Long, W. Diao, H. Zhang, "Study on the aerodynamic characteristics of reentry capsule with obtuse head inverted cone under hypersonic chemical nonequilibrium flow," *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, p. 012085, 2024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2882/1/012085>
- [6] S. Dutta, C. D. Karlgaard, D. Kass, M. Mischna, G. G. Villar, "Postflight Analysis of Atmospheric Properties from Mars 2020 Entry, Descent, and Landing," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 60, pp. 1022-1033, 2023. <https://doi.org/10.2514/1.A35561>
- [7] P. Priyadarshi, S. Mittal, "Multi-objective Multi-disciplinary Design Optimization of a Semi-Ballistic Reentry Module," 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, p. 9127, 2010. <https://doi.org/10.2514/1.A35561>
- [8] H. J. Allen and A. J. Eggers, "A study of the motion and aerodynamic heating of ballistic missiles entering the earth's atmosphere at high supersonic speeds," *NACA Technical Report 1381*, 1958.
- [9] T. Babineaux, J. Brayshaw Jr, B. Dayman Jr, D. Nelson, "The influence of shape on aerodynamic damping of oscillatory motion during planet atmosphere entry and measurement of pitch damping at large oscillation amplitudes, (1963).
- [10] E. Resler Jr, W. Sears, "The prospects for magneto-aerodynamics," *Journal of the Aerospace Sciences*, vol. 25, pp. 235-245, 1958. <https://doi.org/10.2514/8.7604>
- [11] V. S. Aslanov, "Swing principle for deployment of a tether-assisted return mission of a re-entry capsule," *Acta Astronautica*, vol. 120, pp. 154-158, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.020>
- [12] J. W. Keyes, J. N. Hefner, "Effect of forward-facing jets on aerodynamic characteristics of blunt configurations at Mach 6," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 4, pp. 533-534, 1967. <https://doi.org/10.2514/3.28900>
- [13] A. Fedele, S. Carannante, M. Grassi, R. Savino, "Aerodynamic Control System for a Deployable Re-entry Capsule," *Acta Astronautica*, vol. 181, pp. 707-716, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.049>

- [14] S. E. Cliff, S. D. Thomas, "The Apollo capsule optimization for improved stability and computational/experimental data comparisons," 2005.
- [15] X. Yang, R. Radespiel, "Longitudinal aerodynamic performance of the Apollo entry capsule near transonic speeds," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 54, pp. 1100-1109, 2017. <https://doi.org/10.2514/1.A33609>
- [16] J. M. Brock, E. C. Stern, M. C. Wilder, "Computational fluid dynamics simulations of supersonic inflatable aerodynamic decelerator ballistic range tests," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 56, pp. 526-535, 2019. <https://doi.org/10.2514/1.A34208>
- [17] E. Stern, V. Gidzak, G. Candler, "Estimation of dynamic stability coefficients for aerodynamic decelerators using CFD," *30th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, p. 3225, 2012. <https://doi.org/10.2514/6.2012-3225>
- [18] L. N. P. Peri, A. Ingenito, P. Teofilatto, "Large-Eddy Simulations of a Hypersonic Re-Entry Capsule Coupled with the Supersonic Disk-Gap-Band Parachute," *Aerospace*, vol. 11, p. 94, 2024. <https://doi.org/10.3390/aerospace11010094>
- [19] L. Placco, M. Cogo, M. Bernardini, A. Aboudan, F. Ferri, F. Picano, "Large-Eddy Simulation of the unsteady supersonic flow around a Mars entry capsule at different angles of attack," *Aerospace Science and Technology*, vol. 143, p. 108709, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108709>
- [20] K. Edquist, P. Desai, M. Schoenenberger, "Aerodynamics for the Mars Phoenix Entry Capsule, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit," *AIAA2008G7219*, 2008. <https://doi.org/10.2514/1.46219>
- [21] D. Dirkx, E. Mooij, "Continuous aerodynamic modelling of entry shapes," *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, p. 6575, 2011. <https://doi.org/10.2514/6.2011-6575>
- [22] S. P. Singh, S. Mittal, "Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 47, pp. 75–98, 2005. <https://doi.org/10.1002/fld.807>



Numerical Investigation of Air Preheater to Determine the Formation of Dew in Corrugated Sheets in Order to Determine the Surfaces with the Possibility of Corrosion

Research Article

Hasan Mohammadi Siboni¹, Hamid Reza Nazif² 

 10.22067/jacsm.2025.90816.1302

Abstract--In steam boilers, in order to increase the efficiency of the power plant, the air required for combustion must be preheated. In this research, rotary air preheater has been investigated in order to reduce the corrosion of its corrugated sheets. With the help of computational fluid dynamics, three-dimensional simulation of the preheater was performed in moving reference coordinates. Assuming the insulation of the walls and the effect of radiation, solving the equations of continuity, momentum and energy was done. The presented results are in good agreement with the experimental data. Corrosion of susceptible surfaces were identified. The most corrosion usually occurs in the exit area of combustion products from the matrix. Therefore, the minimum gas outlet temperature was determined from the point of view of dew point formation. The corrosion process cannot be prevented by changing the rotation speed. Increasing the rotational speed of the rotor in the range of 0.5 to 6 rpm increases the efficiency by 84%.

Keywords: Preheater, Ljungstrom, Dew Point, CFD (Computational Fluid Dynamics).

1- Introduction

Heat exchangers are equipment that cause heat transfer between two fluids at different temperatures. The Ljungstrom air preheater is a type of heat exchanger consisting of a rotating cylinder called a rotor, which is filled with a large number of corrugated plates or heat transfer surfaces. The wave in the plates disturbs the fluid flow and increases the heat transfer rate. The heat transfer surfaces are known as heat transfer elements and are placed inside the basket or baskets and the baskets are placed inside the rotor. According to the temperature conditions, the baskets are placed on top of each other in the form of three cold, middle and hot layers; The two upper layers of the baskets are called the hot layer and the lower layer is called the cold layer. The rotor is divided into two parts by the separator plate located at the top and bottom, on one side the combustion products flow from top to bottom and on the other side air flows from bottom to top. Therefore, air and combustion products necessarily

pass through the corrugated plates in opposite directions. For stable performance, the matrices must be placed alternately in the hot and cold flow paths. The rotor rotates at a low speed of about 0.5 to 4 rpm, in this way the corrugated plates absorb the heat of the combustion products and then give off their heat to the air in the air path, resulting in preheated boiler inlet air. A view of the rotary air preheater can be seen in Fig.1, air preheater can save up to 15% in the fuel cost of power plants [1], which was first used in 1920 by Frederik Ljungstrom to recover the necessary energy in a steam power plant. In steam boilers, the air required for combustion must be preheated to increase the efficiency of the power plant. An increase of 35 to 40 °C in the furnace inlet air temperature can lead to a 2% increase in boiler efficiency and 11.5% fuel savings [2]-[3], also, with better combustion, less soot and ash will be produced. which will have a significant impact on protecting the environment. In the Ljungstrom, if the outlet gas temperature changes by 6 °C, it can affect hundreds to thousands of dollars per year the price of boiler fuel, which can lead to an increase in boiler efficiency by 10% [4].

In present research, the efficiency of the preheater and its temperature distribution were investigated according to the actual conditions in different radiuses and distances from the cold end layer with the aim Determining corrosion-susceptible surfaces in three stages a) with real temperature conditions, b) with the effect of 41 °C increase in inlet air temperature, c) with the effect of 36 °C increase in inlet gas temperature has been studied.

2- Modeling

In the present research, the properties of stainless steel were used, which can be seen in Table 1. To simulate the internal environment of the matrix, the assumption of a porous environment is used for small dimensions and millimeter distances between compact plates, and large

* Manuscript received 2024 November 25, Revised 2024 December 25, Accepted 2025. July 19.

¹ MSc. student, Technical and Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University Qazvin, Iran, **Email:** hasan.m7065@gmail.com.

² Corresponding author. Associate Professor, Technical and Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University Qazvin, Iran, **Email:** nazif@eng.ikiu.ac.ir

dimensions of several meters in the inlet and outlet zones of the Ljungstrom rotary preheater [5]. The existing difference in the distances in the simulation of the plates, causes a huge increase in gridding and calculations, so that it becomes unanalyzable. In such a situation, the assumption of a porous medium can be used in the simulation of the preheater matrix [6].

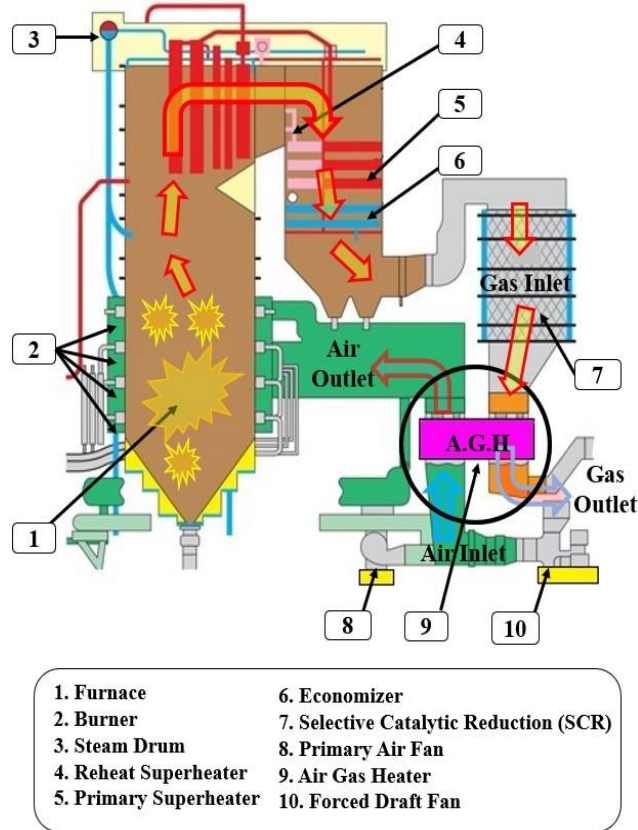


Fig. 1. Rotary air preheater and its installation position in a power plant boiler.

In order to simulate the flow and heat transfer in the air preheater, the Navier-Stokes equations should be used in the porous medium. The Reynolds number, as a measure of whether the flow is laminar or turbulent, it is used for flow through porous media. In the present research, the Reynolds number is 1207, which is less than the critical Reynolds number, and therefore the fluid flow is considered to be laminar. According to the data in the article and the calculations performed, the resulting Rayleigh number is greater than 10^9 and the Richardson number is less than 1. According to these numbers, both buoyancy and inertial forces are important, but the buoyancy force is not very dominant. In fact, it can be assumed that the effects of forced convection are dominant in this problem. An important point in simulating the Jungstrom rotary preheater is the rotation of the matrix and the constancy of the body and the inlet flows. The dew point temperature of sulfuric acid is calculated using the Verhoff and Banchereau equation based on the analysis of flue gases, and this number is in the range of 120 to 140 °C.

Table. 1 Properties of stainless steel [21].

$\alpha(m^2/s)$ Thermal Diffusivity	4.2×10^{-6}
$k_s(w/(m.k))$ Thermal conductivity coefficient	16.26
$C_{p,s}(J/(kg.k))$ Heat Capacity	502.1
$\rho_s(kg/m^3)$ Density	8027.2

3- Solution procedure

To perform calculations and solve the governing equations, the finite volume method, the second-order upstream method is used to discretize the equations, and the coupled algorithm is used to relate the velocity and pressure equations, Matrix modeling was performed with SolidWorks software. To generate the mesh with tetrahedron cells, ANSYS Machining software was used, and ANSYS Fluent software was used to solve the problem. In the present study, the inlet boundary conditions including inlet temperature, inlet pressure, inlet velocity, and porosity in the hot and cold layers and the outlet boundary conditions including outlet temperature and outlet pressure were used. Assuming that the wall around the air preheater is insulated and the thermodynamic properties of the air and smoke side fluids are different, two fluids have been used in the computational field in order to match the theoretical and operational conditions. The density of air fluid is 1.225 kg/m³ and the average heat capacity is a function of a piecewise polynomial in terms of $J/kg.k$.

4- Conclusion

In this research, the temperature distribution of the air preheater was obtained with Fluent software to determine the corrosion-prone surfaces. The analysis of a single-matrix rotary air preheater was performed. The highest corrosion usually occurs in the lower layer of the matrix, when the cold matrix initially enters the gas channel at levels close to the environment (Fig 2). This is caused by the smoke temperature reaching below the dew point, which shows the importance of the minimum exhaust gas temperature.

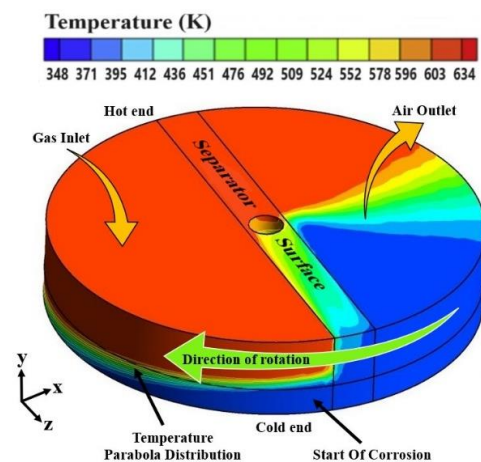


Fig. 2. Air preheater temperature distribution, when the hot end is on top.

The temperature distribution curves of the heating elements show that at the beginning of the matrix rotation (0° position), there is a possibility of acid condensation on all surfaces of the heating element; even in the upper part of the hot layer (Fig 3). The rotation of the matrix towards the hot end rapidly increases the temperature of the heating elements due to heat transfer with the flue (gas flow) gases, especially in the upper layers that are first in contact with the hot flue gases (gas flow). When the rotation of the matrix reaches the 90° position, the temperature of the upper layer of the heating element increases significantly. In the conditions that the temperature in the lower layer of the matrix is still low.

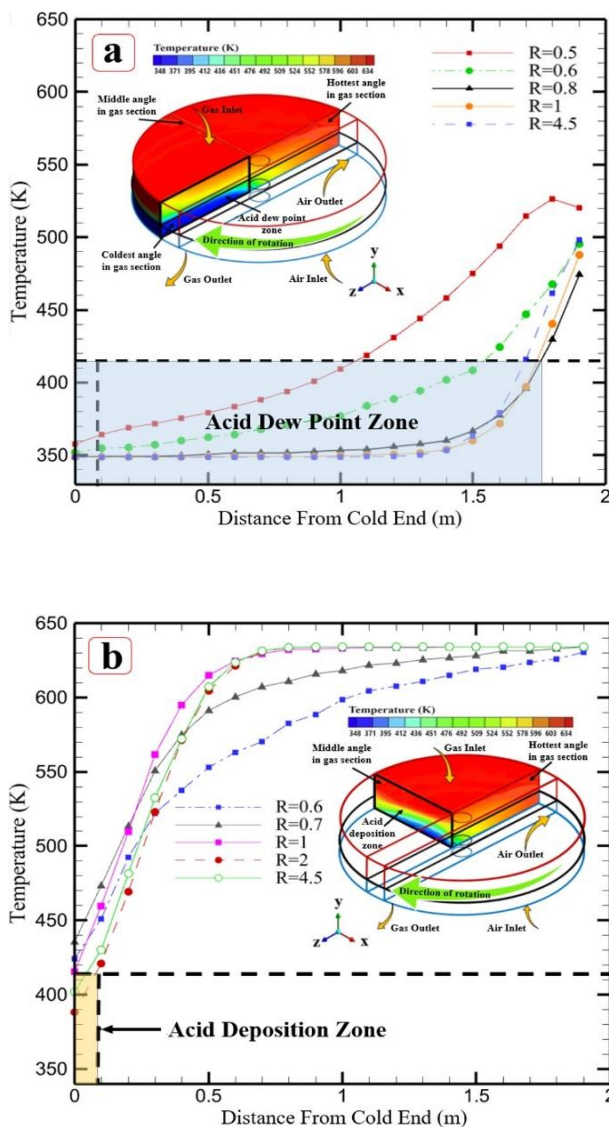


Fig. 3. Air preheater temperature distribution according to real conditions in radiuses and different distances from the cold end layer; (a) The matrix at the beginning of the air flow at the 0° position. (b) The matrix after rotation at the 90° position.

This temperature distribution is shown in Fig. With the further rotation of the matrix (180° position), the heating elements reach their maximum temperature, that is, the temperature of the hot flue gases, in which no acid condensation occurs. The low temperature zone or the so-called critical zone is located at a height of about 600 mm away from the bottom of the cold final layer. to prevent condensation on the matrix and the formation of corrosive acids; A convenient method is to preheat the cold inlet air to a temperature between 67°C and 87°C using a heat exchanger. But according to the dew point temperature of sulfuric acid (120°C to 140°C), which is determined based on the sulfur dioxide of the flue gases, the above preheating should reach a temperature between 112°C to 132°C . Thermal energy for the heat exchanger can be provided by the heater coming from the sub-sections of the turbine. As the inlet air temperature increases, the average outlet gas temperature increases. This phenomenon helps to move away from the dew point temperature of the flow.

References

- [1] Optimization of primary air inlet opening of tri-sector air pre-heater for minimizing primary air pressure drop in air preheater (APH) & to study the effect of variation of rpm on APH performance using CFD analysis M. Tech. dissertation by Mohit Rajput, D. M. Eng. Malaviya National Institute of Technology Jaipur-(2016).
- [2] S. Vulloju et al, Analysis of Performance of Ljungstrom Air Preheater Elements International *Journal of Current Engineering and Technology*, Special Issue-2, (2014). DOI:<http://Dx.Doi.Org/10.14741/Ijcet/Spl.2.2014.94>
- [3] I. Farhadi, F. Veysi, M. Mirza Asgari, Numerical simulation of rotary regenerative air preheater (Ljungstrom) in steam power plant with the aim of optimizing of thermal performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No.03, pp.291-301, (2018). DOI: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.33.4
- [4] R. K. Shah, D. P. Sekulic, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, pp. 3-74, USA John Wiley & Sons, (2003). DOI:10.1002/9780470172605
- [5] L.A. Sphaier, W.M. Worek, Analysis of heat and mass transfer in porous sorbents used in rotary regenerators, *Int. J. Heat Mass Transf.* 47 (14-16) (2004) 3415-3430.<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.01.016>
- [6] N.B. Khedher, S.B. Nasrallah, Three-dimensional modeling and analysis of a porous thermal energy storage system, *J. Appl. Fluid Mech.* 3 (2) (2010) 97-109. DOI: 10.36884/jafm.3.02.11892

- [7] A. Heidari-Kaydan, E. Hajidavalloo / Three-dimensional simulation of rotary air preheater in steam power plant /Applied Thermal Engineering 73 (2014) 397-405.
DOI:10.1016/j.applthermaleng.2014.08.013



بررسی عددی پیش گرمکن هوا جهت تعیین تشکیل شبنم در ورق‌های موجدار برای تعیین سطوح با امکان خوردگی*

مقاله پژوهشی

حمیدرضا نظیف^(۲) حسن محمدی سبینی^(۱) 10.22067/jacsm.2025.90816.1302

چکیده در دیگ‌های بخار به منظور افزایش راندمان نیروگاه، هوای مورد نیاز برای احتراق باید پیشگرم شود. در تحقیق حاضر پیشگرمکن هوای گردشی به منظور کاهش خوردگی ورق‌های موجدار آن مورد بررسی قرار گرفته است. به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی سه بعدی پیش‌گرمکن در مختصات مرجع متحرک انجام شد. با فرض عایق بودن دیواره‌ها و تأثیر تشعشع، حل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی انجام شد. نتایج مقاله با اطلاعات تجربی همخوانی خوبی دارند. سطوح مستعد پدیده خوردگی، شناسایی شدند. بیشترین خوردگی معمولاً در ناحیه خروج محصولات احتراق از ماتریس رخ می‌دهد. لذا حداقل دمای خروجی گاز از نقطه نظر تشکیل نقطه شبنم مشخص شد. نتایج عددی نشان‌دهنده تأثیر صفحه جداکننده، سرعت دورانی، دمای هوا و گاز ورودی بر عملکرد و توزیع دمای پیش‌گرمکن هستند. اثر سرعت چرخشی بر شروع چگالش سیال و نقطه شبنم نشان داد که تغییر سرعت دوران، فرآیند خوردگی را کاهش نمی‌دهد. افزایش سرعت دورانی روتور، در محدوده ۵ تا ۶ دور بر دقیقه بازده را تا ۸۴٪ افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی پیش گرمکن، ژانگستروم، نقطه شبنم، دینامیک سیالات محاسباتی.**مقدمه**

ناحیه سرد می‌نامند. این استوانه دوار توسط دو صفحه جداکننده که در بالا و پایین روتور انتقال حرارت قرار گرفته به دو قسمت تقسیم شده به نحوی که در یک سمت محصولات احتراق از بالا به پایین و در سمت دیگر هوا از پایین به بالا جریان می‌یابد. بنابراین هوا و دود الزاماً از صفحات موج دار و در خلاف جهت یکدیگر می‌گذرند. برای عملکرد پایدار، ماتریس‌ها باید به طور متناوب در مسیر جریان گرم و سرد قرار گیرند. استوانه دوار با سرعت پایین حدود ۵ تا ۴ دور بر دقیقه می‌چرخد، بدین ترتیب صفحات موج دار حرارت محصولات احتراق را جذب نموده و سپس در مسیر هوا، حرارت خود را به هوا داده و به این طریق هوای ورودی به بویلر (Boiler) را پیش گرم می‌نماید. نمایی از موقعیت نصب پیش گرمکن دوار هوا در شکل (۱) ملاحظه می‌شود. نصب پیش گرمکن هوا تا ۱۵٪ در هزینه سوخت

مبدل‌های حرارتی تجهیزاتی هستند که سبب انتقال حرارت بین دو سیال در دماهای مختلف می‌شوند. پیش گرمکن هوای ژانگستروم (Ljungstrom)، نوعی مبدل حرارتی متشکل از استوانه‌ای دوار به نام روتور بوده که توسط تعداد زیادی صفحات موج دار یا همان سطوح انتقال حرارت پر شده است. موج در صفحات، جریان سیال را آشفته و نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. سطوح انتقال حرارت (که به عنوان ماتریس شناخته می‌شوند) به عناصر انتقال حرارت معروف بوده و درون محفظه یا سبدهایی به نام بسکت (Basket) قرار گرفته و محفظه‌ها نیز درون روتور (Rotor) جای می‌گیرند. بسکت‌ها با توجه به شرایط دمایی به صورت سه لایه سرد، میانی و داغ روی هم قرار می‌گیرند؛ دولایه بالایی بسکت‌ها را ناحیه گرم ولایه پایینی را

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۹/۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۲۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی.

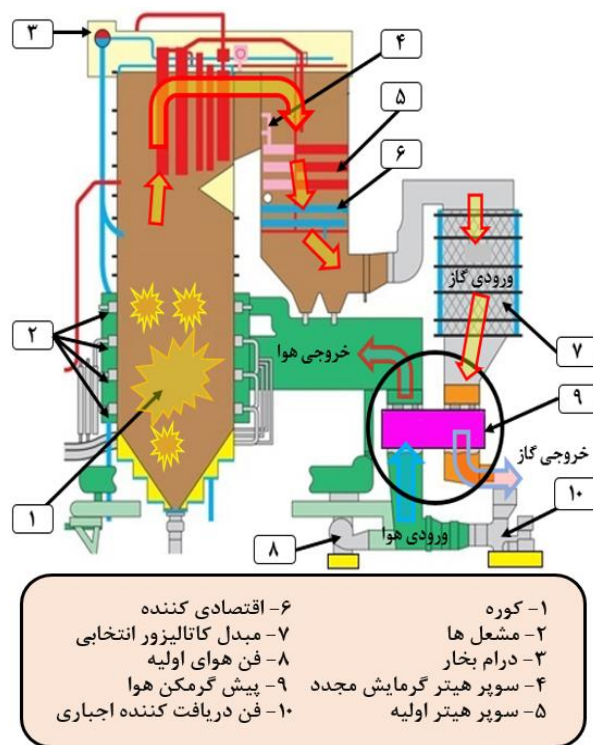
۵. جلوگیری از تخریب تجهیزات دودکش خروجی کوره با کاهش دمای گاز خروجی

از سویی دیگر معایب استفاده از پیش گرمکن هوا عبارتند از:

۱. حساسیت نسبت به خوردگی و زنگ زدگی.
۲. وجود مقداری نشتی از سمت هوا به سمت دود.
۳. رسیدن دمای دود به زیر نقطه شبنم و امکان تشکیل اسید.
۴. تشکیل رسوب روی صفحات انتقال حرارت و کاهش کارایی مبدل.
۵. تغییر شکل نشت بندها به دلیل تنش‌های حرارتی و به تبع آن افزایش میزان نشتی

پیش گرمکن هوای ژانگستروم، مستعد خوردگی است. در مبدل حرارتی ژانگستروم، اگر دمای محصولات احتراق به زیر نقطه شبنم برسد، بازدهی به سرعت کم می‌شود، در این حالت در نتیجه‌ی تشکیل اسید و ترکیب آن با محصولات احتراق، خوردگی و زنگ زدگی حاصل شده و روی صفحات انتقال حرارت رسوب تشکیل می‌شود که تجمع آن روی بسکت‌های ژانگستروم، بر عملکرد حرارتی مبدل تأثیر منفی دارد. ترکیب محصولات احتراق نظیر اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن با بخار آب ایجاد شده، منجر به تشکیل اسید سولفوریک (Sulfuric Acid)، اسید سولفوروس (Sulfurs Acid) و اسید نیتریک (Nitric Acid) می‌شود [7]. در ناحیه سرد که دمای دود تا حد دمای نقطه شبنم اسید کاهش می‌یابد اسیدهای مذکور در اثر چگالش بر روی سطوح سرد نفوذ کرده و موجب خوردگی و ایجاد رسوب می‌گردند [7]. لذا بمنظور جلوگیری از این پدیده صفحات ناحیه سرد به صورت دندانه دار و تخت همانند شکل (۲-الف) می‌باشند که گرفتگی در مسیر جریان سیال ایجاد نشود. خوردگی دما پایین در سوخت نفتی، «خوردگی شبنم اسید سولفوریک» نام دارد که از گوگرد موجود در سوخت جامد ناشی می‌شود. در برابر این نوع خوردگی، از فولاد کم آلیاژ مقاوم در برابر خوردگی (CRLS) یا فولاد کورتن (COR-TEN) در لایه انتهایی سرد پیش گرمکن هوا استفاده می‌شود، که این مهم بجهت رفع مشکل خوردگی است [7]. از سوی دیگر، زمانی که گاز طبیعی مایع (LNG)، در نیروگاه‌های حرارتی، به عنوان سوخت استفاده می‌شود، به اصطلاح خوردگی شبنم آب رخ می‌دهد زیرا عنصر گوگرد در سوخت وجود ندارد. از جمله اقدامات انجام شده در برابر این نوع خوردگی استفاده از فولاد کم کربن ۰.۷٪

نیروگاه‌ها صرفه‌جویی می‌کند [1]، که اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط فردریک ژانگستروم، برای بازیابی انرژی ضروری در نیروگاه بخار بکار رفت. در دیگ‌های بخار، هوای مورد نیاز احتراق، جهت افزایش بازدهی نیروگاه باید پیش گرم شود. افزایش ۳۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس در دمای هوای ورودی به کوره می‌تواند تا ۲٪ افزایش راندمان بویلر و ۱۱/۵٪ صرفه‌جویی در مصرف سوخت را در پی داشته باشد [2,3]، همچنین بر اثر احتراق بهتر، دوده و خاکستر کمتری تولید خواهد شد که تأثیر بسزایی در حفظ محیط زیست خواهد داشت. در ژانگستروم اگر دمای گاز خروجی تا ۶ درجه سلسیوس تغییر کند می‌تواند صداها تا هزاران دلار در سال در قیمت سوخت مصرفی بویلر تأثیرگذار باشد، که این تأثیر می‌تواند منجر به بالا رفتن راندمان بویلر تا ۱۰٪ شود [4].



شکل ۱ پیش گرمکن هوای دوار و موقعیت نصب آن در بویلر یک

نیروگاه [5,6]

مزایای استفاده از پیش گرمکن هوا عبارت است از:

۱. افزایش ظرفیت بویلر.
۲. بهبود احتراق و کنترل کوره.
۳. صرفه‌جویی در مصرف سوخت.
۴. کاهش آلاینده‌های زیست محیطی.

نتایج نشان می‌دهد که در جنس استیل با پوششی از لعاب، میزان تشکیل رسوب و به تبع آن میزان خوردگی کمتر می‌باشد [9]. وارن مطالعه در مورد ژانگستروم به عنوان نوع خاصی از مبدل هوا به هوا را انجام داد که نتیجه آن، تایید حداقل کاهش ۱۰ درصدی در مصرف سوخت نیروگاه‌های برق بود [10]. درونیک و همکاران الگوی توزیع دمای گاز خروجی ژانگستروم با استفاده از روش اختلاف محدود و آزمایش‌های تجربی را تخمین زدند. که به توزیع محاسبه شده دما در امتداد داخلی کانال دودکش (گاز خروجی) دست یافتند [11]. وانگ و همکاران بررسی توزیع دما در مبدل حرارتی ژانگستروم با استفاده از یک مدل نیمه تحلیلی را انجام دادند، آنها به این نتیجه رسیدند که تحلیل عددی و نتایج تجربی، وابستگی قابل توجهی به کاهش طول و کاهش دور پیش گرمکن هوای دوار دارد [12]. صنایع و همکاران اهمیت بهینه‌سازی سرعت چرخش و دبی با کمک روابط تحلیلی و ساخت مدل تجربی را بررسی کردند که حداکثر اثربخشی، در حداکثر نرخ جریان جرمی داغ و حداقل نرخ جریان جرمی سرد ایجاد می‌شود، همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که بیشترین تأثیر سرعت چرخشی بر کارایی ژانگستروم در محدوده ۰/۵ تا ۴ دور بر دقیقه حاصل می‌شود [13]. یوفان بو و همکاران تحلیل عددی رسوب آمونیوم بیسموت (ABS) و خوردگی بر روی پیش گرمکن هوای دوار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که توزیع نرخ جریان گاز دودکش ورودی بر دمای ماتریس تأثیر می‌گذارد و در کاهش انسداد و تمایل به خوردگی نقش دارد [14]. پسندیده و همکاران مدل‌سازی مبدل و مطالعه اثرات سرعت و دبی سیال با استفاده از روش حجم محدود دو بعدی و شرایط مرزی دوره‌ای را بررسی کردند، نتایج نشان دهنده این بود که افزایش سرعت چرخشی یعنی افزایش اثربخشی. افزایش سرعت ورودی سیال یعنی کاهش عملکرد. افزایش طول روتور یعنی افزایش کارایی [15]. هن چن و همکاران با بررسی ویژگی‌های رسوب خاکستر چسبناک و خوردگی پیش گرمکن هوای چرخشی به این نتیجه رسیدند که خوردگی جدی و رسوب خاکستر چسبناک به جای رسوب بی سولفات آمونیوم ناشی از چگالش اسید سولفوریک است [16]. فرهادی و همکاران به منظور بهینه‌سازی عملکرد حرارتی یک نیروگاه، شبیه‌سازی عددی مبدل پیش گرمکن دوار را در دو شرایط با نشتی و بدون نشتی انجام دادند و پارامترهای مختلف عملیاتی را بر روی کارایی

کروم می‌باشد که سه برابر بیشتر از CRLS یا فولاد COR – TEN در برابر خوردگی مقاوم می‌باشد [7].

بهبود عملکرد بازیاب با استفاده از ماده ای با ظرفیت حرارتی حجمی بالا امکان پذیر است؛ به منظور بهینه‌سازی، شکل صفحات مشبک بسکت‌ها در نواحی داغ و میانی با ناحیه سرد متفاوت می‌باشد. استفاده از دو ناحیه با آرایش غیرمشابه برای صفحات در بازیاب‌های دوار بنا به دلایل زیر متداول شده است: جهت بهبود انتقال حرارت، صفحات ناحیه گرم دارای فشردگی بیشتر، هندسه پیچیده تر و عملکرد حرارتی بالاتری ست که برای ناحیه سرد مناسب نمی‌باشد؛ زیرا در ناحیه سرد امکان گرفتگی مسیر جریان سیال با ذرات و یا رسوبات احتمالی وجود دارد. (در ناحیه سرد از سطوح صاف‌تر، با فشردگی کمتری استفاده می‌شود تا ذرات در مسیر جریان، گرفتگی ایجاد نکنند). به دلیل تقطیر بخار آب در نواحی نزدیک به انتهای سرد، احتمال زنگ زدگی و ایجاد رسوب بیشتر است، بنابراین جهت استفاده از خاصیت خودتمیزکنندگی بازیاب، مسیر صاف و مستقیم مؤثرتر است. با توجه به اینکه در انتهای سرد، محصولات احتراق به اندازه کافی سرد شده است، امکان خوردگی توسط اسید سولفوریک وجود دارد، بنابراین ضخامت صفحات فلزی در انتهای سرد نسبت به انتهای گرم بیشتر است. تخلخل در صفحات ناحیه گرم بیشتر از ناحیه سرد می‌باشد. به منظور بهبود انتقال حرارت در ناحیه گرم همانند شکل (۲-ب) از صفحات موج دار استفاده می‌شود. لويس پی بندورانت ایجاد رسوب روی صفحات انتقال حرارت با سه جنس مختلف کربن استیل، استیل با آلایز کم و استیل با پوشش لعابی در ژانگستروم را بررسی کرده است [9].



الف: نمایی از پروفیل صفحه تخت شیاردار (NF)

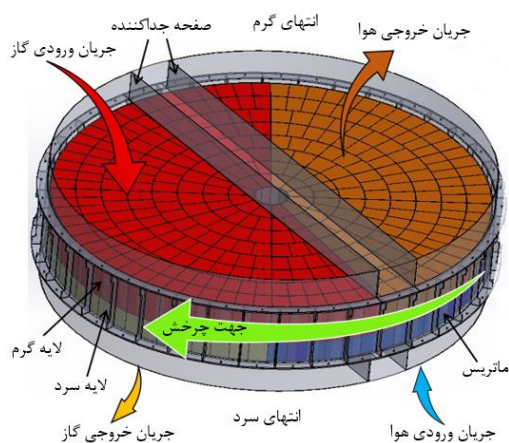


ب: نمایی از پروفیل مدل موج دار دوبل (DU)

شکل ۲ نمایی از پروفیل‌های نواحی گرم و سرد پیش گرمکن هوا [8]

جدول ۲ مشخصات فنی پیش گرمکن دوار هوا در نیروگاه [21]

سرعت چرخش	۲ دور بر دقیقه	قطر ماتریس	۹۸۶۴ میلیمتر
ارتفاع لایه گرم	۱۲۵۰ میلیمتر	ارتفاع لایه سرد	۶۵۰ میلیمتر
دمای هوای ورودی	۳۴۸/۹ کلوین	دمای گاز ورودی	۶۳۴/۲ کلوین
فشار هوای ورودی	۲/۹۷ کیلوپاسکال	فشار گاز ورودی	-۱/۸۹ کیلوپاسکال
فشار هوای خروجی	۱/۶۵ کیلوپاسکال	فشار گاز خروجی	-۳/۱۱ کیلوپاسکال
تخلخل لایه گرم	۰/۸۴	تخلخل لایه سرد	۰/۷۶



شکل ۳ نمایی از پیش گرمکن هوای دوار

به طور کلی، یک ماتریس با تخلخل بالا (تخلخل بالا به معنای دیواره های نازک ماتریس و مقاومت حرارتی کم دیوارها) به دلیل انتقال حرارت با رسانایی بالا به دیوارها و گازها مطلوب است. به عبارت دیگر ذخیره گرما در ماتریس جهت گرم کردن یا سرد کردن گازها در دماهای مورد نظر، افزایش می یابد [22]. به منظور شبیه سازی جریان و انتقال حرارت در پیش گرمکن هوا، باید از معادلات ناویر-استوکس در محیط متخلخل استفاده شود. عدد رینولدز به عنوان معیاری که جریان آرام است یا متلاطم، برای جریان عبوری از محیط متخلخل از رابطه (۱) به دست می آید [22]:

$$Re = \frac{V \alpha^2}{\nu} \quad (1)$$

در این رابطه α ضریب نفوذپذیری در محیط متخلخل است و از رابطه زیر به دست می آید [22]:

مبدل ژانگستروم بررسی کردند [3]. حجاری و همکاران شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ژانگستروم را به منظور تخمین نشت با استفاده از رویکرد محیط متخلخل انجام دادند. نتایج نشان داد؛ نشت غالب، نشت شعاعی است که استفاده از آب بندی های دوگانه و سه گانه میزان نشتی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد [17]. قدسی پور و صدرآملی تأثیر دبی جرمی و سرعت دورانی ماتریس را بر عملکرد پیش گرمکن بررسی کردند و نشان دادند که تأثیر دبی جریان بیش از سرعت چرخشی است [18].

در تحقیق حاضر، بررسی راندمان پیش گرمکن و توزیع دمایی آن با توجه به شرایط واقعی در شرایط مختلف شعاع ها و فواصل از لایه انتهایی سرد با هدف تعیین سطوح مستعد خوردگی در سه مرحله (الف) با شرایط دمایی واقعی، (ب) با اثر ۴۱ درجه سانتیگراد افزایش دمای هوای ورودی، (ج) با اثر ۳۶ درجه سانتیگراد افزایش دمای گاز ورودی مورد مطالعه قرار گرفته است.

هندسه مسئله، شبکه محاسباتی و معادلات حاکم

در تحقیق حاضر، از خواص فولاد ضد زنگ استفاده شده است که در جدول (۱) قابل مشاهده است. در جدول (۲) مشخصات فنی پیشگرمکن هوای چرخشی یک نیروگاه ارائه شده است. برای شبیه سازی محیط داخلی ماتریس، فرض یک محیط متخلخل برای ابعاد کوچک و فواصل میلی متری بین صفحات فشرده و ابعاد بزرگ چند متری مطابق شکل (۳) در نواحی ورودی و خروجی پیش گرمکن دوار ژانگستروم استفاده می شود [19]. اختلاف موجود فواصل در شبیه سازی صفحات، باعث افزایش بسیار زیاد شبکه بندی و محاسبات می شود، به نحوی که غیر قابل تحلیل می شود. در چنین شرایطی می توان از فرض محیط متخلخل در شبیه سازی ماتریس پیش گرمکن استفاده نمود [20].

جدول ۱ خواص فولاد ضد زنگ [21]

4.2×10^{-6}	نفوذ حرارتی $\alpha (m^2/s)$
16.26	ضریب هدایت حرارتی $k_s (w / (m.k))$
502.1	ظرفیت حرارتی $C_{p,s} (J/(kg.k))$
8027.2	چگالی $\rho_s (kg/m^3)$

ورق‌های موجدار و تخلخل بالا، نیروهای فروچیم، کوریولیس بدلیل ناچیز بودن اثرات اینرسی، سرعت چرخش پایین و ترم بویانسی به جهت تأثیر محدود نیروی بویانسی با توجه به سرعت‌های بالای سیال عبوری و جریان اجباری در مبدل، تأثیر محدودی دارند که حذف شده‌اند.

معادله انرژی فاز جامد

$$(1-\gamma)(\rho C_s) \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\gamma) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + (1-\gamma) q_s'' \quad (۶)$$

معادله انرژی فاز سیال

$$\gamma(\rho C_f) \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C_p) \gamma \nabla \cdot T_s = \gamma \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \gamma q_f''$$

با در نظر گرفتن تعادل حرارتی بین فاز جامد و سیال در محیط متخلخل، معادله (۸) به دست می‌آید [20]:

$$(\rho C)_m \frac{\partial T_m}{\partial t} + (\rho C_p) \gamma \nabla \cdot T = \gamma \nabla \cdot (k_m \nabla T_m) + \gamma q_m'' \quad (۷)$$

معادله فوق معرف معادله انرژی در محیط متخلخل است که جمله اول سمت چپ معرف تغییر زمانی انرژی حرارتی، جمله دوم بیانگر انتقال حرارت همرفتی توسط سیال می‌باشد. ضمن اینکه در سمت راست، جمله اول معرف انتقال حرارت هدایتی و جمله دوم معرف منبع حرارتی می‌باشند. راندمان پیش گرمکن هوای دوار از حاصلضرب راندمان حرارتی و راندمان جرمی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{\dot{m}_a c_{p,a} \cdot T_{a,out} - T_{a,in}}{\dot{m}_g c_{p,g} \cdot T_{g,in} - T_{a,in}} \quad (۸)$$

نکته مهم در شبیه‌سازی پیش گرمکن دوار ژانگستروم، چرخش ماتریس و ثابت بودن بدنه و جریان‌های ورودی می‌باشد. برای این منظور از روش مختصات مرجع متحرک استفاده شده است که امکان اعمال شرط دوران به ماتریس دوار را می‌دهد، از این رو از معادلات پیوستگی، معادله بقای اندازه حرکت خطی، و معادله انرژی در مختصات مرجع متحرک بر حسب سرعت مطلق، به شرح زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r) = 0 \quad (۹)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r \bar{v}) + \rho (\bar{\omega} \times \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_r + \bar{F} \quad (۱۰)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r H + p \bar{u}_r) = \nabla \cdot (k \nabla T + \bar{\tau} \cdot \bar{v}) + S_h \quad (۱۱)$$

$$\alpha = \frac{D_H^2}{150} \frac{\gamma^3}{(1-\gamma)^2}, D_H = \frac{4A}{P} \quad (۲)$$

در تحقیق حاضر عدد رینولدز ۱۲۰۷ است که کمتر از رینولدز بحرانی بوده و بنابراین جریان سیال به صورت آرام در نظر گرفته می‌شود. با توجه به داده‌های مقاله و محاسبات انجام شده، حاصل عدد رایلی بزرگتر از 10^9 و عدد ریچاردسون کمتر از ۱ می‌باشد. با توجه به این اعداد، نیروی بویانسی و اینرسی هر دو مهم هستند، اما نیروی بویانسی خیلی غالب نیست. در واقع می‌توان فرض کرد اثرات جابجایی اجباری در این مسئله غالب است.

معیار اندازه‌گیری تخلخل، ضریب تخلخل است که به عنوان نسبت حجم سیال به حجم کل محیط تعریف می‌شود. در بخش سرد حجم کل محیط ۴۹/۶۵ و حجم سیال ۳۷/۷۳ متر مکعب است. در این بخش از نسبت حجم سیال به حجم کل محیط، ضریب تخلخل بخش سرد محاسبه می‌شود. در بخش گرم حجم کل محیط ۹۵/۴۷ و حجم سیال ۸۰/۲ متر مکعب است که از نسبت حجم سیال به حجم کل محیط، ضریب تخلخل بخش گرم محاسبه می‌شود. بنابراین، ضریب تخلخل عبارت است از:

$$\gamma = \frac{v_f}{v_f + v_s} = \frac{v_f}{v_{total}} \quad (۳)$$

با توجه به تعریف ضریب تخلخل در رابطه فوق، معادلات پیوستگی و بقای اندازه حرکت خطی در محیط متخلخل از روابط ۴ و ۵ بدست می‌آیند [22]:
ضمن اینکه این ضرایب، اثرات محیط متخلخل را در معادلات منعکس می‌کنند.

معادله پیوستگی

$$\gamma \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \bar{v}) = 0 \quad (۴)$$

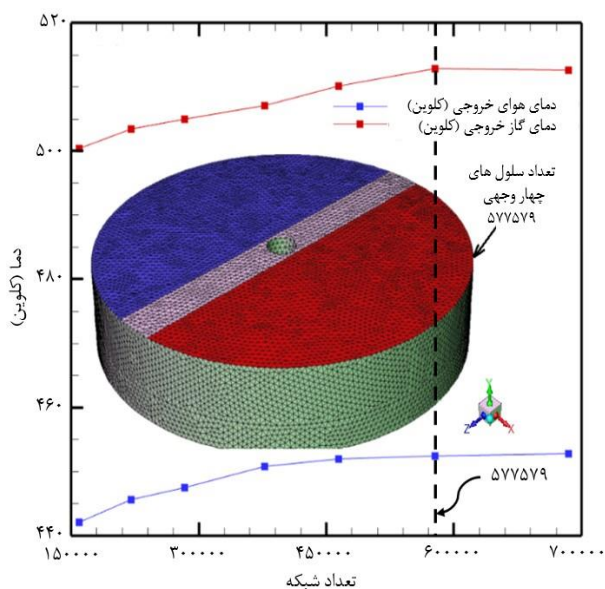
جمله اول معادله پیوستگی، یعنی جمله زمانی که در جریان پایا صفر است، ترم دوم یعنی ترم جابجایی که تضمین می‌کند جرم سیال در محیط متخلخل و در کل مبدل حفظ شود.

معادله بقای اندازه حرکت خطی

$$\rho_f \left[\gamma^{-1} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \gamma^{-2} (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right] = -\nabla p - \frac{\mu}{k} \bar{v} \quad (۵)$$

در معادله فوق: ترم اول سمت چپ معرف شتاب محلی و ترم دوم معرف شتاب همرفتی می‌باشد. ترم اول سمت راست معادله معرف نیروی گرا دیان فشار و ترم دوم معرف مقاومت دارسی محیط متخلخل است. ترم ویسکوز بدلیل ساختار

سرعت و فشار استفاده شده است. مدل سازی ماتریس با نرم افزار سالیید ورکس انجام شد. برای تولید شبکه با سلول چهاروجهی (Tetrahedron)، از نرم افزار انسیس مشینگ، و برای حل مسئله از نرم افزار انسیس فلونت استفاده شده است. در پژوهش حاضر، به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، با توجه به آنچه در شکل (۴) مشاهده می شود، تعداد گره های شبکه در هر مرحله اضافه شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می شوند (در اینجا دمای خروجی هوا و گاز). با توجه به انطباق نتایج دو شبکه بندی، حل از شبکه مستقل شده و شبکه نشان داده شده در ردیف (۴) و (۵) جدول (۳)، با تعداد شبکه کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می شود، زمانی که تعداد شبکه از ۱۵۹۹۶۰ به ۵۷۷۵۷۹ می رسد، نتایج ۲/۳ درصد تغییر می کند.



شکل ۴ شبکه محاسباتی پیش گرمکن هوای دوار (شبکه بندی و تغییرات دمایی نسبت به تعداد شبکه)

جدول ۳ مطالعه تعداد شبکه و استقلال نتایج حاضر

مشخصات نرم افزار و سیستم اجرا	تغییر نتایج (%)		دمای گاز خروجی (K)	دمای هوای خروجی (K)	تعداد شبکه	زمان اجرا (min)	ردیف
IdeaPad Gaming 3-15IHU6-Type 82k1 Processor: 11th Gen Intel(R) Core (TM) i5-11300H @ 3.10GHz 3.11 GHz RAM: 16.0 GB Edition: Windows 11 Version 22H2	-	-	۵۰۰/۳۵	۴۴۲/۱۳	۱۵۹۹۶۰	۲۴	۱
	۰/۹۳	۱/۲	۵۰۵/۰۲	۴۴۷/۵۳	۲۸۳۱۱۵	۲۴	۲
	۰/۸	۰/۷۲	۵۰۹/۰۶	۴۵۰/۷۸	۳۷۷۹۸۷	۳۶	۳
	۰/۷۴	۰/۳۵	۵۱۲/۸۳	۴۵۲/۳۹	۵۷۷۵۷۹	۴۰	۴
	-۰/۰۴	۰/۰۸	۵۱۲/۶۳	۴۵۲/۷۴	۷۳۴۹۷۶	۷۲	۵

در معادلات فوق به جهت سازگاری با مختصات مرجع متحرک، از سرعت مطلق استفاده شده است. در معادله (۱۱) جملات اول و دوم سمت چپ توضیح داده شد. جمله سوم، نیروی کوریولیس و اثر چرخش مبدل را مدل می کند. در سمت راست معادله جمله اول توضیح داده شده و جملات دوم و سوم بترتیب معرف تنش ویسکوز هستند که نیروی لزجت سیال و نیروی خارجی (مقاومت محیط متخلخل، نیروی بویانسی یا نیروی سانتیفیوژ) را مدل می کنند.

معادله (۱۲) به جهت مدل سازی انتقال حرارت در مبدل دوار ژانگستروم استفاده می شود. در سمت چپ معادله، جمله اول معرف تغییر انرژی کل در زمان، جمله دوم بیانگر همرفت انرژی (جمله جابجایی) می باشند. ضمن اینکه در سمت راست معادله، ترم اول، هدایت و کار ویسکوز، جمله دوم منبع حرارتی در واحد حجم را بیان می کنند.

دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک با استفاده از معادله ورهوف و بانچرو براساس آنالیز گازهای دودکش، محاسبه می شود که این عدد در محدوده ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد می باشد.

$$\frac{1000}{T_{DEW}} = [2.275 - 0.0294 \ln(p_{H_2O}) - 0.0858 \ln(p_{SO_3}) + 0.0062 \ln(p_{H_2O}) \ln(p_{SO_3})] \quad (12)$$

در معادله فوق، p نشان دهنده فشار جزئی بر حسب میلی متر جیوه است.

برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم از روش حجم محدود، روش بالادست مرتبه دوم برای گسسته سازی معادلات و از الگوریتم جفت شده (Coupled) به منظور ارتباط معادلات

وجود دارد.

جدول ۴ مقایسه نتایج حل عددی تحقیق حاضر با مقاله مورد مطالعه و داده‌های واقعی نیروگاه

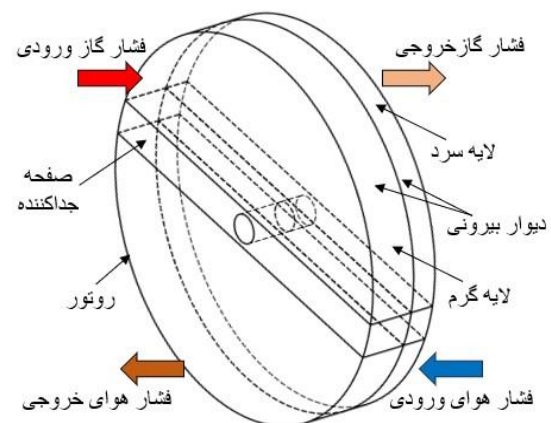
پارامتر	دمای هوای خروجی (K)	دمای دود خروجی (K)
داده‌های واقعی نیروگاه	۵۳۴/۳	۳۹۳/۴
نتایج مقاله مرجع	۵۲۴/۵	۴۲۲/۹
نتایج تحقیق حاضر	۵۴۲/۲	۴۱۳/۷۵
درصد خطا با مقاله مرجع	۰/۴۲٪	۲/۲٪

تجزیه و تحلیل و نتایج حل عددی

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، ماتریس با سرعت دورانی حدود ۲ دور بر دقیقه، تاثیر مستقیم روی حداقل دمای هوای خروجی و حداکثر دمای گاز خروجی دارد، حداقل دمای هوای خروجی و حداکثر دمای گاز خروجی به ترتیب روندی مشابه با میانگین دمای هوای خروجی و گاز خروجی دارند. به دلیل تشکیل نقطه شبنم در پیش گرم‌کن و خوردگی ماتریس، حداقل دمای خروجی گاز مهم است. با افزایش سرعت چرخش، حداکثر دمای سبدها در هنگام قرار گرفتن در قسمت گرم کاهش می‌یابد و حداقل دمای سبدها زمانی که در قسمت سرد قرار می‌گیرند افزایش می‌یابد که منجر به کاهش راندمان پیش گرم‌کن می‌شود. با افزایش سرعت چرخش تا ۶ دور در دقیقه، در یک بازه زمانی ثابت، ضمن کاهش میانگین دمای گاز خروجی به ۳۷۶ درجه کلوین، میانگین دمای هوای خروجی به ۵۹۰ درجه کلوین و راندمان به ۸۴ درصد می‌رسد. (روش میانگین جرمی دما در مواردی که توزیع دما و سرعت در سطح مقطع خروجی یکنواخت نیست، دقیق ترین معیار برای ارزیابی عملکرد حرارتی محسوب می‌شود. دمای میانگین جرمی عبوری از هر سطح که از روی هر سطح محاسبه می‌شود). در حالی که بیش از ۶ دور در دقیقه، میانگین دمای گازهای خروجی ۱۶ درجه کلوین و راندمان ۹ درصد افزایش می‌یابد. سرعت چرخش علاوه بر عدم تاثیر معنی‌دار بر حداکثر دمای هوای خروجی و حداقل دمای گاز خروجی بر حداکثر دمای خروجی گاز و حداقل دمای خروجی هوا تاثیر مستقیم دارد، ضمن اینکه افزایش ۲۰ درجه سانتیگراد در دمای هوای ورودی، میانگین دمای گاز خروجی و هوای خروجی را به ترتیب حدود ۲ و ۱۰ درجه سانتیگراد افزایش می‌دهد. همچنین افزایش ۲۰ درجه سانتیگراد دمای گاز ورودی،

شرایط مرزی و روش حل

وجود فن‌های دریافت کننده اجباری (FD)، دریافت کننده القایی (ID) و دریافت کننده اولیه (PD) در مسیر پیش گرم‌کن، منجر به اختلاف فشار در ژانگستروم (ورودی و خروجی هر دو سیال هوا و دود) می‌شود، که با کمک دستگاه‌های اندازه‌گیری فشار، قابل اندازه‌گیری است. لذا در تحقیق حاضر بطوری که در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد، از شرایط مرزی ورودی شامل دمای ورودی، فشار ورودی، سرعت ورودی، و تخلخل در لایه‌های گرم و سرد و شرایط مرزی خروجی شامل دمای خروجی و فشار خروجی استفاده شده است. با فرض عایق بودن دیواره اطراف پیش گرم‌کن هوا و تفاوت خواص ترمودینامیکی سیال سمت هوا و دود، به منظور تطابق شرایط تئوری و عملیاتی، از دو سیال در میدان محاسباتی استفاده شده است. چگالی سیال هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و ظرفیت گرمایی متوسط، تابعی از چند جمله‌ای تکه‌ای (Piecewise-Polynomial) برحسب ژول بر کیلوگرم کلوین در نظر گرفته شده است.



شکل ۵ شرایط مرزی پیش گرم‌کن هوای دوار

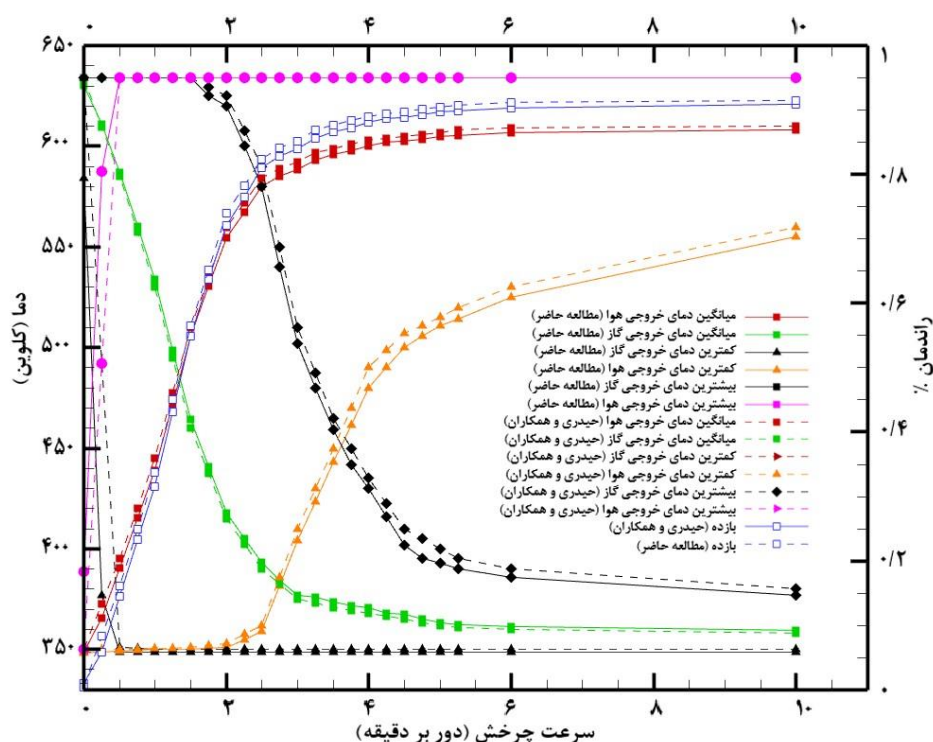
اعتبارسنجی

قبل از بررسی و تجزیه و تحلیل پارامترهای موثر بر کارایی ژانگستروم، لازم است از صحت و اعتبار شبیه‌سازی و حل عددی انجام شده اطمینان حاصل شود. در اینجا به منظور شبیه‌سازی مدل پیش گرم‌کن هوای ژانگستروم از مشخصات فنی و شرایط عملکردی پیش گرم‌کن دوار هوای ارائه شده در مقاله مرجع [20]، استفاده شده است و به منظور راستی آزمایی، نتایج تحقیق حاضر با داده‌های واقعی نیروگاه و مقاله مرجع مقایسه شده است. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، توافق قابل قبولی بین نتایج تحقیق حاضر، داده‌های واقعی نیروگاه و مقاله مرجع

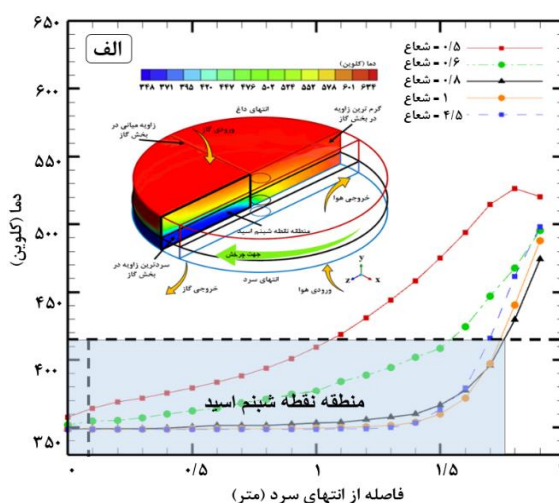
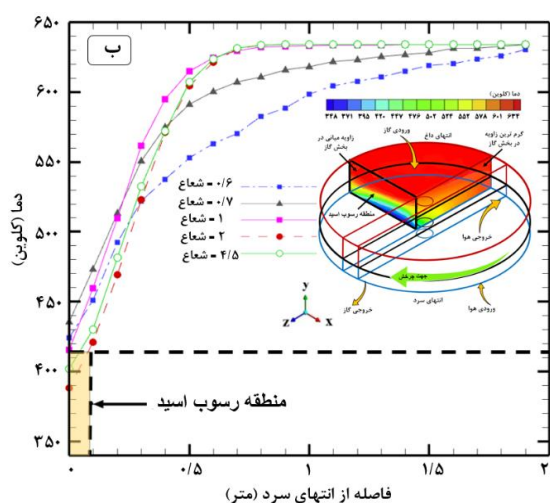
ابتدا با گ ازهای دودکش گرم در تماس هستند، به سرعت افزایش می‌دهد. زمانی که چرخش ماتریس به موقعیت ۹۰ درجه می‌رسد، دمای لایه بالایی عنصر گرمایی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در شرایطی که دما در لایه پایینی ماتریس هنوز پایین است. این توزیع دما در شکل نشان داده شده است. با چرخش بیشتر ماتریس (موقعیت ۱۸۰)، عناصر گرمایی به دمای بیشینه خود یعنی دمای گازهای داغ دودکش می‌رسند، که در این منطقه، هیچ تراکم اسید رخ نمی‌دهد.

میانگین دمای گاز خروجی و دمای هوای خروجی را به ترتیب حدود ۷ و ۲ درجه سانتیگراد افزایش می‌دهد.

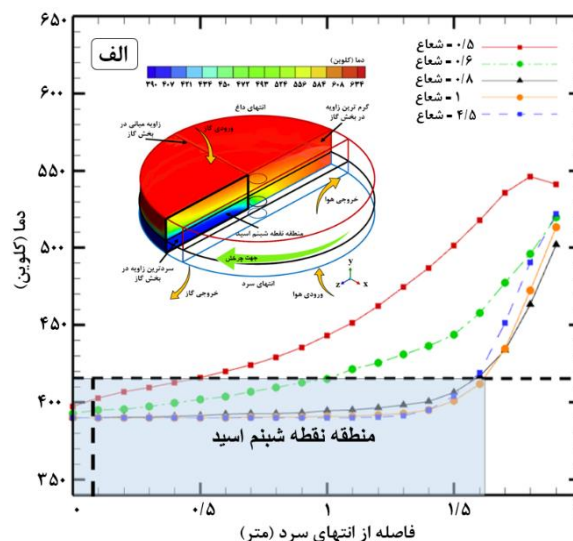
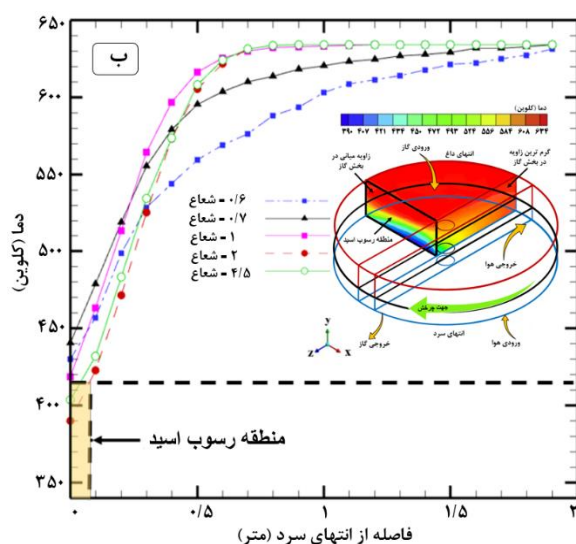
منحنی‌های توزیع دمای عناصر گرمایشی در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان می‌دهد که در ابتدای چرخش ماتریس (موقعیت صفر درجه)، امکان چگالش اسیدی بر روی تمام سطوح عنصر گرمایی حتی در قسمت بالای لایه گرم وجود دارد. چرخش ماتریس به سمت انتهای گرم، دمای عناصر حرارتی را به دلیل انتقال حرارت با گازهای دودکش، به ویژه در لایه‌های بالایی که



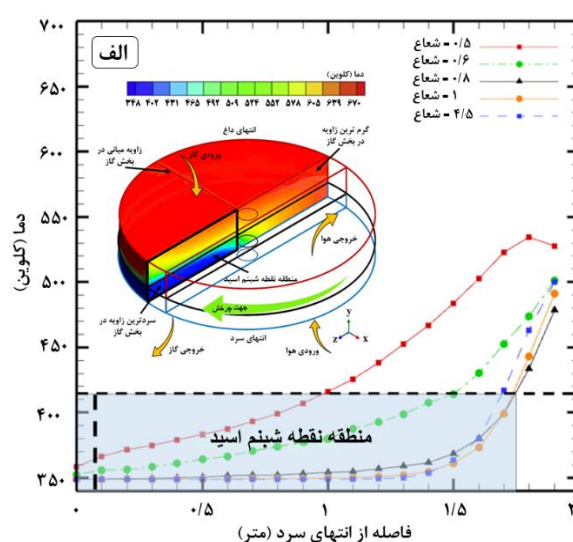
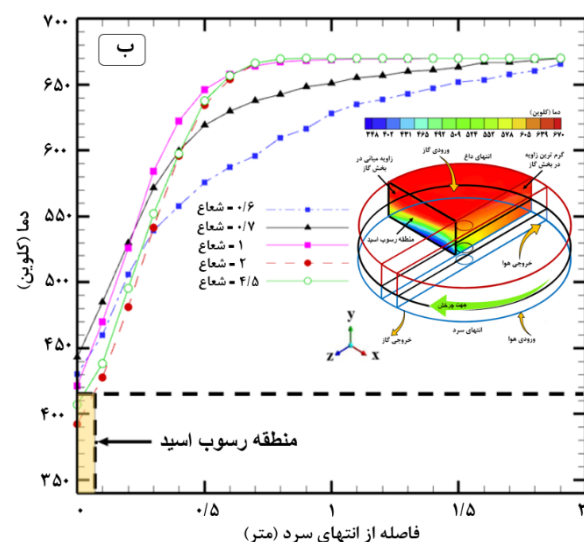
شکل ۶ اثر سرعت دورانی بر راندمان، حداقل و حداکثر دماهای خروجی هوا و گاز



شکل ۷ توزیع دمای پیش گرمکن هوا برحسب شرایط واقعی در شعاع‌ها و فواصل مختلف از لایه انتهایی سرد؛ (الف) ماتریس در ابتدای جریان هوا در موقعیت صفر درجه. (ب) ماتریس بعد از چرخش در موقعیت ۹۰ درجه



شکل ۸ توزیع دمای پیش گرمکن هوا با افزایش ۴۱ درجه سانتیگراد در دمای هوای ورودی، در شعاع‌ها و فواصل مختلف از لایه انتهایی سرد؛ (الف) ماتریس در ابتدای جریان هوا در موقعیت صفر درجه. (ب) ماتریس بعد از چرخش در موقعیت ۹۰ درجه



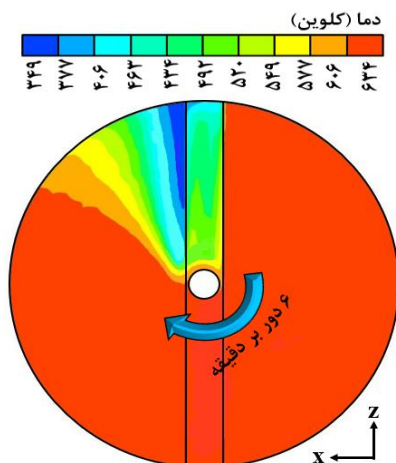
شکل ۹ توزیع دمای پیش گرمکن هوا با افزایش ۳۶ درجه سانتیگراد در دمای گاز ورودی، در شعاع‌ها و فواصل مختلف از لایه انتهایی سرد؛ (الف) ماتریس در ابتدای جریان هوا در موقعیت صفر درجه. (ب) ماتریس بعد از چرخش در موقعیت ۹۰ درجه

صفحه جداکننده موجب افزایش نشی و سایش بیشتر نشت بندها و شکستگی بیشتر آنها می‌شود که باعث کاهش ضریب عملکرد و اثربخشی بازیاب خواهد شد. در حالی که در سرعت‌های چرخشی پایین صفحه جداکننده تأثیر محسوسی بر توزیع دمای مبدل حرارتی ندارد.

توزیع دما در صفحه عمودی ماتریس نشان می‌دهد که گرم‌ترین و سردترین دما در حداکثر شعاع ماتریس اتفاق می‌افتد. به دلیل مشکل نشت، برای کنترل موثر آب‌بند شعاعی، کاهش

منطقه دمای پایین یا به اصطلاح منطقه بحرانی در ارتفاعی در حدود ۶۰۰ میلیمتر دورتر از کف لایه نهایی سرد واقع شده است. هنگامی که ماتریس سرد در ابتدا وارد کانال گاز در سطوح نزدیک به محیط می‌شود، بیش‌ترین خوردگی معمولاً در لایه پایینی ماتریس رخ می‌دهد (شکل ۱۰).

در ماتریس، سرعت دورانی تأثیری بر شروع چگالش سیال و نقطه شبنم ندارد، یعنی با تغییر سرعت دوران نمی‌توان از فرآیند خوردگی جلوگیری کرد. افزایش سرعت چرخشی ژانگستروم با



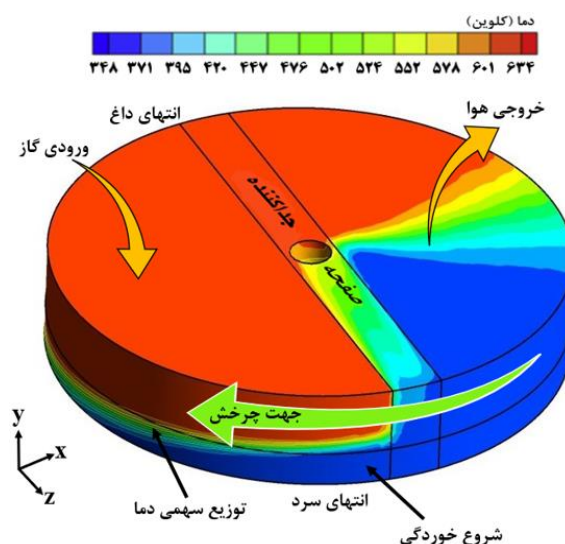
شکل ۱۲ توزیع دمای پیش گرمکن هوا، سرعت چرخش ۶ دور در دقیقه

نتیجه گیری

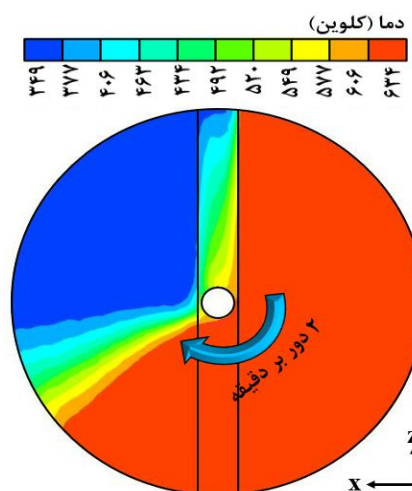
در این تحقیق توزیع دمای پیش گرمکن هوا به منظور تعیین سطوح مستعد خوردگی با نرم افزار فلوئنت بدست آمد. تجزیه و تحلیل پیش گرمکن هوای دوار تک ماتریسی انجام شد. بیشترین خوردگی معمولاً در لایه پایینی ماتریس یعنی هنگامی که ماتریس سرد در ابتدا وارد کانال گاز در سطوح نزدیک به محیط می شود، رخ می دهد. این موضوع به جهت رسیدن دمای دود به زیر نقطه شبنم ایجاد می شود که اهمیت حداقل دمای گاز خروجی را نشان می دهد. برای جلوگیری از چگالش بر روی ماتریس و تشکیل اسیدهای خورنده؛ یک روش مناسب، پیش گرمایش هوای ورودی سرد برای رسیدن به دمایی بین ۳۴۰ تا ۳۶۰ درجه کلوین با استفاده از مبدل حرارتی است. اما با توجه به دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک (۳۹۳ تا ۴۱۳ درجه کلوین)، که بر اساس دی اکسید گوگرد گازهای دودکش تعیین شده است، پیش گرمایش فوق باید رسیدن به دمایی بین ۳۸۵ تا ۴۰۵ درجه کلوین باشد. انرژی گرمایی برای مبدل حرارتی توسط بخاری که از بخش های فرعی توربین می آید، می تواند تامین شود. با افزایش دمای هوای ورودی، میانگین دمای گاز خروجی افزایش می یابد. این پدیده به دور شدن از دمای نقطه شبنم جریان کمک می کند.

مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با نمونه واقعی و مقاله مرجع، نشان داد که مطالعه حاضر، نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد. مطالعه حاضر نشان داد هنگامی که ماتریس سرد در ابتدا وارد کانال گاز در سطوح نزدیک به محیط می شود، بیشترین

سطح صفحه جداکننده نمی تواند کمتر از حد خاصی باشد. در صورت کاهش سطح صفحه جداکننده بازده پیش گرم کن به علت افزایش سطح موثر انتقال حرارت بین صفحات و سیالات افزایش می یابد. با افزایش نرخ جریان سیال، دمای متوسط هوای خروجی کاهش می یابد، در حالی که دمای متوسط گاز خروجی افزایش می یابد، که منجر به کاهش عملکرد پیش گرم کن هوا می شود. این کاهش به دلیل نبود ظرفیت ماتریس برای انتقال انرژی است. در شکل های (۱۱) و (۱۲)، کانتورهای مربوط به توزیع دمای پیش گرمکن هوا در سرعت های چرخشی مختلف (۶ و ۲ دور در دقیقه) از سمت انتهای داغ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ توزیع دمای پیش گرمکن هوا، زمانی که انتهای داغ در بالا باشد



شکل ۱۱ توزیع دمای پیش گرمکن هوا، سرعت چرخش ۲ دور در دقیقه

SO₃ تری اکسید گوگرد
H₂O بخار آب

حروف یونانی

$\bar{\tau}_r$ تانسور تنش نسبی
 α ضریب تراوایی (نفوذپذیری) محیط متخلخل، (m^2s^{-1})
 γ ضریب تخلخل، (بی بعد)
 η بازده، (بی بعد)
 ν لزجت سینماتیکی، (m^2s^{-1})
 μ لزجت دینامیکی، ($kgm^{-1}s^{-1}$)
 ρ چگالی، (kgm^{-3})
 $\bar{\omega}$ سرعت زاویه‌ای

زیرنویس‌ها

a مربوط به هوا
f مربوط به سیال
g مربوط به گاز
in ورودی
m مربوط به مخلوط
out خروجی
s مربوط به جامد

واژه نامه

پیشنهادی ویراستار	واژه لاتین	پیشنهادی نویسنده
	Preheater	پیش گرمکن
	Ljungstrom	ژانگستروم
	Dew Point	نقطه شبنم
	Computational Fluid Dynamics	دینامیک سیالات محاسباتی

تقدیر و تشکر

خوردگی معمولاً در لایه پایینی ماتریس رخ می‌دهد. حضور صفحه جداکننده، توزیع دما در ماتریس را به ویژه در نزدیکی مرکز تغییر می‌دهد. نتایج حاصل از بررسی سرعت چرخشی در ژانگستروم، به این صورت بود که بیشترین تأثیر سرعت چرخشی بر کارایی ژانگستروم در محدوده ۰/۵ تا ۶ دور بر دقیقه خواهد بود و با افزایش سرعت چرخشی بیشتر از ۶ دور بر دقیقه مقدار کارایی حرارتی مبدل تغییر نمی‌کند. از طرفی با توجه به لزوم نشت بندی مورد نیاز در ژانگستروم، سرعت چرخشی نباید از حداکثر مقدار مجاز بیشتر شود بنابراین سرعت چرخشی بهینه در بازه ۰/۵ تا ۴ دور بر دقیقه می‌باشد.

نمادها

علائم و نشانه‌ها

Re عدد رینولدز، (بی بعد)
R شعاع روتور (m)
V سرعت سیال، (ms)
 ν سرعت نشت، (ms^{-1})
 D_H قطر هیدرولیکی، (m)
A سطح مقطع عبور سیال (m^2)
P محیط درگیر با جریان سیال (m)
 $\bar{v}$ سرعت مطلق، (ms^{-1})
 v_f سرعت سیال مایع، (ms^{-1})
 v_s سرعت سیال جامد، (ms^{-1})
p فشار، ($kgm^{-1}s^{-2}$)
k ضریب هدایت حرارتی سیال، ($Wm^{-1}k^{-1}$)
 q_s'' تولید حرارت در واحد حجم، (Wm^{-3})
 $\dot{m}$ دبی جرمی، (kgs^{-1})
T دما، (K)
 $\bar{F}$ نیروهای بدنه خارجی
E انرژی داخلی نسبی kgm^2/s^2
 S_h چشمه حرارتی
H آنتالپی کل
 $\bar{u}_r$ سرعت در مختصات مرجع متحرک، (ms^{-1})
 $\bar{v}_r$ سرعت نسبی، (ms^{-1})
 C_p گرمای ویژه فشار ثابت، ($Jkg^{-1}k^{-1}$)
 T_{DEW} دمای نقطه شبنم (K)

مراجع

- [1] M. Rajput, "Optimization of primary air inlet opening of tri-sector air pre-heater for minimizing primary air pressure drop in air preheater (APH) and to study the effect of variation of RPM on APH performance using CFD analysis," M.Tech. dissertation, Department of Mechanical Engineering, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur, 2016.
- [2] S. Vulloju et al, "Analysis of Performance of Ljungstrom Air Preheater Elements," *International Journal of Current Engineering and Technology*, no. 2, 2014. <http://dx.doi.org/10.14741/ijcet/spl.2.2014.94>
- [3] I. Farhadi, F. Veysi, M. Mirza Asgari, "Numerical simulation of rotary regenerative air preheater (Ljungstrom) in steam power plant with the aim of optimizing of thermal performance," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 291-301, 2018.
- [4] R. K. Shah, D. P. Sekulic. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. pp. 3-74, USA John Wiley & Sons, 2003.
- [5] H. Hajebzadeh and A. N. Ansari, "Modification of rotary air preheater toward achieving extended life-span utilizing porous media approach: A case study," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 236, no. 2, pp. 293–307, 2022. <https://doi.org/10.1177/09576509211034977>
- [6] M. M. M. Hamed-elneel, M. A. D. A. Al-zain, and Y. A. A. M. Al-makki, "The relation between air ejector and vacuum pump operation to minimize turbine back pressure: Case study in Khartoum North Power Station (KNPS)," Ph.D. dissertation, Sudan University of Science and Technology, 2017.
- [7] A. Usami, T. Noguchi, H. Tezuka, S. Nishimura, T. Kusunoki, "Development of a water dew corrosion resistant new steel element for air preheaters at natural gas fired power plants," *Nippon Steel Technical Report*, no. 87, pp. 10–13, 2003.
- [8] J. Manivel, L. Manimaran, M. Thiagarajan, P. Satheeshkumar, and R. Thirupathi, "Performance analysis of air preheater in 210 MW thermal power station," *International Journal of Advanced Research, Ideas and Innovations in Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 619–630, 2017.
- [9] L. P. Bondurant III, "SCR compatibility for the Ljungstrom air preheater," in *Proceeding EPRI-DOE-EPA Air Pollution Control Symp.—The Mega Symposium*, Aug. 1999, pp. 14–22.
- [10] I. Warren, "Ljungstrom heat exchangers for waste heat recovery," *Journal of Heat Recovery Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 257–271, 1982. [https://doi.org/10.1016/0198-7593\(82\)90019-4](https://doi.org/10.1016/0198-7593(82)90019-4)
- [11] B. Drobnič, J. Oman, and M. Tuma, "A numerical model for the analyses of heat transfer and leakages in a rotary air preheater," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 25–26, pp. 5001–5009, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.05.027>
- [12] H. Y. Wang, L. L. Zhao, Z. G. Xu, W. G. Chun, and H. T. Kim, "The study on heat transfer model of tri-sectional rotary air preheater based on the semi-analytical method," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 14–15, pp. 1882–1888, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.11.023>

- [13] S. Sanaye, S. Jafari, and H. Ghaebi, "Optimum operational conditions of a rotary regenerator using genetic algorithm," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 9, pp. 1637–1642, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.025>
- [14] Y. Bu, L. Wang, X. Chen, X. Wei, L. Deng, and D. Che, "Numerical analysis of ABS deposition and corrosion on a rotary air preheater," *Applied Thermal Engineering*, vol. 131, pp. 669–677, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.082>
- [15] M. Mousavi, M. Passandideh-Fard, and M. Ghazikhani, "Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a rotary regenerator," in *Proceeding 16th Annual Conference of the CFD Society of Canada*, 2008.
- [16] H. Chen, P. Pan, H. Shao, Y. Wang, and Q. Zhao, "Corrosion and viscous ash deposition of a rotary air preheater in a coal-fired power plant," *Applied Thermal Engineering*, vol. 113, pp. 373–385, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.160>
- [17] M. Hajjari, Gh. Salehi, and M. E. Nimvari, "CFD simulation of Ljungstrom rotary preheater in steam power plant for leakage assessment using porous media approach," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2021. <https://doi.org/10.22044/jsfm.9607.3170>
- [18] N. Ghodsipour and M. Sadrameli, "Experimental and sensitivity analysis of a rotary air preheater for the flue gas heat recovery," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 571–580, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00226-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00226-0)
- [19] L. A. Sphaier and W. M. Worek, "Analysis of heat and mass transfer in porous sorbents used in rotary regenerators," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 14–16, pp. 3415–3430, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.01.016>
- [20] N. B. Khedher and S. B. Nasrallah, "Three-dimensional modeling and analysis of a porous thermal energy storage system," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 3, no. 2, pp. 97–109, 2012. <https://doi.org/10.36884/jafm.3.02.11892>
- [21] A. Heidari-Kaydan and E. Hajidavalloo, "Three-dimensional simulation of rotary air preheater in steam power plant," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 399–407, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.013>
- [22] D. A. Nield and A. Bejan, *Convection in Porous Media*. New York, NY: Springer, 2006.

An assistive System to Guide Visually Impaired People Behind Work Desks

Research Article

Amirmohammad Barsalani¹, Hamidreza Mohammadi Daniali² , Arman Mardani³

 [10.22067/jacsm.2025.91402.1310](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.91402.1310)

Abstract-- According to the World Health Organization, over 38 million people are blind, and more than 110 million suffer from severe visual impairments. This research aims to develop a low-cost, accessible assistance system for blind individuals in work environments, utilizing a single camera (e.g., a smartphone camera) and pre-trained deep learning models. By employing computationally efficient image processing techniques, the system optimizes hardware and processing expenses. It detects objects and the user's hand, computes the heights of objects and their distances to the hand, and then provides real-time audio guidance (e.g., verbal directions) to enable safe object retrieval. Compared to expensive alternatives like dual-camera setups or Kinect sensors, the core innovation here lies in dramatically reducing costs while retaining functional accuracy, as millimeter-level precision is unnecessary for workplace navigation. Moreover, the system performance will be validated to achieve a distance estimation error of approximately 5-10 mm; its accuracy is anticipated to match that of comparable stereo vision approaches.

Keywords: Low-cost, Blind Individuals, Workstation Assistance, Object Detection, Audio Guidance, Pre-trained Models

1- Introduction

Visual impairment poses a global challenge, with the World Health Organization (WHO) reporting approximately 38 million individuals living with blindness and over 110 million suffering severe visual disabilities [1]. Assistive technologies for this demographic aim to enhance independence, safety, and quality of life by addressing functional limitations in daily environments. Historically, designing such systems faced significant hurdles due to computational constraints in machine vision, particularly before the advent of deep learning. Most existing solutions—such as ultrasonic sensor-equipped canes [2], stereo-vision glasses [3], or smart gloves [4]—prioritize navigation in open environments. However, workplace settings (e.g., desk-based tasks) remain critically underserved. Current approaches often

rely on expensive hardware like depth sensors (ToF) [4], dual-camera rigs [5], or Kinect [6], incurring high computational and financial costs. This gap necessitates a cost-effective system optimized for object interaction in confined spaces, where one millimeter precision is nonessential.

To address this, we propose a novel smartphone-based framework leveraging single-camera input, pre-trained models (YOLOv8n [7] + MediaPipe [8]), and lightweight image processing. Our innovation eliminates depth sensors and stereo imaging, instead employing mathematical methods to estimate object height/hand distance in real time. Key advantages of our proposed framework include drastic cost reduction through ubiquitous hardware (mobile cameras), computational efficiency enabling real-time guidance, and audio-based guidance ensuring safe object retrieval. The system targets functional accuracy (5–10 mm error), rivaling stereo vision without its hardware overhead. By focusing on desktop workspaces, this research pioneers the use of accessible technology to promote occupational independence among visually impaired individuals.

2- Materials and Methods

The system leverages a single smartphone camera (user-provided) and Python-based processing to deliver low-cost spatial guidance for visually impaired users in a desktop environment. Moreover, camera calibration is performed using OpenCV with a chessboard pattern, deriving intrinsic parameters (focal length, principal point) and extrinsic parameters (camera-to-table pose) to estimate the transformation matrix (T_c). Coordinate conversion from pixels to real-world space is achieved through Equation 1.

$$\begin{aligned} K_{ij} &= \begin{bmatrix} P_x & P_y & 1 \\ X & Y & Z \end{bmatrix} \\ K_{ij}^w &= \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

* Manuscript received 2024 December 29, Revised 2025 May 12, Accepted 2025 July 20.

¹ Master, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran.

Email: amirmohammadbarsalani@gmail.com

² Corresponding author. Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran, **Email:** mohammadi@nit.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran, **Email:** armanmardani@nit.ac.ir

$$K_{ij} = T_c \cdot K_{ij}^w$$

In which K_{ij} represents a pixel coordinate with horizontal (P_x) and vertical (P_y) components, while its real-space counterpart K_{ij}^w consists of X, Y, and Z spatial dimensions. This calibration assumes objects rest on the table plane ($Z = 0$), simplifying spatial computations while maintaining target accuracy of 5–10 mm. Object detection utilizes YOLOv8n for its optimal speed-accuracy balance, identifying bounding boxes of target items. For tall objects, the estimated height is the value that, when substituted into Equation 1, yields the pixel coordinate closest to point z in Figure 1; by assuming similar x-y coordinates for top/bottom midpoints in real space.

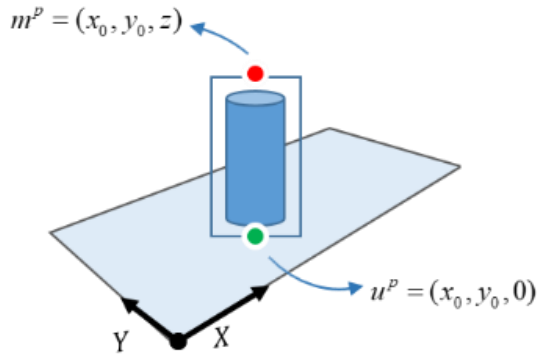


Fig. 1 Two points of interest for estimating the height of objects (The superscript P represents the real-world coordinates for points m and u.)

MediaPipe is employed for hand detection and tracking, utilizing the middle fingertip (Landmark 12 in Fig. 2(a)) as

the primary reference point and the proximal joint (Landmark 11 in Fig. 2(a)) to determine hand orientation. Spatial guidance uses a hand-centric coordinate system: Axis F aligns with the middle finger (Landmarks 11→12), while Axis G is perpendicular to F at the fingertip, dividing the workspace into quadrants. Object positions are translated into clock directions (e.g., "Move 15 cm toward 2 o'clock") based on angular displacement from Axis F and Euclidean 2-norm. Voice interaction via pyttsx3 supports two commands: "Report" (lists detected objects) or a named-object retrieval (triggers guided navigation).

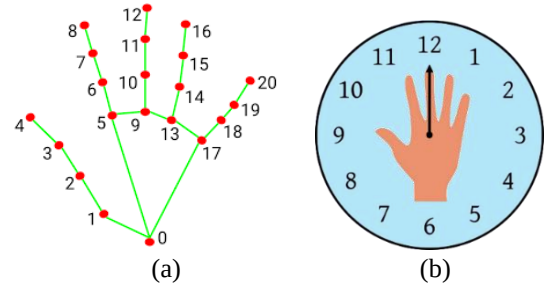


Fig. 2 (a) Mediapipe-detectable landmarks on hand, (b) Clock-based directional Guidance view

The workflow begins with one-time calibration, followed by continuous operation (Fig.3): voice input → image capture → YOLOv8n/MediaPipe inference → coordinate transformation → geometric analysis → audio feedback. Computational efficiency is achieved through model optimizations and mathematical approximations, avoiding depth sensors or stereo vision. Testing assumes static objects and fixed camera height.

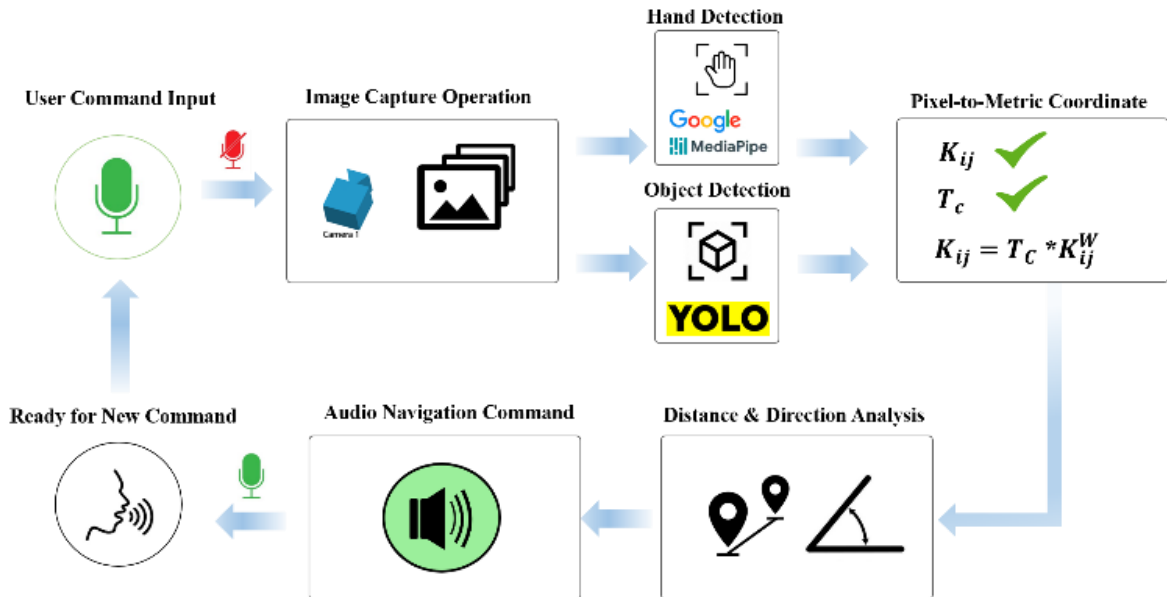


Fig. 3 Overview of how the system works

3- Results

The system demonstrated sub-centimeter spatial accuracy in desktop-scale environments, achieving a mean distance estimation error of 6.1 mm (range: 5–8.5 mm) across geometric validation tests. While the magnitude of the error increased with distance from the camera due to pixel density limitations, performance remained comparable to stereo vision systems (1.22% error reported in prior work [9]). Height estimation for a standardized 150 mm object yielded a mean error of 11 mm (range: 4–21 mm), with optimal accuracy observed in mid-range positions. Computational efficiency was validated on an Intel Core i5-4300M processor, where hand landmark detection (MediaPipe) averaged 0.4 s per image, object recognition (YOLOv8n) required 1.1 s, and audio guidance generation added only 0.03 s latency per command cycle. The total processing time confirms real-time viability for desktop assistance scenarios, with vision tasks dominating the computational load. These results collectively validate the system's core capability to deliver stereo vision-comparable spatial precision using low-cost smartphone hardware while maintaining practical responsiveness.

4- Conclusion

The proposed system achieved spatial accuracy comparable to stereo vision—with mean distance and height estimation errors of 6.1 mm and 11 mm, respectively—while fundamentally overcoming its computational and hardware limitations. By leveraging a single smartphone camera, optimized deep learning frameworks (YOLOv8n for object detection, MediaPipe for hand tracking), and a constrained 2D desktop workspace, the architecture reduces processing load and eliminates the need for specialized dual-camera rigs. This research pioneer assistive technology specifically designed for workplace independence, transforming ubiquitous smartphones into tools for visually impaired users to interact with desktop objects via real-time audio guidance. Future enhancements should explore object segmentation for spatial refinement, language model integration for natural voice interaction, server-based processing acceleration, and haptic interfaces to enrich multimodal feedback—collectively advancing toward assistive systems that empower occupational autonomy through accessible technology.

5-References

- [1] World Helath Organization, "Rehabilitation," [Online]. [Accessed: Apr. 22, 2024]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>
- [2] T. L. Narayani, M. Sivapalanirajan, B. Keerthika, M. Ananthi, and M. Arunarani, "Design of smart cane with integrated camera module for visually impaired people," in Proceeding 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS), 2021, pp. 999–1004. <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395840>
- [3] O. Younis, W. Al-Nuaimy, F. Rowe, M. H. Alomari, "A smart context-aware hazard attention system to help people with peripheral vision loss," *Sensors*, vol. 19, no. 7, p. 1630, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19071630>
- [4] J. Kilian, A. Neugebauer, L. Scherffig, S. Wahl, "The unfolding space glove: A wearable spatio-visual to haptic sensory substitution device for blind people," *Sensors*, vol. 22, no. 5, p. 1859, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22051859>
- [5] M. Aharchi, M. H. A. Kbir, "Localization and Navigation System for Blind Persons Using Stereo Vision and a GIS," in WITS 2020: Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Technologies, Embedded, and Intelligent Systems, Springer, 2022, pp. 1–12. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6893-4_35
- [6] H. Takizawa, S. Yamaguchi, M. Aoyagi, N. Ezaki, "Kinect cane: An assistive system for the visually impaired based on the concept of object recognition aid." *Personal and Ubiquitous Computing* 19. vol. 5 pp. 955-965. (2015).
- [7] M. Sohan, T. Sai Ram, C.V. Rami Reddy, "A review on YOLOv8 and its advancements," in International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics, Springer, 2024, pp. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7962-2_39
- [8] F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov, A. Tkachenka, G. Sung, C. L. Chang, and M. Grundmann, "Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking," *arXiv preprint arXiv:2006.10214*, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10214>
- [9] R. A. Setyawan, R. Soenoko, P. Mudjirahardjo, and M. A. Choiron, "Measurement accuracy analysis of distance between cameras in stereo vision," In 2018 Electrical power, electronics, communications, controls and informatics seminar (EECCIS), 2018, pp. 169-172. <https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692999>



سیستم کمکی برای هدایت افراد دارای اختلالات بینایی پشت میزهای کار*

مقاله پژوهشی

آرمان مردانی^(۳)

حمیدرضا محمدی دانیالی^(۲)

امیر محمد برسلانی^(۱)

10.22067/jacsm.2025.91402.1310

چکیده بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، بیش از ۳۸ میلیون نفر نابینا و بیش از ۱۱۰ میلیون نفر با مشکلات جدی بینایی روبه‌رو هستند. این پژوهش با هدف ارائه سیستمی کم‌هزینه و در دسترس برای کمک به افراد نابینا در محیط‌های کاری، از یک دوربین تک‌گانه (مثلاً دوربین تلفن همراه) و مدل‌های از پیش آموزش دیده بهره می‌برد. با استفاده از روش پردازش تصویر با حجم محاسباتی کم، هزینه‌های سخت‌افزاری و پردازشی بهینه می‌شود. در این سیستم، اشیاء و دست کاربر تشخیص داده می‌شوند و ارتفاع اجسام و فاصله آن‌ها تا دست محاسبه می‌شود. سپس از طریق راهنمایی صوتی، کاربر برای دسترسی ایمن به اشیاء هدایت می‌شود. در مقایسه با روش‌های پرهزینه مانند سیستم‌های دو دوربین یا سنسور کینکت، نوآوری اصلی این پژوهش کاهش چشمگیر هزینه‌ها با حفظ دقت کاربردی است؛ چرا که برای هدایت افراد نابینا در محیط‌های کاری، دقت میلی‌متری ضروری نیست. عملکرد سیستم به‌منظور دستیابی به خطای تخمین فاصله‌ای در حدود ۵ تا ۱۰ میلی‌متر بررسی خواهد شد؛ انتظار می‌رود دقت این سیستم در مقایسه با روش استریو ویژن مشابه باشد.

واژه‌های کلیدی سیستم کم‌هزینه، افراد نابینا، تشخیص اشیاء، راهنمایی صوتی، مدل‌های پیش‌آموزش دیده، دوربین تک‌گانه.

مقدمه

بینایی و عملکرد بینایی در نظر گرفته شود. اولین جنبه‌ای که باید در نظر گرفته شود، ساختار و عملکرد چشم است و سپس توانایی‌های فرد و پیامدهای عملی از دست دادن بینایی [3]. خدمات جامع توانبخشی بینایی و سیستم‌های کمکی به افراد دارای اختلالات بینایی این امکان را می‌دهد که کنترل بیشتری بر محیط خود داشته باشند، این امر به افزایش اعتماد به نفس، کاهش خطر افسردگی و اضطراب، و بهبود کیفیت زندگی منجر می‌شود [4].

در گذشته و پیش از ظهور الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق، طراحی سیستم‌های کمک‌رسان برای افراد نابینا یا کم‌بینا با

طبق آماری که سازمان بهداشت جهانی ارائه داده است، به طور تخمینی حدود ۳۸ میلیون فرد نابینا در دنیا وجود دارند و بیش از ۱۱۰ میلیون نفر از عارضه‌های بینایی رنج می‌برند که ممکن است برخی از این موارد به نابینایی کامل ختم شوند [1]، این موضوع بیانگر میزان اهمیت و جدی بودن مساله است. هدف از توانبخشی بینایی و ارائه سیستم‌های کمکی بهبود استقلال، ایمنی، کارایی و کیفیت کلی زندگی برای بیمارانی است که با از دست دادن بینایی یا اختلالات در عملکرد بینایی خود مواجه هستند [2]. جهت درک جوانب مختلف موضوع لازم است چهار جنبه اصلی از

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۰/۹ تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۲۹ می‌باشد.

(۱) دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - مازندران - بابل - ایران.

(۲) نویسنده مسئول/دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - مازندران - بابل - ایران.

(۳) دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - مازندران - بابل - ایران.

و دوربین مورد استفاده قرار گرفتند و محل پردازش داده‌ی حاصل شده در یک برد رزبری پای می‌باشد. سپس فرمان‌های صوتی لازم جهت هدایت فرد نابینا صادر می‌شود. زنتو و همکاران [20]، عصای هوشمندی را طراحی کردند که توانایی تشخیص اجسام و موانع تا فاصله ۲ متری را دارد و همینطور در این فاصله طولی قادر به تشخیص ارتفاع اجسام تا ۲ متر نیز می‌باشد. بانو و همکاران [21]، یک سیستم پوششی را ارائه دادند که قابلیت شناسایی موقعیت‌های ترافیکی، چراغ‌های راهنما، دوچرخه‌سواران، پل‌های عابر پیاده، عابرین پیاده، اتومبیل‌ها و برخی موارد دیگر را دارد. این سیستم با بهره‌گیری از استریوویژن به افرادی دارای اختلالات بینایی کمک می‌کند تا در محیط‌های بیرونی و همینطور داخلی بتوانند عملکرد بهتری داشته باشند. یونس و همکاران [22]، عینک هوشمندی را طراحی کرده‌اند که میزان خطر موجود در طول مسیر فردی که بخشی از توان بینایی خود را از دست داده است را بررسی می‌کند. بویمر و همکاران [23]، با استفاده از یک دوربین و یک کمر بند لمسی، سیستمی را پیاده‌سازی کردند که به افراد دارای اختلالات بینایی کمک می‌کند تا حالت چهره مخاطب آن‌ها را شناسایی و گزارش کند. بوترا [24]، سیستمی را جهت تشخیص مسیر امن برای افرادی که با عارضه‌های بینایی روبرو هستند طراحی و پیشنهاد کرده است. تنکون و همکاران [25]، مدلی را طراحی کردند که به افرادی که از اختلالات بینایی رنج می‌برند کمک می‌کند تا با استقلال بیشتری برای خرید به فروشگاه‌ها بروند.

پرادا و همکاران [26]، با استفاده از دو سنسور اولتراسونیک و یک سنسور فرسرخ، کمر بند هوشمندی را طراحی کردند که قابلیت تشخیص موانع با ارتفاعات مختلف را داشت. این ایده توسط جمعی از افرادی که اختلالات بینایی داشتند مطرح و ارائه شد. نمونه اولیه این طرح عملکرد خوبی در محیط‌های مختلف داشت اما قادر به تشخیص جهت موانع موجود بر سر راه افراد نبود. کانز و همکاران [27]، الگوریتمی را ارائه دادند که بر اساس آن زمان تخمینی برخورد فرد نابینا با موانع موجود بر سر راه محاسبه می‌شود. این طرح از متد جریان اپتیکال، مدل دوربین بین‌هول به منظور یافتن معادلات برخورد و تکنیک‌های پردازش تصویر برای کاهش خطا و نویز استفاده می‌کند. بویمر و همکاران [28]، با استفاده از یک دوربین و یک کمر بند لمسی، سیستمی را پیاده‌سازی کردند که به افراد دارای اختلالات بینایی کمک می‌کند

چالش‌های زیادی همراه بود. دلیل اصلی این مشکل، نیاز به درک داده‌های تصویری توسط ماشین بود؛ داده‌هایی که به دلیل جزئیات فراوان و ویژگی‌های پیچیده، بدون استفاده از شبکه‌های عصبی به‌سختی تحلیل می‌شدند. اما امروزه شبکه‌های عصبی -پایه‌ی اصلی الگوریتم‌های یادگیری عمیق- قادر به درک و پردازش داده‌های بسیار پیچیده هستند. پژوهشگران معماری‌های مختلف شبکه‌های عصبی را در حوزه‌های گوناگونی مانند رباتیک [6,5]، بهینه‌سازی [7-9]، کنترل [10,11] و بسیاری زمینه‌های دیگر به‌کار می‌برند. در حوزه‌ی پردازش تصویر و بینایی ماشین [12-14] نیز معماری‌های متنوعی از شبکه‌های عصبی توسعه یافته‌اند که به‌طور ویژه برای درک محتوای تصاویر طراحی شده‌اند.

در ادامه به بخشی از پژوهش‌های صورت پذیرفته در حوزه سیستم‌های کمکی برای افراد دارای اختلالات بینایی پرداخته شده است. نارایانی و همکاران [15]، به منظور بهبود عملکرد افراد نابینا در راه‌رفتن، با استفاده از دو سنسور اولتراسونیک، یک ماژول دوربین و یک حسگر مادون قرمز غیرفعال، یک عصا طراحی کردند که قادر به شناسایی موانع موجود بر سر راه فرد نابینا می‌باشد و در صورت نزدیک شدن فرد به آن‌ها، هشدارهای صوتی لازم را ارائه می‌دهد. مارکون و اورتوچلی [16]، طی تحقیقی میزان مؤثر بودن شناسایی اجسام به صورت بی‌درنگ را در شرایط کنترل نشده در یک محیط واقعی مورد بررسی قرار دادند در طول این فرآیند عملکرد ورژن‌های مختلف یولو تا ورژن چهارم مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت بهترین نتیجه توسط یولو ورژن چهارم حاصل شد که نتیجه آن بیش از ۹۳ درصد موفقیت‌آمیز بود. کیلیان و همکاران [17]، دستکش هوشمندی را طراحی کردند که با استفاده از دوربین زمان پرواز تعبیه شده روی آن، این امکان را داشت تا اجسام، موانع و همینطور فاصله آن‌ها را تشخیص دهد. پس از آنکه جسم یا مانعی تشخیص داده شود با استفاده از ۹ عملگر لرزشی تعبیه شده بر روی دستکش، به فرد محل قرار گیری آن را گزارش می‌دهد.

اهرچی و کبیر [18]، طرحی را پیشنهاد دادند. به این صورت که با استفاده از استریوویژن و سنسور GPS میتوان افراد نابینا را به سمت هدف و مسیری که دارند هدایت کرد. آدپ و همکاران [19]، برای توسعه استقلال افراد نابینا در راه رفتن، سیستم هوشمندی را طراحی کردند. در این پروژه سنسورهای فرسرخ

به رو هستند. با توجه به سبک زندگی امروزه که بخش قابل توجهی از زمان افراد پشت میزهای کار گذرانده می‌شود این نیاز حس می‌شود که افراد توانخواه نیز این امکان را داشته باشند تا بتوانند در فعالیت‌های خود استقلال بیشتری کسب کنند. نوآوری اصلی این پژوهش در طراحی سیستمی تک‌دوربین و کم‌هزینه مبتنی بر تلفن همراه است که با هدف افزایش استقلال نابینایان در تعامل با اشیاء محیط‌های کاری ثابت (به‌ویژه فضای میزکار) توسعه یافته است. در این راستا، نخستین بار تعامل نابینایان با اشیاء در محیط بسته پشت میز به‌صورت هدفمند مورد توجه قرار گرفته است. سیستم پیشنهادی با به‌کارگیری ترکیبی از مدل یولو نسل هشتم سری نانو برای شناسایی اشیاء و مدل مدیایپ برای موقعیت‌یابی دست در فضای حقیقی، روشی ساده و ریاضی‌محور جهت تخمین ارتفاع و موقعیت اجسام بدون نیاز به سنسور عمق ارائه می‌دهد. همچنین روش پیشنهادی دقتی معادل روش استریوویژن - اما با دو مزیت بنیادین کاهش چشمگیر حجم محاسبات و حذف نیاز به سخت‌افزار اضافی (استفاده از یک دوربین به‌جای دو دوربین) - محقق ساخته است. این رویکرد کم‌هزینه با حداقل پردازش، گامی مؤثر در جهت کاربردهای عملیاتی محیط‌های واقعی است. در بخش دوم مقاله (مواد و روش‌ها)، معماری سیستم پیشنهادی شامل مراحل کالیبراسیون دوربین، شناسایی اشیاء و دست با به‌کارگیری مدل‌های یولو و مدیایپ، تخمین ارتفاع اجسام و شیوه هدایت دست تشریح می‌شود. بخش سوم (یافته‌ها) به ارزیابی عملکرد سیستم در سه محور خطای تخمین فاصله، دقت سنجش ارتفاع اجسام و هزینه زمانی پردازش می‌پردازد. در ادامه، محدودیت‌های فنی سیستم در بخش چهارم و نتیجه‌گیری همراه با پیشنهادات توسعه آینده در بخش پنجم ارائه می‌گردد.

مواد و روش‌ها

پژوهش پیش‌رو ایده و طرح اولیه از سیستمی را ارائه می‌دهد که قادر به شناسایی اجسام و دست انسان می‌باشد و پس از به انجام رساندن این مرحله، به تخمین فاصله اجسام از دست انسان که روی میز قرار گرفته است می‌پردازد. با بهره‌گیری از سیستم تعامل صوتی تعبیه شده در برنامه سیستم، پیام صوتی مناسب، جهت راهنمایی فرد به منظور دسترسی به جسم مورد نظر ارائه می‌شود. لازم به ذکر است، زبان برنامه نویسی پایتون در این پروژه مورد

تا حالت چهره مخاطب آن‌ها را شناسایی و گزارش کند. این سیستم به افراد کمک می‌کند در تعاملات اجتماعی عملکرد مناسبی داشته باشند و بتوانند کیفیت روابط خود را ارتقا بخشند. عملکرد سیستم ارائه شده، بهبود ۴۴/۴ درصدی در تشخیص عواطف مخاطبین توسط افراد نابینا داشته است. لین و همکاران [29]، جهت توسعه درک بصری افرادی که از اختلالات بینایی رنج می‌برند، سیستمی را طراحی کردند که با استفاده از یک دوربین رنگی-عمقی و الگوهای یادگیری عمیق قادر به تشخیص اجسام و شناسایی مسیر پیش‌روی فرد می‌باشد. این سیستم پس از تحلیل تصاویر، اجسام شناسایی شده را به صورت صوتی به کاربر گزارش می‌دهد و سپس مطابق خواسته او فرمان‌های هدایتی صادر می‌شود.

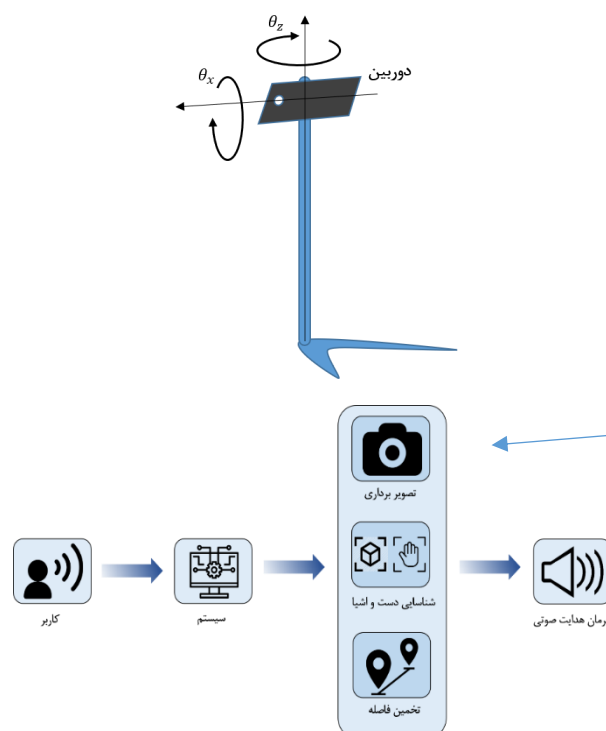
کوریاکوزه و همکاران [30] در یک مطالعه آزمایشگاهی، بهینه‌بودن دستورالعمل‌های صوتی و لرزشی (به دو شکل گام‌به‌گام کوتاه و شرح جامع مسیر) را برای ناوبری شرکت‌کنندگان کم‌بینا و نابینا ارزیابی کردند. عملکرد افراد با اندازه‌گیری خطای انحراف از مسیر و زمان تکمیل مسیر تحلیل شد که تفاوت معناداری بین کارایی دو روش دستورالعمل (کوتاه در مقابل مفصل) نشان نداد. با این حال، نظرسنجی‌ها بیانگر آن بود که ترجیح بین این روش‌ها پارامتری نسبی و وابسته به سلیقه فردی استاسدحسین و همکاران [31] نمونه اولیه‌ای از یک عصای هوشمند مبتنی بر میکروکنترلر ارائه کردند که با بهره‌گیری از حسگرهای تشخیص آب، اولتراسونیک، و مژول‌های جی‌پی‌اس، موانع را برای کاربران نابینا شناسایی می‌کند. طراحی تاشونده‌ی این سیستم، قابلیت حمل را بهبود بخشیده و یک سیستم ناوبری هوشمند برای فضاهای باز مبتنی بر آن پیاده‌سازی شده است که آزمایش‌های میدانی، اثربخشی آن در کمک به مسیریابی افراد دارای اختلال بینایی را تأیید می‌کند. علیرغم این مزایا، وزن نسبتاً بالای دستگاه، چالشی برای حمل آسان محسوب می‌شود. ماتاچیا و همکاران [32] عینکی طراحی کردند که در آن دوربین‌های استریوویژن تعبیه شده بود و قابلیت تشخیص اجسام و فاصله آن‌ها را داشت. این سیستم با استفاده از عملگرهای لرزشی و هشدارهای صوتی، فرد دارای اختلالات بینایی را در مواجهه با اجسام و محیط‌های مختلف هدایت و راهنمایی می‌کند. در پژوهش‌های اخیر تمرکز عموماً بر روی مساله جابجایی افراد معطوف بوده است در حالیکه این افراد با چالش‌های بسیاری رو

مشخص و در آن ارتفاع و زاویه نسبت به سطح میز در شرایط ثابتی قرار گیرد و سپس در همان شرایط کالیبره شده و در همان موقعیت باقی بماند. فرض شده است اجسام روی میز به صورت ثابت قرار گرفته‌اند و حرکتی به خودی خود ندارند اما در صورت جابجایی آن‌ها به واسطه دست افراد، به روز رسانی جایگاه آن‌ها در طی فرآیند به درستی انجام خواهد گرفت.

کالیبراسیون

فرآیند کالیبراسیون با هدف تخمین مشخصه‌های ذاتی دوربین و موقعیت قرارگیری آن نسبت به فضای کاری سیستم صورت می‌پذیرد. در رابطه (۱)، ماتریس T_c بیانگر تبدیل کلی از فضای سه‌بعدی جهان واقعی به تصویر دوبعدی ثبت‌شده توسط دوربین است. این تبدیل از ترکیب دو بخش اصلی تشکیل می‌شود: ماتریس ذاتی دوربین و ماتریس بیرونی. ماتریس ذاتی دوربین یک ماتریس 3×3 است که ویژگی‌های داخلی دوربین را در فرآیند تصویربرداری مدل‌سازی می‌کند. این ماتریس شامل پارامترهایی مانند فاصله کانونی، نقطه مرکزی تصویر و ضریب انحراف تصویر است. در رابطه (۱)، f_x و f_y طول‌های کانونی هستند، c_x و c_y مختصات نقطه مرکزی در صفحه تصویر هستند و s ضریب انحراف است. تعیین دقیق پارامترهای ماتریس ذاتی (T_I) دوربین نیاز به تکرارهای متعدد با تصاویر مختلف، جهت حل معادلات پیچیده بهینه‌سازی دارد. ماتریس بیرونی (T_E) در بینایی ماشین، ماتریسی است که موقعیت و جهت‌گیری دوربین را در فضای سه‌بعدی نسبت به یک سیستم مختصات مرجع توصیف می‌کند. این ماتریس شامل دو بخش اصلی است: یک ماتریس چرخش که جهت‌گیری دوربین را نشان می‌دهد و یک بردار انتقال که موقعیت دوربین را مشخص می‌کند. ماتریس بیرونی برای تبدیل مختصات نقاط سه‌بعدی از سیستم مختصات حقیقی به سیستم مختصات دوربین استفاده می‌شود و نقش مهمی در فرآیند کالیبراسیون دوربین ایفا می‌کند. از آنجایی که سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که افراد می‌توانند تنها با استفاده از دوربین تلفن همراه خود امکان استفاده از آن را داشته باشند، انجام فرآیند کالیبراسیون دوربین‌های مختلف نسبت به مشخصه‌های هر دوربین و موقعیت قرارگیری دوربین نسبت به محیط (ارتفاع و زاویه قرارگیری دوربین نسبت به سطح میز)

استفاده قرار گرفته است. توجه داشته باشید در این پژوهش سعی شده است تا با کمترین میزان هزینه، سیستمی کاربردی پیشنهاد و ارائه گردد و به همین سبب سیستم مورد نظر از دوربین تلفن همراه افراد برای تصویر برداری استفاده می‌کند که این موضوع موجب دسترسی راحت‌تر و مقرون به صرفه بودن آن می‌گردد، علاوه بر این در بخش استفاده از داده‌های تصویری سعی شده است روشی بهینه جهت حصول کمترین میزان حجم پردازشی پیاده‌سازی شود. شکل (۱) نمای کلی از عملکرد سیستم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ابتدا سیستم از طریق گیرنده صوتی فرمان کاربر را دریافت می‌کند. سپس دستور تصویربرداری صادر شده و تصویر ثبت می‌شود. در مرحله بعد، تصویر برای شناسایی دست و اشیاء پردازش می‌گردد. پس از آن، با انجام محاسبات لازم، فاصله و جهت حرکت دست نسبت به شیء مورد نظر تخمین زده می‌شود و در نهایت، این اطلاعات به صورت فرمان صوتی هدایت‌کننده به کاربر ارائه می‌شود.



شکل ۱. نمای کلی از نحوه عملکرد سیستم

سیستم پیشنهادی جهت استفاده روی میز طراحی شده است و به توانخواهان کمک می‌کند پشت میزهای خود بتوانند از وجود اجسام مختلف آگاهی پیدا کنند و در صورت نیاز به آن‌ها دسترسی داشته باشند. ابتدا لازم است محل قرارگیری دوربین

ضروری است.

$$T_c = T_I T_E$$

$$T_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{s}{f_x} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_E = [I|P] \times \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

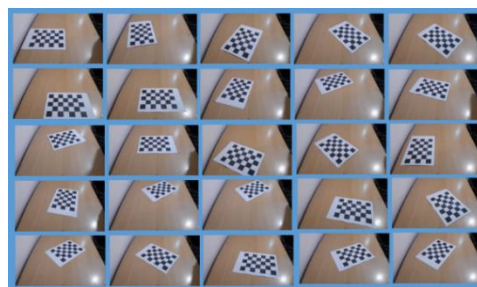
$$P = [x_c \ y_c \ z_c]^T$$

$$R = (R_x R_z)$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_x & -S\theta_x \\ 0 & S\theta_x & C\theta_x \end{bmatrix}, R_z = \begin{bmatrix} C\theta_z & -S\theta_z & 0 \\ S\theta_z & C\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(۱)

در این پژوهش فرآیند کالیبراسیون با هدف محاسبه ماتریس تبدیل T_c که در برگرنده مشخصه‌های ذاتی دوربین و موقعیت قرار گیری آن نسب به سطح مورد بررسی است، با استفاده از صفحه شطرنجی و کتابخانه OpenCV صورت پذیرفته است. در طی این فرآیند لازم است تا صفحه شطرنجی در زوایا و موقعیت‌های مختلفی نسبت به دوربین قرار داده شود و از آن تصویر برداری شود. در ادامه این تصاویر برای تخمین پارامترهای ماتریس T_I و T_E مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل (۲)، بخشی از این تصاویر نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲ نمونه تصاویر ضبط شده جهت فرآیند کالیبراسیون

رابطه‌ی (۲) بیانگر فرآیند تبدیل مختصات یک نقطه از فضای واقعی (جهان) به صفحه‌ی تصویر دوربین است. در این معادله، مختصات متریک نقطه مورد نظر در فضای سه‌بعدی واقعی (K_{ij}^w سیستم مختصات جهانی) را نشان می‌دهد، و K_{ij} مختصات پیکسلی همان نقطه را در تصویر دوبعدی ثبت‌شده توسط دوربین نمایش می‌دهد. ماتریس T_c نیز ماتریس تبدیل دوربین است که ترکیبی از پارامترهای ذاتی و موقعیتی دوربین بوده و مسئول انتقال صحیح اطلاعات از فضای سه‌بعدی به تصویر دوبعدی می‌باشد.

این تبدیل نقش کلیدی در بازسازی هندسی صحنه و تحلیل موقعیت اشیاء در تصویر ایفا می‌کند. می‌توان با استفاده از رابطه (۲)، معلوم بودن ماتریس T_c و مختصات پیکسلی هر نقطه از تصویر به مختصات آن در فضای حقیقی دست یافت.

$$\begin{aligned} K_{ij} &= T_c K_{ij}^w \\ K_{ij} &= [P_x \ P_y \ 1]^T, \\ K_{ij}^w &= [X \ Y \ Z \ 1]^T \end{aligned} \quad (۲)$$

پارامترهای مربوط به دو ماتریس K_{ij} و K_{ij}^w در رابطه (۲) ارائه شده است. P_x و P_y به ترتیب معرف مختصات پیکسلی افقی و عمودی در تصویر بوده و X ، Y و Z بیانگر پارامترهای مختصاتی در فضای سه بعدی (فضای حقیقی) به صورت متریک می‌باشند.

شناسایی اشیاء و دست

یولو نسل هشتم [34,33] یک مدل یادگیری عمیق در حوزه تشخیص اشیاء است که به دلیل دقت بالا و سرعت مناسب در پردازش تصاویر، به‌ویژه برای کاربردهای بلادرنگ، در بسیاری از پروژه‌های بینایی ماشین و سیستم‌های هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل دارای طراحی بهینه‌شده‌تری نسبت به نسخه‌های پیشین خود است و از ساختار ماژولار و پیاده‌سازی ساده‌تری بهره می‌برد که آن را برای آموزش و استفاده در کاربردهای پژوهشی و صنعتی مناسب می‌سازد. یولو نسل هشتم در نسخه‌های مختلفی مانند s ، m ، x و l ارائه شده که هر کدام توانایی میان دقت و سرعت پردازش را فراهم می‌کنند. نسخه n به واسطه کمترین میزان پارامتر یادگیری آن، سریع‌ترین نسخه و البته کمترین میزان دقت را در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد و نسخه x بیشترین زمان انجام عملیات و بیشترین دقت را به خود اختصاص داده است. از آنجایی که در این پژوهش، زمان از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و در طی تست‌های گرفته شده مشخص شد نسخه n دقت مناسبی در کاربرد مورد نظر دارد از این نسخه جهت پیاده‌سازی شناسایی اجسام استفاده شده است. سناریو مورد نظر به این صورت است که ابتدا اجسام شناسایی می‌شوند و در ادامه لازم است دست شناسایی شده و یک نقطه مرجع روی آن تعیین شود تا با دقت بیشتری موقعیت آن بررسی شود و سپس نقطه تعیین شده دنبال شود. دنبال کردن نقطه تعیین شده علاوه بر اینکه توان پردازشی کمتری نسبت به شناسایی مجدد آن صرف می‌کند، سرعت فرآیند را نیز بهبود می‌بخشد. مدل مدیاپایپ [35] یکی از ابزارهای پیشرفته در زمینه شناسایی نقاط مختلف بدن و تحلیل حرکات است که توسط

پیکسلی به مختصات حقیقی نقاط می‌توان دست یافت.

$$K_{ij} = [\{Y_i\}.x_b \quad \{Y_i\}.y_b \quad 1]^T, \\ K_{ij}^w = [\{Y_i\}.x_b^p \quad \{Y_i\}.y_b^p \quad \{Y_i\}.z^p \quad 1]^T \quad (3)$$

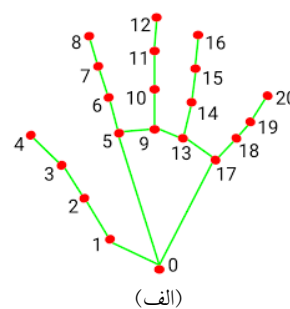
همانطور که پیش‌تر اشاره شد، K_{ij} معرف مختصات پیکسلی و K_{ij}^w معرف مختصات فضای حقیقی در رابطه (۳) می‌باشد. لازم به ذکر است $\{Y_i\}$ بیانگر شیء شناسایی شده یا نقاط کلیدی تشخیص داده شده بر روی دست انسان می‌باشد. $\{Y_i\}.x_b$ و $\{Y_i\}.y_b$ به ترتیب مختصات موقعیت نقطه‌ای موارد شناسایی شده در فضای پیکسلی تصویر می‌باشد. از سوی دیگر $\{Y_i\}.x_b^p$ ، $\{Y_i\}.y_b^p$ و $\{Y_i\}.z^p$ مختصات نقطه‌ای در فضای سه بعدی را به صورت متریک نشان می‌دهند. از آنجایی که اجسام روی سطح میز قرار داده شده‌اند و نقطه تماس آن‌ها با سطح میز مورد نظر است، پارامتر مربوط به ارتفاع عمودی ($\{Y_i\}.z^p$) برابر با صفر قرار داده شده است (مطابق رابطه ۴). این فرضیه به این دلیل در نظر گرفته می‌شود که تمامی نقاط تماس اجسام با سطح میز در یک صفحه افقی قرار دارند. در نتیجه، مطابق رابطه (۳) پارامترهای دیگر مختصات ($\{Y_i\}.x_b^p$ ، $\{Y_i\}.y_b^p$) از معادلات حاصل می‌شوند و موقعیت دقیق نقاط تماس را مشخص می‌کنند. این رویکرد به ساده‌سازی معادلات و کاهش پیچیدگی محاسبات کمک می‌کند، چرا که تنها نیاز به بررسی مختصات دوبعدی اجسام بر روی سطح میز داریم. در نتیجه این موضوع فضای کاری سیستم تنها فضای ۲ بعدی سطح میز می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \{Y_i\}.x_b \\ \{Y_i\}.y_b \\ 1 \end{bmatrix} = T_c \begin{bmatrix} \{Y_i\}.x_b^p \\ \{Y_i\}.y_b^p \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

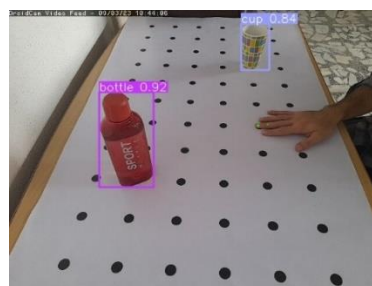
تخمین ارتفاع اجسام و محدوده برخورد

با توجه به شکل (۴)، پس از آنکه تصویر ضبط شده توسط ماتریس تبدیل سیستم در فضای حقیقی تصویر شده است، مشاهده می‌شود که سطح اشغال شده توسط جسم روی میز بسیار بیشتر از میزان واقعی به نظر می‌رسد. دلیل این موضوع، در نظر نگرفتن پارامترهای عمق و ارتفاع اجسام است. عدم توجه به این پارامترها باعث می‌شود تا ابعاد و موقعیت جسم در تصویر تحریف شده و به اشتباه بزرگ‌تر از اندازه واقعی خود نمایش داده شود، که می‌تواند منجر به تحلیل نادرست از فضای اشغال‌شده توسط جسم گردد.

گوگل توسعه یافته است. این مدل به ویژه در زمینه‌هایی مانند واقعیت افزوده و ردیابی حرکات بدن کاربرد دارد و توانایی شناسایی و دنبال کردن نقاط کلیدی بدن، از جمله دست‌ها، صورت، و بدن کامل را داراست. برای آموزش این مدل، از مجموعه داده‌های بسیار وسیع و متنوعی استفاده شده است که شامل میلیون‌ها تصویر و ویدئو از افراد در موقعیت‌ها و حالات مختلف است. این داده‌ها به مدل کمک می‌کند تا با دقت بالا نقاط مختلف بدن را شناسایی و دنبال کند، حتی در شرایط نوری و زاویه‌های مختلف. مدیپایپ به دلیل دقت و سرعت بالا در شناسایی نقاط بدن، به یک ابزار قدرتمند در بسیاری از برنامه‌ها تبدیل شده است. همانطور که در شکل (۳-الف) نمایش داده شده است، مدیپایپ قادر به شناسایی ۲۰ نقطه کلیدی بر روی دست انسان می‌باشد. در این پژوهش از مدیپایپ جهت شناسایی دست استفاده شده و به عنوان مرجع انتهای انگشت میانی (نقطه شماره ۱۲) انتخاب شده است.



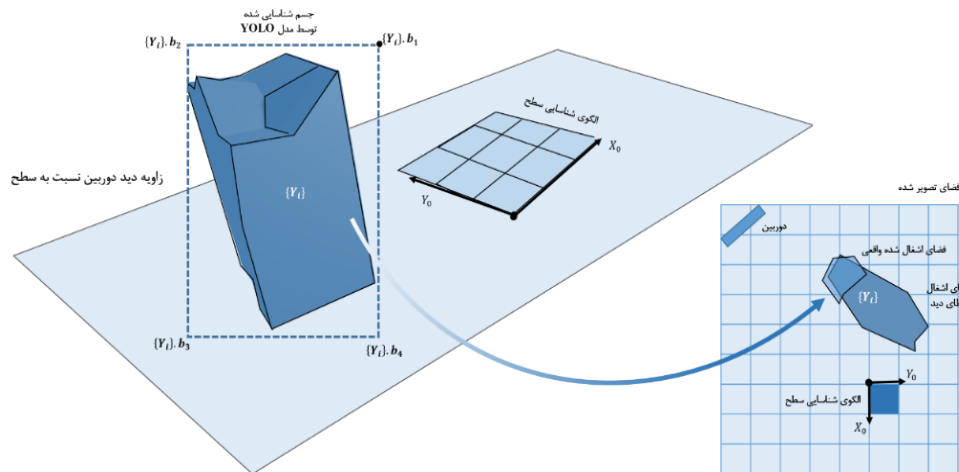
(الف)



(ب)

شکل ۳ الف) نقاط کلیدی قابل شناسایی توسط مدل مدیپایپ بر روی دست انسان. ب) نتیجه مدل‌های yolo و مدیپایپ در شناسایی اجسام و نقاط کلیدی دست انسان

در ادامه با داشتن مختصات مربوط به اجسام و دست به صورت پیکسلی، به محاسبات تعیین موقعیت آن‌ها در فضای حقیقی پرداخته شده است. با استفاده از ماتریس تبدیل سیستم که در بخش کالیبراسیون محاسبه گردید و رابطه (۲) از مختصات



شکل ۴. نمایشی از خطای سیستم در صورت تعیین نکردن محدوده سطح اشغالی اجسام

نقطه میانی ضلع بالا و پایین قابل محاسبه می‌باشد. در ادامه مختصات پیکسلی این دو نقطه در معادلات مربوط به محاسبه ارتفاع اشیاء مورد استفاده قرار گرفته می‌شود. در رابطه (۵)، با داشتن مختصات پیکسلی نقطه میانی ضلع پایین از جعبه مرزی $\{Y_i\}.u$ و $\{Y_i\}.u[1]^p$ به محاسبه مختصات فضای حقیقی آن $\{Y_i\}.u[1]^p$ پرداخته شده است.

$$\begin{aligned} \{Y_i\}.m_{2 \times 1} &= \text{mean}(\{Y_i\}.b_3, \{Y_i\}.b_4) \\ \{Y_i\}.u_{2 \times 1} &= \text{mean}(\{Y_i\}.b_1, \{Y_i\}.b_2) \end{aligned} \quad (5)$$

از آنجایی که جسم شناسایی شده بر روی سطح میز قرار دارد، تمام نقاط ضلع پایینی جعبه مرزی نیز روی میز فرض شده و به همین سبب مقادیر مربوط به پارامتر ارتفاع (مشخصه z) برای تمامی این نقاط صفر در نظر گرفته شده است.

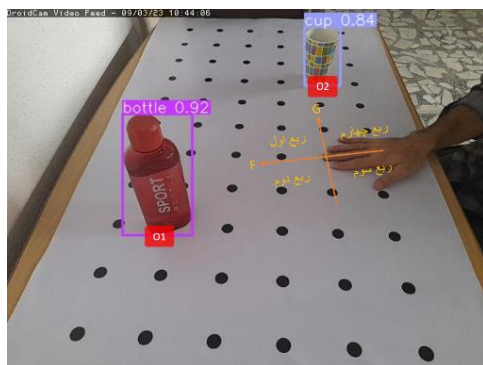
$$\begin{bmatrix} \{Y_i\}.u[1] \\ \{Y_i\}.u[2] \\ 1 \end{bmatrix} = T_c \begin{bmatrix} \{Y_i\}.u[1]^p \\ \{Y_i\}.u[2]^p \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

جهت محاسبه ارتفاع جسم، لازم است مختصه ارتفاع در فضای حقیقی، در نقطه میانی ضلع بالایی جعبه مرزی تخمین زده شود. همانطور که در شکل (۵) قابل مشاهده است، دو نقطه میانی بالا و پایین جعبه مرزی در فضای حقیقی، دو مؤلفه مشترک و همسان دارند زیرا در راستای عمود بر سطح میز قرار گرفته‌اند.

در این پژوهش، به لیست اجسام قابل شناسایی توسط سیستم، پارامتری برای تفکیک اجسام مرتفع و غیرمرتفع اضافه شده است. این پارامتر به سیستم کمک می‌کند تا بین اجسامی که ارتفاع قابل توجهی دارند و آنهایی که ارتفاع کمتری دارند، تمایز قائل شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش، برای تخمین سطح اشغالی روی میز توسط اجسام مرتفع، پارامتر عمق آن‌ها برابر با ضلع کوچکتر جعبه مرزی در نظر گرفته شده است. این فرض به این معنی است که عمق جسم مرتفع به اندازه ضلع کوچکتر جعبه مرزی که دور آن جسم رسم شده، در نظر گرفته می‌شود. از سویی دیگر، برای اجسام غیرمرتفع، فرض شده است که فضای اشغالی آن‌ها مطابق با خروجی ماتریس تبدیل است. این به این معنی است که اجسام غیرمرتفع بدون نیاز به در نظر گرفتن عمق اضافی، تنها با استفاده از ابعاد دو بعدی تصویر تحلیل می‌شوند. پس از شناسایی اجسام توسط مدل یولو، و دریافت مشخصات جعبه مرزی آن‌ها به عنوان خروجی، مرحله بعدی استفاده از این داده‌ها برای تخمین دقیق‌تر ابعاد اجسام است.

برای تخمین میزان ارتفاع اجسام، روشی ارائه شده است که بر اساس مختصات پیکسلی نقاط میانی ضلع بالایی و پایینی جعبه مرزی عمل می‌کند. این روش با استفاده از این مختصات، قادر است ارتفاع واقعی اجسام را با دقت مناسبی تخمین بزند. این فرآیند شامل تحلیل داده‌های پیکسلی و تبدیل آن‌ها به فضای سه‌بعدی است که به نوبه خود به بهبود دقت تحلیل فضای اشغالی و ارائه اطلاعات مفیدتر در مورد ابعاد اجسام کمک می‌کند. با استفاده از روابط (۵) مختصات دو نقطه مورد نظر از جعبه مرزی،

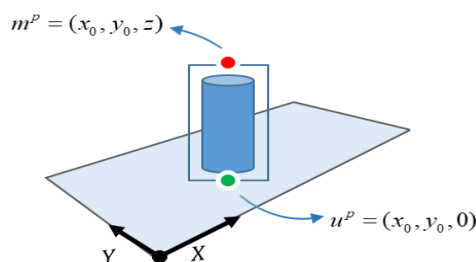
نقطه شماره ۱۱ (شکل ۳) نیز به دلیل مطرح شده مورد شناسایی قرار گرفته است. اولین گام تشخیص موقعیت هر جسم نسبت به دست انسان و تقسیم بندی آن به چهار بخش که در تصویر (۶) نمایش داده شده است میباشد. برای مثال در شکل (۶) موقعیت جسم شماره ۲ (O2) نسبت به دست در ربع چهارم و بطری در ربع دوم قرار گرفته است. محور F راستای انگشت میانی (محور گذرا از دو نقطه با شماره‌های ۱۱ و ۱۲ بر روی دست) است که با استفاده از دو نقطه تشخیص داده شده توسط مدل مدیاپایپ بر روی این انگشت ترسیم شده است. محور G، عمود بر محور F در نقطه انتهایی انگشت میانی می‌باشد، و به این ترتیب ۴ ناحیه توسط این دو محور ایجاد شده است.



شکل ۶ تقسیم بندی چهارگانه نواحی اطراف دست

معادلات محاسبه محورهای F و G طبق روابط شماره (۸) قابل محاسبه می‌باشد. P_{h11}^w و P_{h12}^w به ترتیب بیانگر مختصات نقاط کلیدی دست با شماره‌های ۱۱ و ۱۲ (مطابق شکل ۳-الف) می‌باشند که در صفحه میز بوده و در واحد متریک بیان شده‌اند و M_F شیب خط گذرا از دو نقطه ۱۱ و ۱۲ (شیب محور F) می‌باشد. از آنجایی که سیستم مختصات را تنها بر روی صفحه مرجع (سطح میز و به صورت ۲ بعدی) در نظر می‌گیرد، پارامتر مرتبط به ارتفاع آن‌ها صفر در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} P_{h11}^w &= (P_{h11}^w[1], P_{h11}^w[2]) \\ P_{h12}^w &= (P_{h12}^w[1], P_{h12}^w[2]) \\ M_F &= \frac{P_{h11}^w[2] - P_{h12}^w[2]}{P_{h11}^w[1] - P_{h12}^w[1]} \\ F(x) &= M_F \times (x - P_{h12}^w[1]) + P_{h12}^w[2] \\ G(x) &= \frac{-1}{M_F} \times (x - P_{h12}^w[1]) + P_{h12}^w[2] \end{aligned} \quad (8)$$



شکل ۵ نمایشی از دو نقطه میانی بالا و پایین جعبه مرزی و مختصات فضای حقیقی آن‌ها

از آنجایی که مؤلفه‌های فضای حقیقی نقطه پایینی با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است، می‌توان از این مقادیر استفاده کرد و رابطه (۷) را با استفاده از جایگذاری مختصات پیکسلی نقطه بالایی و دو مؤلفه مختصات فضای حقیقی نقطه پایینی نوشت. در این صورت تنها مؤلفه مجهول، پارامتر مربوط به محور عمود بر سطح $\{Y_i\}, m_z^p$ می‌باشد که متعلق به نقطه بالایی از جعبه مرزی بوده و می‌توان آن را معادل ارتفاع اشیاء در نظر گرفت.

$$\begin{bmatrix} \{Y_i\}, m[1] \\ \{Y_i\}, m[2] \\ 1 \end{bmatrix} = T_C \begin{bmatrix} \{Y_i\}, u[1]^p \\ \{Y_i\}, u[2]^p \\ \{Y_i\}, m_z^p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

به منظور تخمین پارامتر $\{Y_i\}, m_z^p$ بازه‌ای از اعداد محتمل در طی برنامه تولید شده و بجای آن جایگذاری می‌شود، سپس سمت راست معادله (۷) محاسبه می‌شود. نتیجه این عملیات، ایجاد یک مختصات پیکسلی برای هر مقداری است که جایگذاری شده است. از میان مختصات پیکسلی ایجاد شده نزدیک‌ترین نتیجه به نقطه $\{Y_i\}, m$ گزینش شده و مقدار جایگذاری شده برای پارامتر ارتفاع آن به عنوان ارتفاع تخمین زده شده گزارش می‌شود.

هدایت دست

در مراحل پیشین، شناسایی دست و اشیاء با استفاده از مدل‌های یولو و مدیاپایپ صورت گرفته است. و همانطور که گفته شد یک نقطه مشخص و مرجع جهت تعیین مختصات در فضای حقیقی مورد نیاز است. نقطه انتهایی انگشت میانی (نقطه شماره ۱۲ در شکل ۳) به عنوان نقطه مرجع روی دست مد نظر قرار گرفته است. با توجه به این موضوع که جهت قرار گیری دست نسبت به اجسام نیز حائز اهمیت می‌باشد، نیاز است نقطه‌ای دیگر نیز به منظور تشخیص جهت قرار گیری دست شناسایی شود.

پس از آنکه موقعیت و زاویه قرارگیری جسم نسبت به دست انسان طی مراحل قبل محاسبه شد، به منظور هدایت دست به سمت جسم مورد نظر از روش جهت عقربه‌های ساعت استفاده شده است. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود راستای انگشت میانی، جهت ساعت ۱۲ را نشان می‌دهد و سایر موقعیت‌ها متناسب با زاویه آن‌ها و اینکه در کدام ربع نسبت به دست قرار گرفته اند در جهت سایر اعداد ساعت تقسیم بندی می‌شوند.

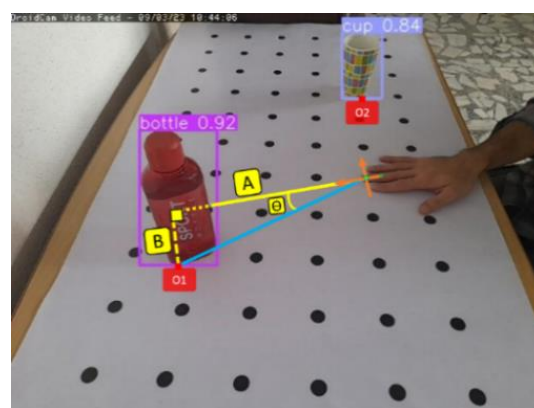
سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که قادر است دستورات را به صورت صوتی دریافت کرده و متناسب با درخواست کاربر، پیام و گزارش مناسب را نیز به صورت صوتی ارائه دهد. با استفاده از کتابخانه‌ی تبدیل متن به صوت در پایتون، تعدادی از واژگان معنادار برای سیستم تعریف شده‌اند که شامل لیست نام اجسام قابل شناسایی توسط یولو و واژه‌ی "ریپورت" می‌شود. زمانی که سیستم دستور "ریپورت" را دریافت می‌کند، ابتدا تصویری توسط دوربین ثبت می‌شود و با استفاده از مدل یولو، اجسام موجود در تصویر شناسایی می‌شوند. سپس نام این اجسام در لیستی ذخیره می‌شود و جایگاه دست کاربر نیز با استفاده از مدل مدیایپایپ تعیین می‌گردد. در نهایت، برنامه متنی را آماده می‌کند که شامل توضیحاتی درباره‌ی اجسام شناسایی شده و موجود در تصویر است. این متن به کتابخانه تبدیل متن به صوت ارجاع داده شده و سیستم آن را به یک فایل صوتی تبدیل می‌کند و سپس پخش می‌نماید، به این ترتیب کاربر اطلاعات لازم را در ارتباط با اجسام قابل دسترسی و موجود دریافت می‌کند. پس از ارائه‌ی گزارش، برنامه در حالت انتظار باقی می‌ماند تا دستور جدیدی دریافت کند. این دستور می‌تواند فراخواندن نام یکی از اجسام شناسایی شده باشد. در این حالت، سیستم با دریافت نام جسم مورد نظر، کاربر را به صورت صوتی هدایت می‌کند و مشخص می‌شود که دست خود را به چه سمتی (بر اساس عقربه‌های ساعت) و به چه طولی (در واحد سانتی‌متر) جابجا کند تا بتواند به جسم مورد نظر دسترسی پیدا کند. شکل (۸)، نحوه تعامل صوتی سیستم با کاربر را نمایش می‌دهد. همچنین جدول ۲ زوایا و یک چهارم‌های تعامل را بررسی می‌کند.

در ادامه با داشتن معادلات دو محور F و G می‌توان موقعیت هر نقطه بر روی میز را نسبت به دست با استفاده از جدول (۱) در چهار ربع شناسایی کرد.

جدول ۱ شناسایی موقعیت قرارگیری هر نقطه نسبت به دستگاه مختصات تشکیل داده شده روی دست

ربع اول	$o^w[2] > F(o^w[1]), o^w[2] > G(o^w[1])$
ربع دوم	$o^w[2] < F(o^w[1]), o^w[2] > G(o^w[1])$
ربع سوم	$o^w[2] < F(o^w[1]), o^w[2] < G(o^w[1])$
ربع چهارم	$o^w[2] > F(o^w[1]), o^w[2] < G(o^w[1])$

گام بعدی تشخیص زاویه نقاط کلیدی اجسام نسبت به دست انسان می‌باشد. مطابق شکل (۷) زوایای نقاط کلیدی (نامگذاری شده با حرف O) نسبت به محورهای F و G محاسبه شده و مقدار θ برگردانده می‌شود.



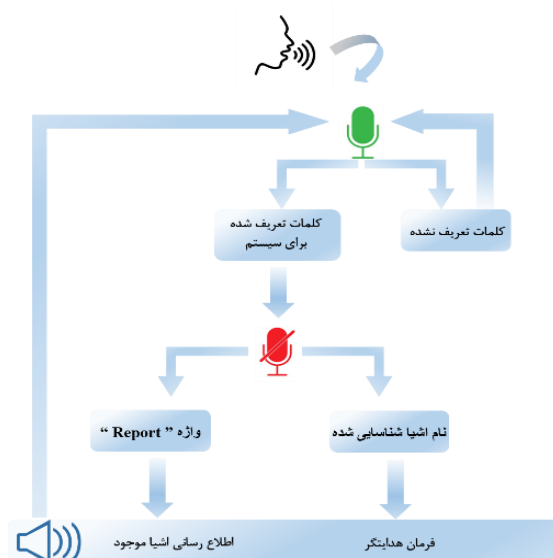
(الف)



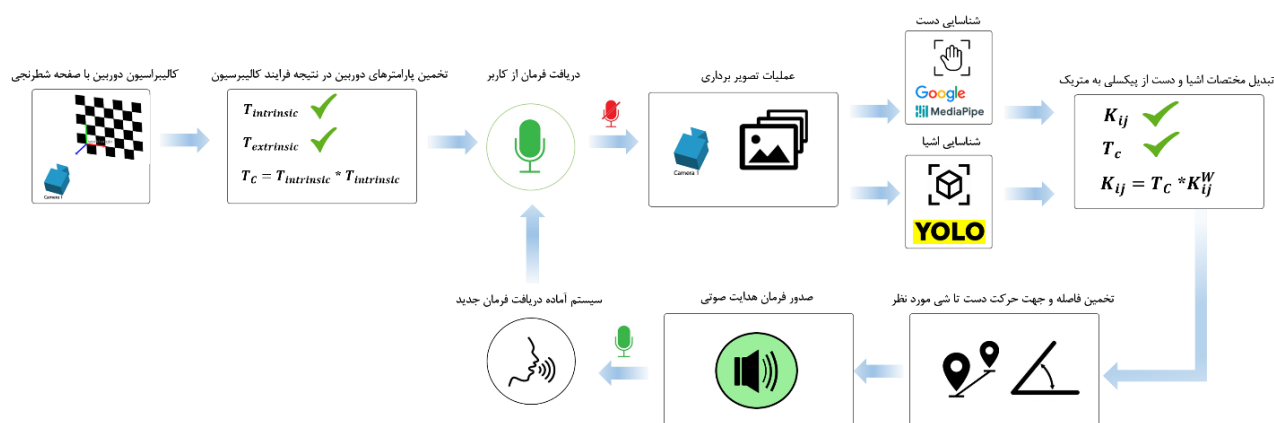
(ب)

شکل ۷ (الف) نمایی از روش تخمین زاویه جسم نسبت به دست (ب) همپوشانی راستای دست و عقربه‌های ساعت

ناحیه قرار گیری جسم نسبت به دست	$0 < \theta < 15$	$15 < \theta < 45$	$45 < \theta < 75$	$75 < \theta < 90$
ربع اول	ساعت ۱۲	ساعت ۱	ساعت ۲	ساعت ۳
ربع دوم	ساعت ۱۲	ساعت ۱۱	ساعت ۱۰	ساعت ۹
ربع سوم	ساعت ۶	ساعت ۷	ساعت ۸	ساعت ۹
ربع چهارم	ساعت ۶	ساعت ۵	ساعت ۴	ساعت ۳



شکل ۸ نحوه عملکرد سیستم تعامل صوتی تعبیه شده در سیستم



شکل ۹ نمایی از نحوه عملکرد سیستم از مراحل آغازین تا انجام عملیات هدایت کاربر

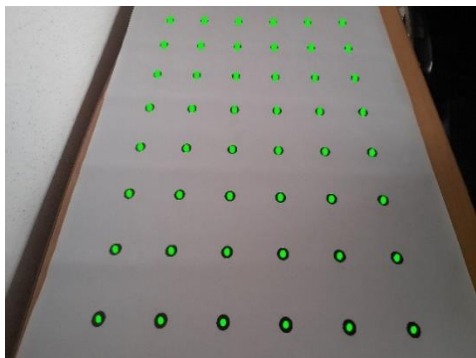
فرمان کاربر را دریافت می‌کند: این فرمان یا درخواست شناسایی اشیاء موجود است یا نام شیء خاصی را هدف قرار می‌دهد. در حالت اول، سیستم با تصویربرداری و شناسایی اشیاء، نتیجه را به صورت صوتی گزارش کرده و به حالت انتظار بازمی‌گردد. در

شکل (۹) نمای کلی جریان مرحله به مرحله سیستم را نشان می‌دهد که در آن هر گام پیش شرط گام بعدی است. عملکرد سیستم با کالیبراسیون اولیه آغاز می‌شود (که در صورت ثابت ماندن ارتفاع و زاویه دوربین، تکرار نمی‌شود). سپس سیستم

گزارش شده نیز افزایش یافته است. این موضوع به سبب عواملی همچون تراکم پیکسلی کمتر که معرف فضای واقعی گسترده‌تر نسبت به محدوده‌های نزدیک‌تر به دوربین بوده اتفاق افتاده است. از میان سایر عوامل مؤثر نیز می‌توان به نوع و مشخصه‌های ذاتی دوربین همچون تراکم پیکسلی آن اشاره کرد.

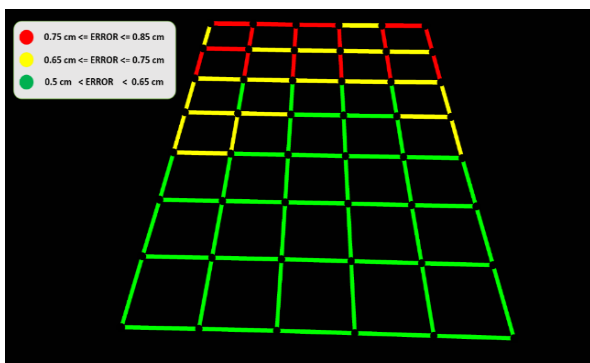


(الف)



(ب)

شکل ۱۰ (الف) بئر طراحی شده جهت آزمایش شناسایی فواصل (ب) شناسایی دایره‌های سیاه رنگ توسط برنامه



شکل ۱۱ نمایش خطای تخمین فواصل توسط سیستم

در طی پژوهشی [36] خطای عملکرد روش استریوویژن (با استفاده از دو دوربین ۲ مگاپیکسلی لاجیتک) مورد بررسی قرار

حالت دوم، سیستم پس از تصویربرداری، علاوه بر اشیاء، دست کاربر و موقعیت‌ها را تشخیص می‌دهد، سپس مختصات را پردازش نموده، فاصله و جهت حرکت دست را محاسبه می‌کند و نتیجه نهایی را به صورت فرمان صوتی راهنما اعلام می‌نماید. پس از اجرای هر فرمان، سیستم به حالت دریافت دستور بازگشته و چرخه به طور پیوسته قابل تکرار است.

یافته‌ها

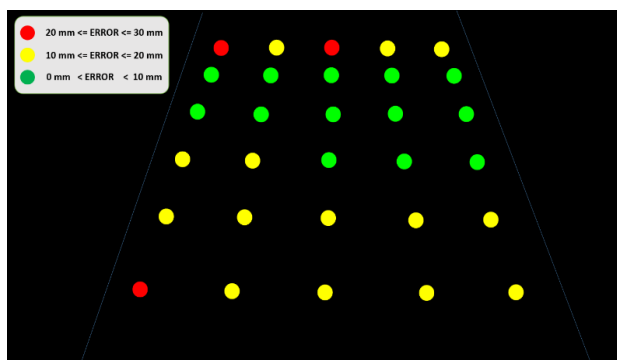
در این بخش، سیستم از جهات مختلفی مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفته است. این ارزیابی شامل دقت تخمین فواصل، اندازه‌گیری ارتفاع اجسام و هزینه زمان مصرفی سیستم بوده و نتایج حاصل از این آزمایش‌ها به تفصیل گزارش شده است. نتایج به دست آمده، میزان کارایی و دقت سیستم را در انجام این وظایف مشخص می‌کند.

خطای تخمین فاصله

به منظور بررسی و ارزیابی خطای سیستم در تشخیص فواصل مختلف در محدوده کاری آن، بئر مشابه با شکل (۱۰) طراحی و آماده شده است. این بئر شامل دایره‌های مشکی رنگی است که مراکز آن‌ها با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. در طول این آزمایش، سیستم به تخمین فاصله بین دایره‌ها پرداخته و دقت آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از تخمین فاصله‌ها، میانگین خطا و خطای اندازه‌گیری در محدوده‌های مختلف به دقت محاسبه و گزارش شده است تا خطای سیستم در اندازه‌گیری فواصل مختلف به طور جامع تحلیل گردد.

در این آزمایش، ابتدا دایره‌های سیاه رنگ موجود بر روی بئر توسط برنامه شناسایی شده‌اند و سپس، موقعیت هر یک از این نقاط در فضای واقعی با استفاده از رابطه (۲) استخراج شد. این فرآیند شامل تحلیل دقیق داده‌های شناسایی شده و تبدیل آن‌ها به مختصات فضای واقعی است تا دقت سیستم در تعیین موقعیت نقاط را ارزیابی کند. با داشتن موقعیت واقعی هر کدام از دایره‌ها می‌توان فواصل مورد نظر را محاسبه و گزارش کرد. طی بررسی نتایج حاصل شده، میانگین خطای تخمین فواصل ۶/۱ میلی‌متر و بیشترین و کمترین میزان خطای گزارش شده به ترتیب ۸/۵ و ۵/۲ میلی‌متر بوده است. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، هر چه فاصله از دوربین بیشتر شده است، خطای تخمین

بسیار نزدیک بودن جسم نسبت به دوربین نیز موجب افزایش خطای تخمین شده، زیرا دوربین نسبت به بعد ارتفاع جسم دید محدودتری داشته و به همین سبب با احتمال خطای بیشتری فرآیند تخمین ارتفاع صورت می‌پذیرد.



شکل ۱۳: نمایی از خطای سیستم طی آزمایش تخمین ارتفاع

هزینه زمانی سیستم

لازم به ذکر است که کلیه پردازش‌ها بر روی سیستمی با پردازنده Intel Core i5-4300M انجام شده است. میانگین زمان اختصاص‌یافته به هر تصویر برای شناسایی نقاط کلیدی دست توسط مدیاپایپ، ۰/۴ ثانیه، برای تشخیص اشیاء با یولو نسل هشتم سری نانو، ۱/۱ ثانیه و برای صدور فرمان‌های هدایت صوتی پس از محاسبات ناوبری (تخمین فاصله و جهت حرکت)، تنها ۰/۰۳ ثانیه ثبت گردید. با توجه به ناچیز بودن زمان فرآیند هدایت صوتی نسبت به دو مرحله پیشین، سهم آن در زمان کل پردازش ناچیز محسوب می‌شود.

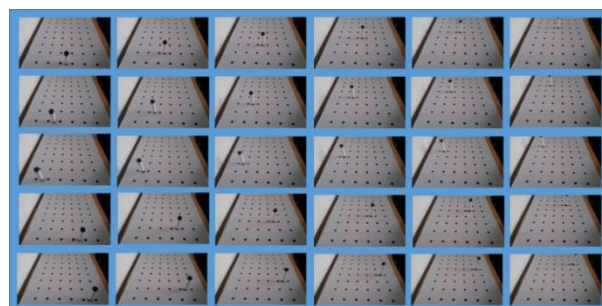
محدودیت‌ها

این سیستم دارای محدودیت‌هایی در زمینه کالیبراسیون است که نیازمند توجه کاربران می‌باشد. برای عملکرد دقیق، لازم است دستگاه در ارتفاع و زاویه مشخصی نسبت به سطح میز (به عنوان موقعیت مرجع) کالیبره شود. در صورتی که ارتفاع دستگاه یا زاویه آن نسبت به سطح میز تغییر کند، انجام فرآیند کالیبراسیون مجدد ضروری خواهد بود. این موضوع به دلیل وابستگی الگوریتم‌های پردازشی به پارامترهای موقعیتی اولیه است که تغییر آن‌ها می‌تواند بر دقت خروجی تأثیر گذار باشد. با این حال، سیستم در برابر جابه‌جایی‌های افقی میز یا چرخش در صفحه افقی (بدون تغییر ارتفاع یا زاویه) مقاوم است و در این

گرفت، میانگین خطای تخمین فاصله و موقعیت نقاط در فضای کاری مشابه سیستم پیشنهادی، معادل ۱/۲۲ درصد فاصله دوربین تا نقاط اندازه‌گیری گردید. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده آن است که سیستم پیشنهادی حاضر با دستیابی به دقتی در همین حدود، عملکردی قابل‌قیاس با روش استریوویژن دارد و از قابلیت اطمینان مطلوبی برخوردار است.

خطای تخمین ارتفاع

یکی دیگر از قابلیت‌های سیستم، توانایی تخمین ارتفاع اجسام را بوده و در این بخش آزمایشی جهت بررسی دقت و صحت عملکرد آن در این خصوص طراحی شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. جهت بررسی دقت سیستم در تخمین ارتفاع جسمی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و در موقعیت‌های مختلف قرار داده شده است. مطابق روش ارائه شده ارتفاع تخمین زده شده و میزان دقت مقادیر گزارش شده است و در ادامه مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطابق شکل (۱۲)، جسم هدف در ۳۰ موقعیت مختلف جایگذاری شده و در هر نقطه ارتفاع آن تخمین زده شده است.



شکل ۱۲: تصاویر آزمایش تخمین ارتفاع

همانطور که در تصویر (۱۳) مشخص شده است، در نزدیک‌ترین و دورترین نواحی سیستم در تشخیص ارتفاع جسم دقت کمتری در مقایسه با ناحیه میانی داشته است. طبق نتایج حاصل شده، میانگین خطای کلی ۱۱ میلی‌متر گزارش شده و همچنین بیشترین و کمترین میزان خطا به ترتیب ۲۱ و ۴ میلی‌متر بوده است. از جمله عوامل ایجاد خطا در این بخش می‌توان به زاویه قرار گیری اجسام نسبت به دوربین اشاره نمود. هر چه جسم از دوربین دورتر باشد به دلیل تراکم پیکسلی کمتر و فضای واقعی گسترده‌تر، دقت تخمین کاهش یافته است. از سویی دیگر

تکنولوژی‌های به‌روزی همچون یولو و مدیایپ در پیاده‌سازی این سیستم به کار گرفته شده‌اند که عملکرد بهینه‌ای را برای سیستم فراهم می‌کند. این پژوهش با تلفیق یولو و فریمورک مدیایپ در تشخیص اشیا و دست، و همچنین محدودسازی فضای کاری سیستم به سطح میز در قالب یک فضای دوبعدی، موفق شد حجم پردازشی سیستم را کاهش دهد زیرا با بهره‌گیری از روش پیشنهادی سیستم نیازی به پردازش سنگین محاسبات همپوشانی برای تخمین فواصل با استفاده از دو دوربین و یا سایر سنسورها را نداشته و در عین حال دقت قابل قبولی برای کاربرد مورد نظر فراهم کند. برای گسترش و پیشبرد تحقیق ارائه‌شده، مسیرهای گوناگونی قابل پیگیری است که می‌تواند به بهبود کارایی و دقت سیستم کمک کند. از جمله پیشنهادات پژوهشی می‌توان به مواردی همچون بهبود تعامل صوتی با بهره‌گیری از مدل‌های زبانی، تخصیص واحد پردازش به سرور و پیاده‌سازی رابط لغزشی برای تعامل مؤثر تر اشاره کرد.

واژه نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
حسگر مادون قرمز غیرفعال	Passive infrared sensor	
یولو	YOLO	
دوربین زمان پرواز	Time of Flight Camera	
استریوویژن	Stereovision	بینایی دوچشمی؛ بینایی استریو
دوربین رنگی - عمقی	RGBD camera	
مدیایپ	MediaPipe	

شرایط نیازی به فرآیند کالیبراسیون مجدد ندارد. علاوه بر این، با توجه به استفاده سیستم از سنسور دوربین، در محیط‌های با نور کم ممکن است دقت عملکرد نسبت به شرایط نوری مطلوب کاهش یابد. این محدودیت در سیستم‌های مبتنی بر پردازش تصویر امری شناخته‌شده است که در نسخه‌های آتی می‌توان با بهینه‌سازی الگوریتم‌ها یا افزودن نور کمکی، آن را بهبود بخشید. با توجه به اینکه سیستم پیشنهادی در محدوده‌ی مشخصی از فضای کاری که هم سطح میز و با ارتفاع و زاویه‌ی ثابتی نسبت به آن تنظیم شده عمل می‌کند، در صورتی که دست یا اجسام در ارتفاعی بالاتر یا پایین‌تر از سطح میز قرار گیرند، دقت سیستم در تخمین موقعیت کاهش یافته و احتمال بروز خطا در موقعیت‌یابی افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

میانگین خطای سیستم پیشنهادی در تخمین فاصله و ارتفاع اشیا به ترتیب ۶/۱ و ۱۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده دقتی مشابه روش استریوویژن در تعیین موقعیت و فواصل است. با این حال، سیستم پیشنهادی با وجود دستیابی به این سطح دقت، دو مزیت بنیادین نسبت به استریوویژن دارد: نخست آنکه حجم محاسبات مورد نیاز به‌طور چشمگیری کاهش یافته است، چراکه روش استریوویژن ذاتاً مستلزم پردازش‌های حجیم محاسباتی است. دوم آنکه در معماری سخت‌افزاری، نیاز به دو دوربین در روش استریوویژن به استفاده از تنها یک دوربین در سیستم پیشنهادی تقلیل یافته است. بنابراین پژوهش حاضر با به‌کارگیری حداقل منابع پردازشی و سخت‌افزاری، همان دقت عملکردی را محقق ساخته است. از سوی دیگر، طی پژوهش‌های صورت گرفته، سیستم‌های کمکی طراحی شده برای افرادی که با اختلالات بینایی مواجه هستند، عموماً در زمینه جابجایی آن‌ها از محلی به محل دیگر متمرکز شده‌اند و توجهی به کمک به نابینایان در انجام کارهای پشت میز را ندارند. در این پژوهش تلاش شده است تا گامی در جهت توسعه سیستم‌های کمکی تصویری اختصاصی ارزان قیمت در زمینه هدایت نابینایان در خصوص فعالیت‌های پشت میز برداشته شود. در سیستم ارائه شده، تخمین فواصل تنها با استفاده از یک دوربین، که می‌تواند دوربین تلفن همراه افراد باشد، انجام می‌شود. این امر باعث می‌شود که سیستم مقرون به‌صرفه‌تر و در دسترس‌تر باشد.

مراجع

- [1] World Helath Organization, "Rehabilitation," [Online]. [Accessed: Apr. 22, 2024]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>
- [2] J. D. Edwards, E. G. Valdés, C. Peronto, M. Castora-Binkley, J. Alwerdt, R. Andel, J. J. Lister, "The efficacy of InSight cognitive training to improve useful field of view performance: A brief report," *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, vol. 70, no. 3, pp. 417–422, 2015. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbt113>
- [3] A. Colenbrander, "My Perspective on Vision and Vision Rehabilitation," *Ophthalmology Science*, p. 100532, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.xops.2024.100532>
- [4] M. E. Wilkinson, K. S. Shahid, "Low vision rehabilitation: An update," *Saudi Journal of Ophthalmology*, vol. 32, no. 2, pp. 134–138, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sjopt.2017.10.005>
- [5] I. Kardan, A. Akbarzadeh, "A New Hybrid Strategy for Forward Kinematic Analysis of Parallel Robots (Research Note)," *The Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, pp. 163–172, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/01691864.2014.994034>
- [6] M. Nizamuddin, A. Kamisetty, J. C. S Gummadi, and R. R Talla, "Integrating Neural Networks with Robotics: Towards Smarter Autonomous Systems and Human-Robot Interaction," *Robotics Xplore: USA Tech Digest* 1, no. 1, pp. 157-169, 2024.
- [7] A. Sadallah, J. Riazat, "Parameter Optimization of Various Solar Cell Models by Neural Network Algorithm," *Journal of Applied & Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 1, pp. 123-142, 2024. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81702.1176>
- [8] V. Modanloo, A. Mashayekhi, and B. Akhoundi, "Comparison of regression, bee colony, and artificial neural network for predicting die filling in stamping of bipolar plates fuel cell," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 47–58, 2024. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.84567.1205>
- [9] S. A. Bagherzadeh, S. Emami Koopaei, and A. Salehi, "Optimal design of divergent part of an over-expanded nozzle profile using artificial intelligence," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 1, pp. 19–36, 2023. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.78011.1134>
- [10] M. Taghi Zadeh, M. Mokhtari, and M. Mazare, "Fixed-time fault tolerant control based on neural network and adaptive sliding mode controller of autonomous underwater vehicle with actuator saturation," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 4, pp. 35–56, 2024. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.85527.1219>
- [11] A. Liu, H. Zhao, T. Song, Z. Liu, H. Wang, and D. Sun, "Adaptive control of manipulator based on neural network," *Neural Computing and Applications*, vol 33, no. 9, pp. 4077-4085, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05515-0>
- [12] S. Targ, D. Almeida, K. Lyman, "Resnet in resnet: Generalizing residual architectures," *arXiv preprint arXiv:1603.08029*, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.08029>

- [13] K. Simonyan, A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
- [14] P. Jiang, D. Ergu, F. Liu, Y. Cai, and Bo Ma, "A Review of Yolo algorithm developments," *Procedia Computer Science*, vol. 199, pp. 1066-1073, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.135>
- [15] T. L. Narayani, M. Sivapalanirajan, B. Keerthika, M. Ananthi, and M. Arunarani, "Design of smart cane with integrated camera module for visually impaired people," in *Proceeding 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, 2021, pp. 999–1004. <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395840>
- [16] M. Marcon, A. Ortoncelli, "Object Recognition to Support Navigation Systems for Blind in Uncontrolled Environments," *Anais do Computer on the Beach*, vol. 13, pp. 274–281, 2022. <https://doi.org/10.14210/cotb.v13.p274-281>
- [17] J. Kilian, A. Neugebauer, L. Scherffig, S. Wahl, "The unfolding space glove: A wearable spatio-visual to haptic sensory substitution device for blind people," *Sensors*, vol. 22, no. 5, p. 1859, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22051859>
- [18] M. Aharchi, M. H. A. Kbir, "Localization and Navigation System for Blind Persons Using Stereo Vision and a GIS," in *WITS 2020: Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Technologies, Embedded, and Intelligent Systems*, Springer, 2022, pp. 1–12. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6893-4_35
- [19] T. Adep, R. Nikam, S. Wanewe, and D. K. B. Naik, "Visual assistant for blind people using Raspberry Pi," *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 3307, pp. 671–675, 2021. <http://dx.doi.org/10.32628/CSEIT2173142>
- [20] P. Zantou, A. M. Mousse, B. Atohou, "An Intelligent based System for Blind People Monitoring in a Smart Home." *Computer Science & Information Technology (CS & IT)*, 2020. <https://doi.org/10.5121/csit.2020.101910>
- [21] K. T. Banu, K. Supriya, K. Sony, M. Chandana, M. Bhavana, M. B. F. Ali, "Outdoor & Indoor Vision Based Localization for Blind Pedestrian Navigation Assistance," *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 4, no. 12, pp. 715-720, 2020. <http://dx.doi.org/10.33564/IJEAST.2020.v04i12.127>
- [22] O. Younis, W. Al-Nuaimy, F. Rowe, M. H. Alomari, "A smart context-aware hazard attention system to help people with peripheral vision loss," *Sensors*, vol. 19, no. 7, p. 1630, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19071630>
- [23] H. P. Buimer, M. Bittner, T. Kosteljik, T. M. Van Der Geest, A. Nemri, R. J. Van Wezel, Y. Zhao, "Conveying facial expressions to blind and visually impaired persons through a wearable vibrotactile device," *PloS One*, vol. 13, no. 3, p. 0194737, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194737>
- [24] Y. Bouteraa, "Smart real time wearable navigation support system for BVIP," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 62, pp. 223–235, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.060>
- [25] S. Tennekoon, N. Abhayasinghe, and N. Wedasingha. "Object Recognition and Assistance System for Visually Impaired Shoppers," *Proceedings of the SLIIT International Conference On Engineering and Technology*, vol. 2, 2023. <https://doi.org/10.54389/RRFZ2311>

- [26] E. J. Argüello Prada, and L. M. Santacruz Forero, "A belt-like assistive device for visually impaired people: Toward a more collaborative approach," *Cogent Engineering*, vol. 9, no. 1, p. 2048440, 2022. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2048440>
- [27] A.V. Canez, J. Sartori, R. Barwaldt, and R. N. Rodrigues, "Collision detection with monocular vision for assisting in mobility of visually impaired people." In 2019 8th Brazilian Conference on Intelligent Systems (*BRACIS*), 2019, pp. 269-274. <http://dx.doi.org/10.1109/BRACIS.2019.00055>
- [28] H. P. Buimer, M. Bittner, T. Kostelijk, T. M. Van Der Geest, A. Nemri, R. J. A. Van Wezel, and Y. Zhao. "Conveying facial expressions to blind and visually impaired persons through a wearable vibrotactile device." *PloS one* 13, no. 3 , p. 0194737, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194737>
- [29] Y. Lin, K. Wang, W. Yi, and S. Lian, "Deep learning based wearable assistive system for visually impaired people," In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision workshops, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.03364>
- [30] B. Kuriakose, I. M. Ness, M. Å. skov Tengstedt, J. M. Svendsen, T. Bjørseth, B. L. Pradhan, and R. Shrestha, "Turn Left Turn Right-Delving type and modality of instructions in navigation assistant systems for people with visual impairments," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 179, p. 103098, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103098>
- [31] M. A. Hussain, M. G. Ullah, A. Fareed, and B. Sohail, "The smartcane for blind people an electronically smart stick to aid mobility," *International Journal of Computer Science and Information Security*, vol. 14, no. 4, p. 276, 2016.
- [32] S. Mattoccia and P. Macri, "3D glasses as mobility aid for visually impaired people," in Computer Vision – ECCV 2014 Workshops, Zurich, Switzerland, Sept. 6–7 and 12, 2014, Proceedings, Part III, vol. 13, pp. 643–658, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16199-0_38
- [33] M. Sohan, T. Sai Ram, C.V. Rami Reddy, "A review on YOLOv8 and its advancements," in International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics, Springer, 2024, pp. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7962-2_39
- [34] Ultralytics, "YOLOv8 Documentation," [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/models/yolov8>, [Accessed: Nov.12, 2023].
- [35] F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov, A. Tkachenka, G. Sung, C. L. Chang, and M. Grundmann, "Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking," *arXiv preprint arXiv:2006.10214*, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10214>
- [36] R. A. Setyawan, R. Soenoko, P. Mudjirahardjo, and M. A Choiron, "Measurement accuracy analysis of distance between cameras in stereo vision," In 2018 Electrical power, electronics, communications, controls and informatics seminar (EECCIS), 2018, pp. 169-172. <https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692999>

Determining the Critical time for Two-Dimensional Manipulation of Micro-Nanoparticles using a Regression Equation

Research Article

Moein Taheri¹ , Fereshte Ghane²
doi: [10.22067/jacsm.2025.93715.1332](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.93715.1332)

Abstract--Manipulation and relocation of particles at the nano- and microscale using Atomic Force Microscopy (AFM) is recognized as one of the advanced techniques in nanotechnology, commonly referred to as nanomanipulation. This process consists of two main stages: the initial phase and the second phase. One of the key factors in enhancing the accuracy and efficiency of this process is minimizing the critical manipulation time. Therefore, identifying and analyzing the factors affecting this time is significant. In this study, the effect of the dimensional parameters of the AFM cantilever including thickness, width, and length of the cantilever, as well as the tip radius and height on the critical time of nanomanipulation is investigated. For this purpose, design of experiments and Response Surface Methodology (RSM) are employed to analysis data and the development of a mathematical model. The regression model derived from the experimental data demonstrates a prediction accuracy of 91.04%, indicating a high level of reliability. The results reveal that among the parameters studied, cantilever thickness has the most significant impact on critical time.
keywords : Cantilever dimensional parameter, regression, critical time, design of experimental.

1- Introduction

Nanomanipulation is one of the leading fields in nanotechnology, made possible by using atomic force microscopy, and has provided a new platform for manipulating structures at the nanometer scale. Over the past decades, this technology has undergone significant advances, such that today it has found numerous applications in advanced industries, medical technologies, including cancer treatment, and electronic systems.[1-15]

Atomic force microscopy is the tool used in this process. With the help of this tool, it is possible to identify and measure the mechanical properties of nanoparticles. In addition, nanoparticle manipulation is carried out in two phases. In the first phase of this process, force and critical time are two factors affecting nanoparticles. High amounts of these two parameters can damage nanoparticles and ultimately lead to process failure.

The overall process conducted in this study is illustrated in Figure 1.

Therefore, with the increasing development of this process, the need for a deep understanding of the factors affecting the accuracy, stability, and efficiency of nanoscale operations has doubled, paving the way for performance optimization and increased productivity. In this article, considering the above points, the effect of dimensional parameters on the critical time of manipulation has been investigated.

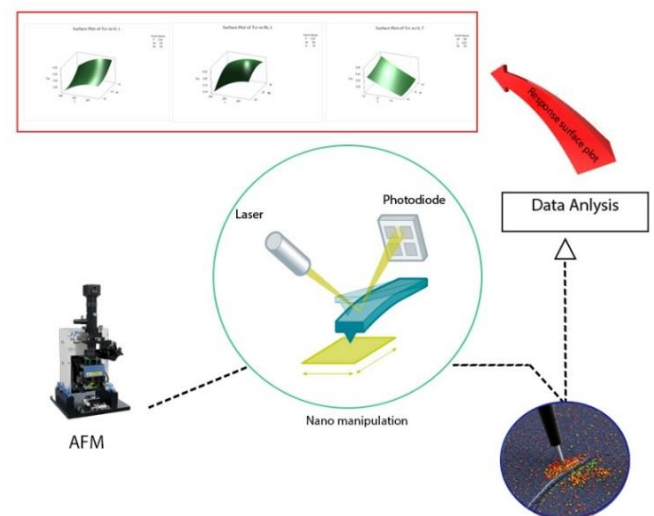


Fig. 1. Graphical abstract of process

2- Modeling

The movement and manipulation of micro and nano particles is known as manipulation. Nano particles are examined using an atomic force microscope. This microscope is a well-known tool for recognizing and identifying nanoparticles. During the manipulation

* Manuscript received 2025 May 25, Revised 2025 July 02, Accepted 2025 August 03.

¹ Corresponding author. Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran, **Email:** m-taheri@araku.ac.ir

² Bachelor Student, Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
Email: fereshtehghane13@gmail.com

process, the microscope cantilever applies a force to the nano particle. Overcoming force applied by the cantilever overcomes the friction force, the particle begins to move. This process continues until the particle reaches the desired position. The manipulation process consists of two phases. Force and critical time are two important parameters in the first phase that have a significant impact on the orientation of the particle.

3- Results

A. Analysis of variance

Analysis of variance (ANOVA) showed that the thickness, width and length of the pole, the height and the radius of the tip into the liquid had a significant effect on the response variable. The regression model explained a large part of the variation in the response, and the adjusted and predicted coefficient of determination values confirmed that the model was reliable in explaining and predicting the results.

To check the suitability of the model, residual analysis was performed. The results showed that the residuals followed a normal distribution and there was no clear pattern in the residual plots. This means that the assumptions of constant variance and independence of errors were met. Overall, these results confirmed that the model was suitable for analyzing the effect of the tested variables on the response. The extracted regression equation can be seen in Equation 1.

$$T_{cr} = 0.539 - 0.5733 T - 0.00439 W + 0.001044 L + 0.02500 H + 0.00489 Rt \quad (1)$$

B. Sensitivity analysis results

To evaluate the interactive effects of various process parameters on critical time, a series of three-dimensional response surface plots was analyzed. Figure 2 presents the effect of these parameters on the critical force during manipulation. The results consistently reveal that increasing cantilever thickness leads to a reduction in critical time across multiple parameter combinations. Cantilever width also shows a negative influence, whereas cantilever length generally has a positive effect, increasing the critical time. These trends are clearly reflected in the slopes of the plots, indicating the significant and opposing effects of these parameters.

Additional interactions highlight the role of tip-related parameters. Tip height and tip radius both exhibit a positive relationship with critical time, while cantilever width consistently shows a negative influence. When variables such as cantilever length and tip height or radius are combined, their effects on critical time are additive and positive. Overall, the response surfaces demonstrate clear patterns of influence, providing insight into how combinations of cantilever and tip dimensions interact to affect critical time.

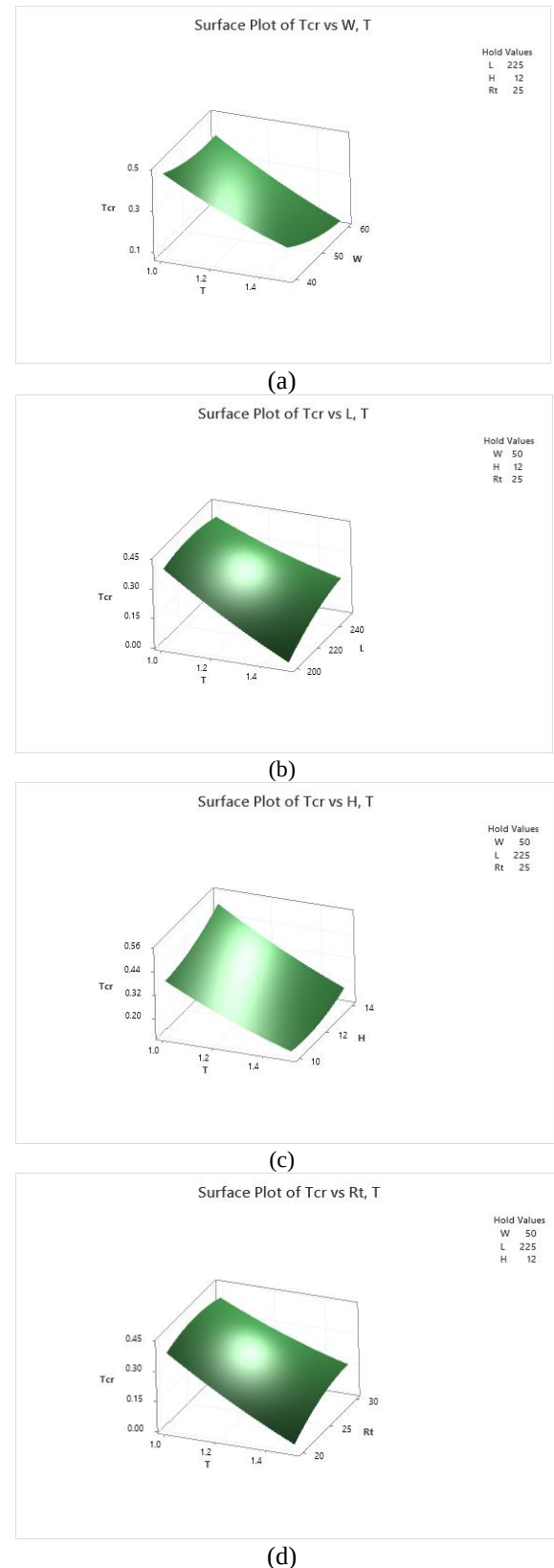


Fig. 2. Simultaneous effect of parameters on critical time

4- Conclusion

In this study, considering the significance of critical time in the first phase of manipulation, the dimensional parameters of the cantilever and the microscope tip were investigated. Initially, 27 experiments were conducted, with three different levels for each parameter. Subsequently, the impact of these variables was assessed using analysis of variance (ANOVA). A regression model was developed based on the collected data. The conducted analyses estimate the reliability of the model to be 91%, confirming its suitability for prediction. Finally, the effect of the parameters on the critical manipulation time was analyzed separately using the response surface methodology. The results obtained from the three-dimensional response surface plots indicate that the cantilever thickness can cause significant variations in critical time.

These findings can serve as a foundation for predicting and optimizing conditions in similar processes and can be expanded upon in future research.

6- References

- [1] S. Yuan, L. Liu, Z. Wang, N. Xi, Y. Wang, "Study of nano-manipulation approach based on the least action principle using AFM-based robotic system," in *Proceeding 36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, China, 26–28 Jul. 2017, pp. 4424–4429. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028055>
- [2] M. H. Korayem, M. Mozafari, Y. H. Sooha, Z. Rastegar, "Development and application of rough viscoelastic contact models in the first phase of 3D manipulation for biological micro-/nanoparticles by AFM," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 91, no. 9, pp. 3739–3753, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01967-5>
- [3] M. H. Korayem, S. Shahali, Z. Rastegar, "Simulation of 3D nanomanipulation for rough spherical elastic and viscoelastic particles in a liquid medium; experimental determination of cell's roughness parameters and Hamaker constant's correction," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 90, pp. 313–327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.10.007>
- [4] M. H. Korayem and R. N. Hefzabad, "Nonlinear modeling of nanoscale interaction forces between atomic force microscope and carbon nanotubes," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 161, p. 104690, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104690>
- [5] M. H. Korayem, A. A. Farid, R. N. Hefzabad, "Nonclassical dynamic modeling of nano/microparticles during nanomanipulation processes," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 11, no. 1, pp. 147–166, 2020. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.13>
- [6] G. Wang, Y. Ding, H. Long, Y. Guan, X. Lu, Y. Wang, L. Yang, "Simulation of Optical Nano-Manipulation with Metallic Single and Dual Probe Irradiated by Polarized Near-Field Laser," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, p. 815, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12020815>
- [7] A. Craciun, B. Donnio, J. Gallani, M. Rastei, "High-resolution manipulation of gold nanorods with an atomic force microscope," *Nanotechnology*, vol. 31, no. 8, p. 085302, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab5404>
- [8] T. Zhang, H. Yu, P. Li, X. Wang, F. Wang, J. Shi, Z. Liu, P. Yu, W. Yang, Y. Wang, "Microsphere-based super-resolution imaging for visualized nanomanipulation," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 42, pp. 48093–48100, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12126>
- [9] C. Hou, D. Sun, L. Dong, "Nanomanipulation in biomedical applications," *Current Robotics Reports*, vol. 2, pp. 133–145, 2021. <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00047-4>
- [10] Y. Yin, H. Xu, Y. Wang, Z. Liu, S. Zhang, Z. Weng, Z. Song, Z. Wang, "Improving adhesion between nanoparticles and surface of mica substrate by aminosilane modification," *Plasmonics*, vol. 15, no. 2, pp. 399–407, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-01030-8>
- [11] X. Ma, W. Wang, G. Xie, D. Guo, S. Wen, "Friction measurement and motion state determination of a single polystyrene nanoparticle during manipulation," *Micro & Nano Letters*, vol. 15, no. 15, pp. 1140–1145, 2020. <https://doi.org/10.1049/mnl.2020.0383>
- [12] Y. Wen, H. Lu, Y. Shen, H. Xie, "Nanorobotic Manipulation System for 360° Characterization Atomic Force Microscopy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2916–2924, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2910042>
- [13] Y. Takechi-Haraya, "Atomic Force Microscopy to Measure the Mechanical Property of Nanosized Lipid Vesicles and Its Applications," *Yakugaku Zasshi*:

Journal of the Pharmaceutical Society of Japan,
vol. 144, no. 5, pp. 511–519, 2024.
<https://doi.org/10.1248/yakushi.23-00178-2>

- [14] M. Taheri, H. Faraji, and P. Karimi, “Manipulation of breast cell tissue with the aim of calculating Young’s modulus, using Tatara contact theory and atomic force microscopy,” *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 1–16, 2023.
 - [15] M. Taheri, “Investigation of new friction models in two-dimensional manipulation of gastric cancer tissue,” *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 1–16, 2023.
-



تعیین زمان بحرانی منیپولیشن دو بعدی میکرو نانو ذرات با استفاده از معادله رگرسیون*

مقاله پژوهشی

معین طاهری^(۱)  فرشته قانع^(۲)
doi 10.22067/jacsm.2025.93715.1332

چکیده دستکاری و جابه‌جایی ذرات در مقیاس نانو و میکرو با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، به‌عنوان یکی از تکنیک‌های پیشرفته در فناوری نانو، تحت عنوان "نانومنیپولیشن" شناخته می‌شود. این فرآیند شامل دو مرحله اصلی، فاز اولیه و فاز ثانویه است. یکی از مؤلفه‌های کلیدی در افزایش دقت و کارایی این فرآیند، کاهش زمان بحرانی منیپولیشن است؛ از این رو، شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر این زمان، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ابعادی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی - شامل ضخامت، عرض، طول تیرک، و همچنین شعاع و ارتفاع سوزن - بر زمان بحرانی نانومنیپولیشن بررسی شده است. بدین منظور از روش طراحی آزمایش و سطح پاسخ (RSM) جهت تحلیل داده‌ها و استخراج مدل ریاضی استفاده گردیده است. مدل رگرسیون حاصل از این تحلیل، با اتکا به داده‌های تجربی، دقتی معادل ۹۱/۰۴ درصد را در پیش‌بینی زمان بحرانی نشان داده است که بیانگر قابلیت اطمینان بالای مدل ارائه شده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در میان پارامترهای بررسی شده، ضخامت تیرک بیشترین تأثیر را بر زمان بحرانی دارد.

واژه‌های کلیدی پارامتر ابعادی تیرک، رگرسیون، زمان بحرانی، طراحی آزمایش.

مقدمه

برخوردار است، یوان و همکاران [1] نحوه ایجاد و به‌کارگیری مدل را بررسی و شبیه‌سازی منیپولیشن را تشریح کرده‌اند. بنا بر نتایج، مدل‌سازی مناسب علاوه بر شناسایی موقعیت نانو ذره، می‌تواند در بهبود راندمان منیپولیشن مؤثر واقع شود. به‌کارگیری مدل‌های ویسکوالاستیک و الاستیک به‌عنوان دو نوع مدل مکانیکی مشخص برای تخمین نیرو و زمان بحرانی، موضوع تحقیق کورایم و همکاران [2] بوده است. باتوجه به آنچه در این مقاله بیان گردیده است در نظر گرفتن زبری سطح ذرات زیستی و نوع رفتار آن‌ها در فاز اول منیپولیشن دلیل اصلی بررسی این مدل‌هاست.

در دیگر مطالعه کورایم و همکاران [3] سلول‌های خوش خیم سرطانی سینه مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری اصلی این

نانومنیپولیشن یکی از حوزه‌های پیشرو در فناوری نانو است که با به‌کارگیری میکروسکوپ نیروی اتمی امکان‌پذیر شده و بستری نوین برای منیپولیشن در مقیاس نانومتری فراهم آورده است. طی دهه‌های اخیر، این فناوری دستخوش پیشرفت‌های چشمگیری شده است به‌گونه‌ای که امروزه کاربردهای متعددی در صنایع پیشرفته، فناوری‌های پزشکی از جمله درمان سرطان و سامانه‌های الکترونیکی یافته است. توسعه روزافزون این فرآیند، نیاز به درک عمیق از عوامل مؤثر بر دقت، پایداری و کارایی عملیات نانومقیاس را دوچندان کرده و مسیر را برای بهینه‌سازی عملکرد و افزایش بهره‌وری هموار ساخته است.

از آنجایی که مدل‌سازی فرآیند منیپولیشن از اهمیت بالایی

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۳/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۵/۱۲ می باشد.

Email: m-taheri@araku.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

تمرکز خود را بر کاربردهای نوظهور این حوزه در علوم زیستی و پزشکی قرار داده‌اند. یافته‌های اخیر نشان می‌دهند که پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه عمدتاً با اتکاء بر فناوری‌های کمکی مانند تصویربرداری با وضوح فوق‌العاده یا تحریکات موضعی مغناطیسی حاصل شده‌اند. این دستاوردها امکان بررسی ویژگی‌های مولکولی به صورت غیرآماری و تعاملات درون مولکولی و بین مولکولی را فراهم ساخته است.

یکی از موانع بررسی نانوذرات در فرآیند منیپولیشن با میکروسکوپ نیروی اتمی، مشکل چسبندگی پایین به سطح زیرلایه است. بین و همکاران [10] به کارگیری محلول تری آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان را پیشنهاد کرده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که این اصلاح منجر به افزایش قابل توجه نیروی چسبندگی میان نانوذرات مغناطیسی و زیرلایه می‌شود. همچنین، میزان غلظت‌های مختلف این محلول بر میزان چسبندگی بررسی شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهند که بهبود چسبندگی سطحی می‌تواند نقش مهمی در افزایش دقت و نرخ موفقیت فرآیندهای منیپولیشن داشته باشد.

از آنجایی که نانوذرات در حین فرآیند منیپولیشن توسط پروب میکروسکوپ نیروی اتمی دچار لغزش یا چرخش می‌شوند، در نظر گرفتن تمایز بین اصطکاک لغزشی و چرخشی دشوار می‌گردد و همکاران [11]، آزمایش‌های زیادی برای اندازه‌گیری اصطکاک انجام داده‌اند و با استفاده از مدل دابل هرتز محاسبه اصطکاک لغزشی و چرخشی را گزارش کرده‌اند.

ون و همکاران [12] یک سیستم منیپولیشن نانو رباتیک را معرفی کرده‌اند که با استفاده از آن می‌توان نقشه‌برداری از نمونه‌ها را به صورت سه بعدی انجام داد. این روش با گسترش نواحی می‌تواند امکان نقشه‌برداری را بهبود دهد. همچنین برای اثبات کارایی سیستم، سه نمونه مختلف بررسی شده و نتایج بازسازی سه بعدی آن‌ها تحلیل شده است.

نانوذرات لیپیدی و لیپوزوم‌ها در داروسازی، واکسن‌ها و درمان‌های ژنی کاربرد دارند توجه جهانی را جلب کرده‌اند. باتوجه به این موضوع تاکاچی هارایا [13] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی ویژگی‌های مکانیکی این نانوذرات در محیط مایع را مورد بررسی قرار داده است.

پژوهش، تحلیل ثابت الاستیک سلول در محیط‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی است. در این مطالعه، آزمایش سلول مذکور در دو محیط مایع و هوا و با در نظر گرفتن دو نوع مدل مکانیکی الاستیک و ویسکوالاستیک انجام و تحلیل شده است.

در مطالعه‌ای دیگر از کورایم و همکاران [4]، یک مدل غیرخطی و غیرکلاسیک برای بررسی نیروهای بین میکروسکوپ نیروی اتمی و نانولوله‌های کربنی در فرآیند منیپولیشن ارائه شده است. مدل‌سازی با استفاده از نظریه‌های تماس و اصطکاک انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی این تحقیق نشان داده است که اثرات ابعاد لوله‌های کربنی در رفتار مکانیکی آن مؤثر است.

بررسی رفتار دینامیکی نانوذره طلا در خلال منیپولیشن توسط کورایم و همکاران [5] ارائه گردیده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل‌های کلاسیک و مدل‌های غیرکلاسیک محیط پیوسته از جمله اهداف اصلی این تحقیق به شمار می‌روند. به علاوه داده‌های این آزمایش با منیپولیشن پلی‌استیرن نیز مورد قیاس قرار گرفته است.

بر اساس پیشنهاد وانگ و همکاران [6] گسترش استفاده از طرح‌های غیر تماسی در فرآیند منیپولیشن امری ضروری به نظر می‌رسد. با در نظر گرفتن این موضوع، منیپولیشن نوری توسط آنها مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی میدان الکتریکی و نیروی سوزن میکروسکوپ از جمله کاربردهای این نوع منیپولیشن است.

منیپولیشن در محیط خلا مورد توجه کرایسون و همکاران [7] واقع شده است. آنها ضمن بررسی فرآیند با به کارگیری پروب نوسانی، عملکرد دینامیکی و تماسی را نیز تحلیل کرده‌اند. نانولوله طلای پوشش داده شده ماده مورد بررسی این آزمایش عنوان شده است.

در پژوهشی توسط ژانگ و همکاران [8]، یک روش نوین برای بررسی منیپولیشن با وضوح بالا معرفی شده است که امکان تصویربرداری لحظه‌ای ضمن از بین بردن پراش نوری را فراهم می‌کند. این روش با اتصال یک میکرو لنز به پروب میکروسکوپ نیروی اتمی امکان هم‌زمان بازخورد آبی بصری را فراهم می‌سازد. هو و همکاران [9] با مروری بر فناوری‌های نوین نانودستکاری،

همچنین ارتفاع و شعاع سوزن به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده‌اند. سپس با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر فرآیند استخراج گردیده و سهم نسبی هر یک از پارامترها در تعیین مقدار زمان بحرانی تحلیل و ارزیابی شده است.

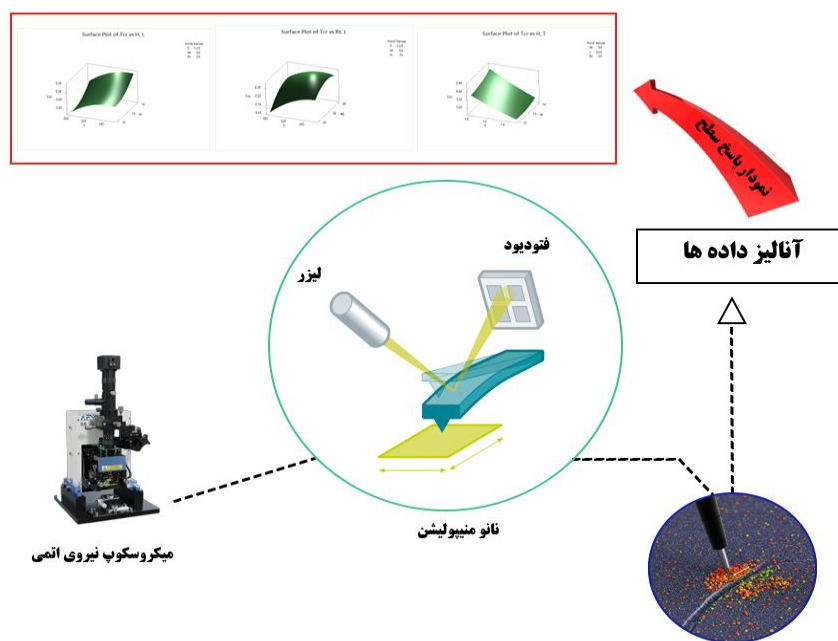
مدل‌سازی

جابه‌جایی و دست‌کاری میکرو نانوذرات تحت فرآیندی به عنوان منیپولیشن شناخته می‌شود. بررسی نانوذرات به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌گیرد. این میکروسکوپ ابزاری مشهور برای شناخت و شناسایی نانوذره است. در طی فرآیند منیپولیشن تیرک میکروسکوپ به نانوذره نیرو وارد می‌کند. با غلبه میزان نیروی وارده از تیرک بر نیروی اصطکاک، ذره شروع به حرکت می‌کند. این فرآیند تا رساندن ذره به موقعیت موردنظر ادامه می‌یابد. فرآیند منیپولیشن دوفاز را شامل می‌شود. نیرو و زمان بحرانی دو پارامتر مهم و حائز اهمیت در فاز اول هستند که در جهت‌یابی ذره تأثیر قابل‌توجهی دارند. با در نظر گرفتن این نکته، در این مطالعه به بررسی متغیرهای اثرگذار بر زمان بحرانی خواهیم پرداخت. فرآیند کلی انجام شده در این پژوهش مطابق شکل (۱) خواهد بود.

در مطالعه طاهری و همکاران [14]، از میکروسکوپ نیروی اتمی برای تحلیل خواص مکانیکی بافت سرطانی سینه در حین نانومنیپولیشن استفاده شده است. با بررسی رابطه نیرو-جابجایی، نمودارهای مربوط به عمق نفوذ برحسب زمان استخراج گردیده‌اند. جهت محاسبه مدول یانگ، شبیه‌سازی‌هایی بر پایه مدل تماسی تاتارا و با در نظر گرفتن هندسه بافت انجام شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. بر اساس تحلیل‌ها، مقدار مدول یانگ بافت سرطانی در محدوده ۲ تا ۲.۵ کیلوپاسکال برآورد شده است.

در دیگر پژوهش طاهری [15]، به منظور کاهش آسیب به بافت‌های سالم و بهینه‌سازی نانومنیپولیشن بافت سرطانی معده، شبیه‌سازی دوبعدی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شده است. با تمرکز بر اثر اصطکاک، مدل‌های مختلفی بررسی شد و مدل افکاتی کمترین نیرو و زمان بحرانی را ارائه داد. نتایج بیانگر بهبود عملکرد نسبت به مدل‌های پیشین هستند.

در این مقاله، با توجه به نقش کلیدی زمان بحرانی در فاز اول فرآیند نانومنیپولیشن، تأثیر پارامترهای هندسی تیرک و سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی بر این مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پنج پارامتر شامل ضخامت، عرض و طول تیرک،



شکل ۱ چکیده گرافیکی پژوهش

پاسخ‌های احتمالی خواهد بود. طراحی آزمایش به شیوه‌های تک عاملی، فاکتوریل، سطح پاسخ و تاکوچی امکان‌پذیر است. در این مطالعه تأثیر پارامترهای ابعادی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی بر زمان بحرانی منیپولیشن بررسی گردیده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۱) قابل مشاهده است.

در این تحقیق ۲۷ آزمایش با فرض سه سطح برای هر پارامتر تعریف شده است. انتخاب سه سطح برای هر عامل، امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار سیستم در بازه‌ای گسترده‌تر از مقادیر متغیرها را فراهم می‌سازد و در عین حال از پیچیدگی بیش از حد طراحی جلوگیری می‌کند. سطوح تعیین شده در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول ۲ سطوح تعیین شده متغیرها

شماره	عرض	طول	ارتفاع	شعاع	ضخامت
تیرک	تیرک	تیرک	سوزن	سوزن	تیرک
۱	۴۰	۲۰۰	۱۰	۲۰	سطح ۱
۱/۲۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	سطح ۲
۱/۵	۶۰	۲۵۰	۱۴	۳۰	سطح ۳

تحلیل نتایج

نتایج آنالیز واریانس

در جدول (۳) نشان داده می‌شود که هر کدام از متغیرهای ورودی مدل شامل ضخامت، عرض و طول تیرک، همچنین ارتفاع و شعاع سوزن چه اثری بر زمان بحرانی منیپولیشن دارند. در این جدول مقدار ضریب، سطح معناداری و هم‌خطی متغیرها بررسی شده است. نتایج حاصل شده بدین معنی است که هر کدام در تغییر زمان بحرانی نقش دارند، اما شدت و نوع اثرشان متفاوت است.

در ادامه، میزان قدرت مدل رگرسیون در پیش‌بینی تغییرات زمان بحرانی بررسی شده است. ضریب تعیین (R^2) نشان می‌دهد که چه درصدی از تغییرات زمان بحرانی توسط این مدل و متغیرهای ورودی قابل پیش‌بینی است. باتوجه به جدول (۴) مدل عملکرد بسیار خوبی دارد؛ چراکه بیش از ۹۰ درصد تغییرات زمان بحرانی را توضیح می‌دهد. همچنین مقدار تعدیل شده و پیش‌بینی نیز نشان می‌دهند که ضمن لحاظ کردن تعداد متغیرها در مدل، مدل از قدرت پیش‌بینی بالایی برخوردار است. همچنین که این مدل نه تنها برای داده‌های فعلی بلکه برای داده‌های جدید نیز می‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد.

جدول ۱ طراحی آزمایش پارامترهای مؤثر بر زمان بحرانی

ضخامت	عرض	طول	ارتفاع	شعاع	شماره
تیرک	تیرک	تیرک	سوزن	سوزن	آزمایش
۱	۶۰	۲۰۰	۱۰	۲۰	۱
۱	۴۰	۲۰۰	۱۰	۳۰	۲
۱	۴۰	۲۰۰	۱۴	۲۰	۳
۱	۶۰	۲۰۰	۱۴	۳۰	۴
۱	۴۰	۲۵۰	۱۰	۲۰	۵
۱	۶۰	۲۵۰	۱۰	۳۰	۶
۱	۶۰	۲۵۰	۱۴	۲۰	۷
۱	۴۰	۲۵۰	۱۴	۳۰	۸
۱	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۹
۱/۲۵	۴۰	۲۰۰	۱۰	۲۰	۱۰
۱/۲۵	۶۰	۲۰۰	۱۰	۳۰	۱۱
۱/۲۵	۶۰	۲۰۰	۱۴	۲۰	۱۲
۱/۲۵	۴۰	۲۰۰	۱۴	۳۰	۱۳
۱/۲۵	۶۰	۲۵۰	۱۰	۲۰	۱۴
۱/۲۵	۴۰	۲۵۰	۱۰	۳۰	۱۵
۱/۲۵	۴۰	۲۵۰	۱۴	۲۰	۱۶
۱/۲۵	۶۰	۲۵۰	۱۴	۳۰	۱۷
۱/۲۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۱۸
۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۰	۱۹
۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۳۰	۲۰
۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۰	۲۵	۲۱
۱/۵	۴۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۲۲
۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۲۳
۱/۵	۶۰	۲۲۵	۱۲	۲۵	۲۴
۱/۵	۵۰	۲۰۰	۱۲	۲۵	۲۵
۱/۵	۵۰	۲۲۵	۱۴	۲۵	۲۶
۱/۵	۵۰	۲۵۰	۱۲	۲۵	۲۷

طراحی آزمایش

روش‌های متعددی برای انجام آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها وجود دارد. یکی از روش‌های کاربردی و کم‌هزینه، روش طراحی آزمایش‌ها است. این روش آماری قادر است تا ضمن کاهش در میزان هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها، تحلیل کارآمد و دقیقی داشته باشد. استخراج معادله با استفاده از داده‌ها، ضمن بررسی اثر هم‌زمان متغیرهای خروجی بر ورودی از توانمندی‌های قابل توجه این روش به حساب می‌آید. نوع و روش‌های مورد استفاده در طراحی آزمایش بر مبنای ماهیت نوع آزمایش، تعداد متغیر و

در ادامه، داده‌های آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. این تحلیل وجود مورد خاص یا غیرطبیعی در میان داده‌ها را مطالعه می‌کند. بر اساس نتایج که در جدول (۶) به‌دست‌آمده تنها یک داده شناسایی شده که مقدار آن بیشتر از حد معمول بوده است. این مسئله می‌تواند به دلیل خطای اندازه‌گیری، شرایط خاص آزمایش یا ویژگی‌های منحصر به فرد در آن شرایط باشد.

در ادامه کارآمدی مدل رگرسیون توسط آنالیز واریانس مورد بررسی می‌گیرد تا مشخص گردد که هر کدام از متغیرها چقدر در تغییر زمان بحرانی مؤثرند. نتایج جدول (۵) بیانگر آن است که مدل به‌صورت کلی معنادار است. در میان متغیرها، ضخامت تیرک بیشترین سهم را در تغییرات زمان بحرانی دارد. سایر متغیرها نیز تأثیر قابل توجهی دارند.

جدول ۳ ضرایب و اثر گذاری پارامترها

ترم‌ها	ضرایب	خطای معیار	T-Value	P-Value	VIF
مقادیر ثابت	۰/۵۳۹	۰/۱۵۴	۳/۵۰	۰/۰۰۲	
ضخامت تیرک (T)	-۰/۵۷۳۳	۰/۰۴۴۴	-۱۲/۹۲	۰/۰۰۰	۱/۰۰
عرض تیرک (W)	-۰/۰۰۴۳۹	۰/۰۰۱۱۱	-۳/۹۶	۰/۰۰۱	۱/۰۰
طول تیرک (L)	۰/۰۰۱۰۴۴	۰/۰۰۰۴۴۴	۲/۳۵	۰/۰۲۸	۱/۰۰
ارتفاع سوزن (H)	۰/۰۲۵۰۰	۰/۰۰۵۵۵	۴/۵۱	۰/۰۰۰	۱/۰۰
شعاع سوزن (Rt)	۰/۰۰۴۸۹	۰/۰۰۲۲۲	۲/۲۰	۰/۰۳۹	۱/۰۰

جدول ۴ قابلیت اطمینان مدل

ضریب تعیین پیش‌بینی	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین	انحراف معیار
۸۴/۷۷%	۸۸/۹۱%	۹۱/۰۴%	۰/۰۴۷۰۵۶۲

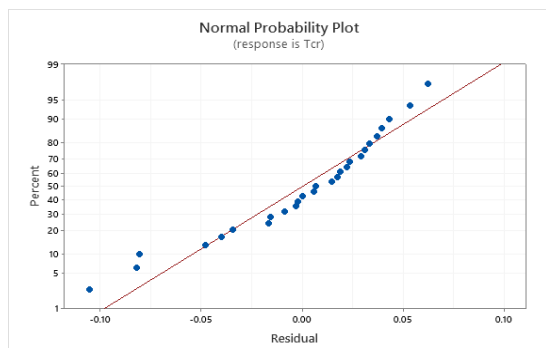
جدول ۵ واریانس

منابع	درجه آزادی	جمع مجزورات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
رگرسیون	۵	۰/۴۷۲۵۰	۰/۰۹۴۵۰۰	۴۲/۶۸	۰/۰۰۰
ضخامت تیرک (T)	۱	۰/۳۶۹۸۰	۰/۳۶۹۸۰۰	۱۶۷/۰۱	۰/۰۰۰
عرض تیرک (W)	۱	۰/۰۳۴۶۷	۰/۰۳۴۶۷۲	۱۵/۶۶	۰/۰۰۱
طول تیرک (L)	۱	۰/۰۱۲۲۷	۰/۰۱۲۲۷۲	۵/۵۴	۰/۰۲۸
ارتفاع سوزن (H)	۱	۰/۰۴۵۰۰	۰/۰۴۵۰۰۰	۲۰/۳۲	۰/۰۰۰
شعاع سوزن (Rt)	۱	۰/۰۱۰۷۶	۰/۰۱۰۷۵۶	۴/۸۶	۰/۰۳۹
خطا	۲۱	۰/۰۴۶۵۰	۰/۰۰۲۲۱۴		
کل	۲۶	۰/۵۱۹۰۰			

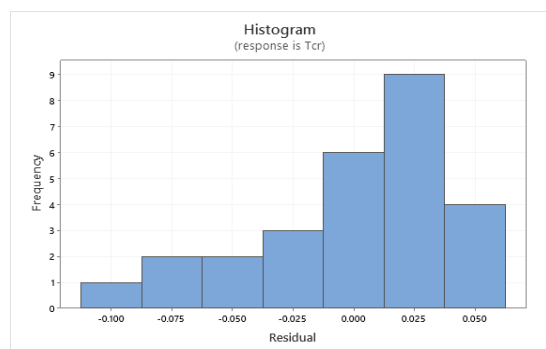
جدول ۶ آنالیز داده‌های غیرعادی

داده بزرگ	باقی‌مانده استاندارد	باقی‌مانده	پردازش شده	مقدار واقعی	داده غیرعادی
R	-۲/۶۱	-۰/۱۰۵۶	۰/۲۱۵۶	۰/۱۱۰۰	۱۲

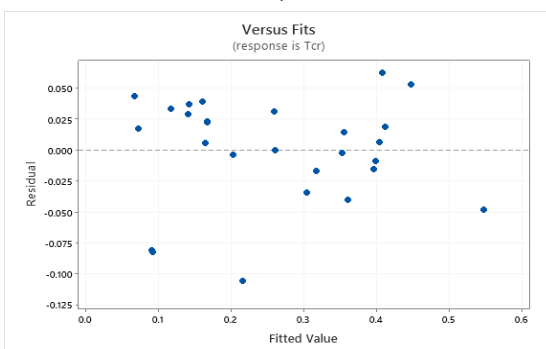
پراکندگی ناشی از اثرگذاری هم‌زمان چند پارامتر کلیدی است که در ادامه با تحلیل‌های آماری و گرافیکی بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.



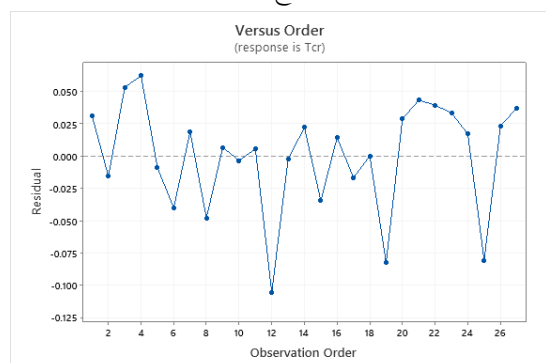
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲ نمودار پراکندگی باقیمانده‌ها

معادله رگرسیون استخراج شده در رابطه (۱) قابل مشاهده است.

$$T_{cr} = 0.539 - 0.5733 T - 0.00439 W + 0.001044 L + 0.02500 H + 0.00489 Rt \quad (1)$$

به منظور ارزیابی صحت و اعتبار مدل رگرسیون، نمودارهای باقی‌مانده ترسیم شده است که در ادامه به بررسی آنها خواهیم پرداخت. در نمودار (الف)، توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها رسم شده‌اند. در صورتی که توزیع نرمال باشد، نقاط باید تقریباً بر روی یک خط راست قرار گیرند. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌گردد، اغلب نقاط در راستای خط نرمال قرار گرفته و انحراف محسوسی مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع باقی‌مانده‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مفروضات رگرسیون است. نمودار (ب) نحوه پراکندگی فراوانی باقی‌مانده‌ها را نمایش می‌دهد. شکل هیستوگرام در این مطالعه به حالتی متقارن حول میانگین نزدیک به صفر بود. عدم وجود کشیدگی در توزیع باقی‌مانده‌ها، نشان‌دهنده تعادل پراکندگی خطاها در مدل است. مقادیر باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده در نمودار (ج) نشان داده شده است. در این نمودار، پراکندگی باقی‌مانده‌ها بدون الگوی مشخص و به صورت تصادفی مشاهده شد که نشان‌دهنده همگنی واریانس و عدم وجود واریانس ناهمگن در مدل است. تنها مقدار ۱۲ که یک باقی‌مانده نسبتاً بزرگ است که می‌تواند به عنوان نقطه پرت احتمالی در نظر گرفته شود، هرچند تأثیر معناداری بر کل مدل نداشته است. در نهایت نمودار (د)، باقی‌مانده‌ها بر اساس ترتیب ورود داده‌ها به مدل نشان می‌دهد. بر مبنای نتایج، باقی‌مانده‌ها به صورت پراکنده و بدون الگوی منظم در طول مشاهدات توزیع شده‌اند که نشان می‌دهد خطاها از یکدیگر مستقل بوده و مدل از لحاظ استقلال خطاها قابل قبول است.

جدول (۷) مقادیر زمان بحرانی را برای ۲۷ آزمایش مختلف نشان می‌دهد. این مقادیر در نتیجه تغییر پارامترها در هر آزمایش به دست آمده‌اند و هدف از ثبت آن‌ها، بررسی تأثیر متقابل متغیرها بر زمان بحرانی فرآیند مورد مطالعه است. بر اساس داده‌ها، زمان بحرانی در بازه‌ای بین ۰/۰۱ تا ۰/۵ ثانیه قرار دارد که بیانگر حساسیت بالای این پاسخ به تغییرات شرایط آزمایش است. این

جدول ۷ مقادیر زمان بحرانی منیپولیشن

زمان بحرانی	شماره آزمایش
۰/۲۹	۱
۰/۳۸	۲
۰/۵۰	۳
۰/۴۷	۴
۰/۳۹	۵
۰/۳۲	۶
۰/۴۳	۷
۰/۵۰	۸
۰/۴۱	۹
۰/۲۰	۱۰
۰/۱۷	۱۱
۰/۱۱	۱۲
۰/۳۵	۱۳
۰/۱۹	۱۴
۰/۲۷	۱۵
۰/۳۷	۱۶
۰/۳۰	۱۷
۰/۲۶	۱۸
۰/۰۱	۱۹
۰/۱۷	۲۰
۰/۱۱	۲۱
۰/۲۰	۲۲
۰/۱۵	۲۳
۰/۰۹	۲۴
۰/۰۱	۲۵
۰/۱۹	۲۶
۰/۱۸	۲۷

افزایش آن، زمان بحرانی کاهش می‌یابد. روند نزولی شیب نمودار در هر دو محور به‌خوبی نشان‌دهنده تأثیر معنادار و همسو این دو پارامتر بر زمان بحرانی است. روند تغییرات زمان بحرانی در برابر طول تیرک و ضخامت تیرک در نمودار (ب) بررسی شده است. با افزایش ضخامت تیرک، مشابه آنچه در نمودار قبل دیده می‌شود، مقدار زمان بحرانی کاهش می‌یابد. در مقابل، با افزایش طول تیرک، مقدار زمان بحرانی افزایش یافته و سطح نمودار، شیب مثبت در راستای محور طول تیرک دارد. این موضوع حاکی از آن است که طول تیرک دارای اثر افزایشی و ضخامت تیرک دارای اثر کاهشی بر پاسخ زمان بحرانی می‌باشند. نتایج نمودار (پ) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت تیرک، موجب کاهش یکنواخت زمان بحرانی است. همچنین متغیر ارتفاع سوزن اثر افزایشی بر زمان بحرانی دارد؛ به‌طوری که با افزایش ارتفاع سوزن، مقدار زمان بحرانی افزایش یافته است. ترکیب این دو روند، سطحی با شیب متضاد در دو محور ضخامت تیرک و ارتفاع سوزن ایجاد کرده است. در نمودار (ت)، مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت تیرک می‌تواند به کاهش مقدار زمان بحرانی منجر شود، درحالی که افزایش مقدار شعاع سوزن موجب افزایش زمان بحرانی شده است. سطح نمودار حاصل شده به‌خوبی نمایانگر این رفتار متضاد در محورهای ضخامت تیرک و شعاع سوزن می‌باشد. بر اساس نمودار (ث)، افزایش طول تیرک منجر به افزایش مقدار زمان بحرانی شده و متعاقباً افزایش عرض تیرک سبب کاهش آن می‌شود. نمودار دارای شیب مثبت در راستای محور طول تیرک و شیب منفی در راستای محور عرض تیرک است که نشان‌دهنده اثر متقابل و معکوس این دو متغیر بر زمان بحرانی است.

بر مبنای آنچه در نمودار (ج) مشاهده می‌گردد، افزایش ارتفاع سوزن باعث افزایش مقدار زمان بحرانی و افزایش عرض تیرک منجر به کاهش آن می‌شود. نمودار سطح پاسخ نشان می‌دهد که اثر ارتفاع سوزن به طور نسبی از عرض تیرک برجسته‌تر است، چراکه میزان شیب در راستای ارتفاع سوزن بیش از عرض تیرک است. نتایج حاصل از نمودار (چ) نشان می‌دهد که افزایش شعاع سوزن منجر به افزایش زمان بحرانی و افزایش عرض تیرک باعث کاهش آن خواهد شد. همانند نمودارهای پیشین، اثر شعاع سوزن مثبت و اثر عرض تیرک منفی بوده و سطح نمودار نیز توانسته این روند را به‌خوبی منعکس می‌کند. در نمودار (ح)، مشاهده می‌شود که هر دو متغیر ارتفاع سوزن و طول تیرک دارای اثر افزایشی بر زمان بحرانی هستند. سطح نمودار در این حالت

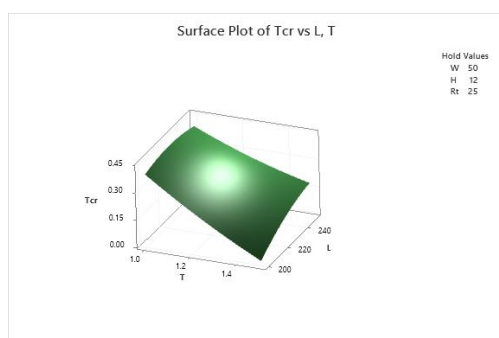
نتایج آنالیز حساسیت پارامترها

به‌منظور بررسی روابط متقابل میان پارامترها مختلف فرآیندی و ارزیابی نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر زمان بحرانی، مجموعه‌ای از نمودارهای سه‌بعدی ترسیم گردیده است. شکل (۳) نمایی بصری از سطوح پاسخ در شرایط مختلف را ارائه می‌دهند و امکان تحلیل اثرات تعاملی عوامل را میسر می‌سازد.

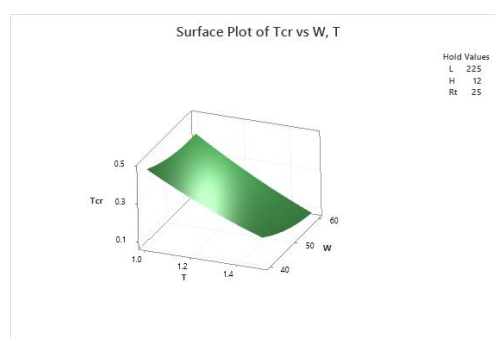
در نمودار (الف) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ضخامت تیرک، مقدار زمان بحرانی به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد. همچنین اثر عرض تیرک نیز به‌صورت منفی بوده و با

بر میزان زمان بحرانی است. مطابق نمودار (د)، افزایش مقدار شعاع سوزن و طول تیرک هر دو موجب افزایش زمان بحرانی می‌شوند. شدت تأثیر شعاع سوزن نسبت به طول تیرک اندکی بیشتر بوده و سطح نمودار دارای شیب مثبت در راستای هر دو پارامتر است.

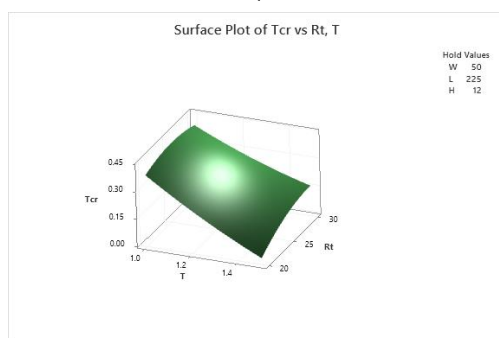
به صورت صعودی در هر دو راستای محورهای ارتفاع سوزن و طول تیرک است که این امر حاکی از هم‌افزایی مثبت این دو متغیر بر مقدار زمان بحرانی می‌باشد. در نمودار (د)، افزایش هر یک از عوامل شعاع سوزن و ارتفاع سوزن منجر به افزایش مقدار زمان بحرانی می‌شود. سطح حاصل شده دارای شیب مثبت در هر دو راستا است که گویای اثرات متقابل و افزایشی این دو متغیر



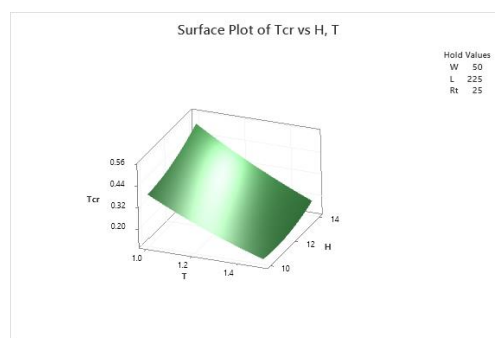
(ب)



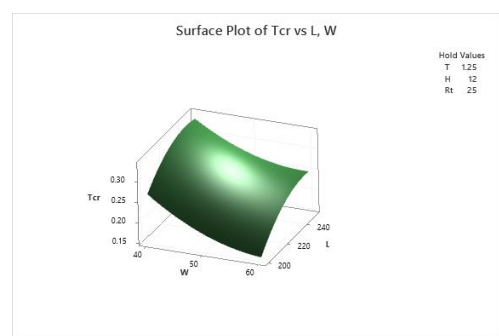
(الف)



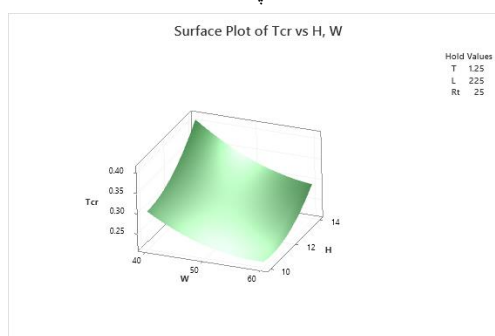
(ت)



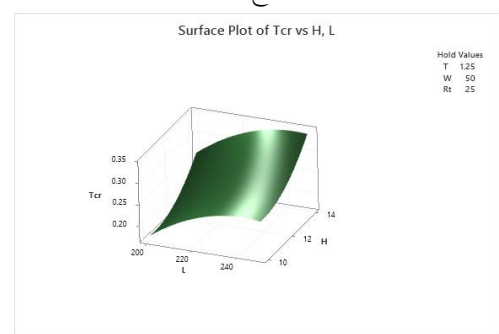
(پ)



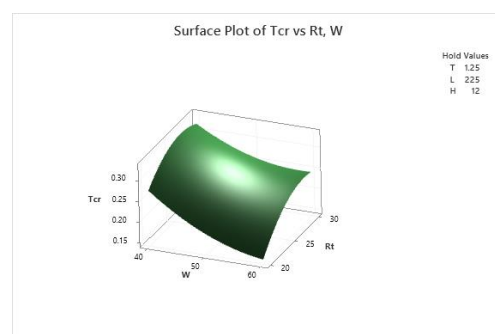
(ج)



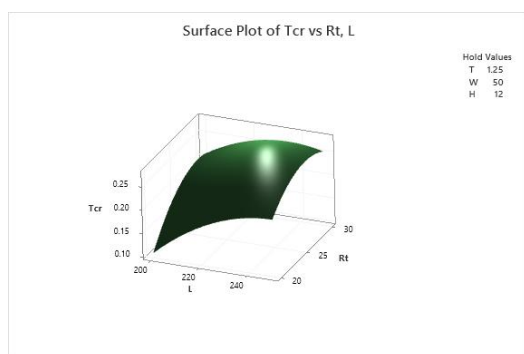
(ث)



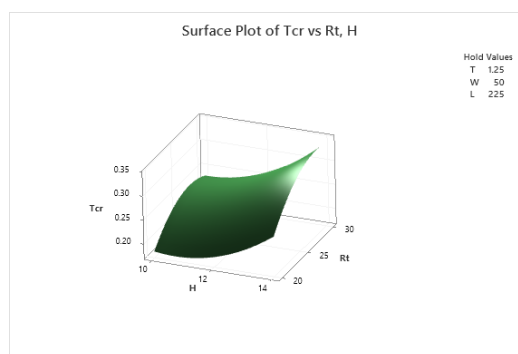
(ح)



(چ)



(ذ)



(د)

شکل ۳ نمودار تأثیر پارامترهای موردبررسی بر روی زمان بحرانی

نتیجه گیری

پیشرفت‌های سریع علم نانو، توانسته به کارگیری آنها را در زمینه‌های متفاوت ارتقا دهد. منیپولیشن یکی از فرآیندهای مشهوری است با نانوذرات سروکار دارد. در طی این فرآیند با به کارگیری میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی، شناسایی خواص ماده و جابه‌جایی آن ممکن است.

غلبه بر نیروی اصطکاک توسط سوزن میکروسکوپ، فاز اول منیپولیشن و راندن نانوذره فاز دوم این فرآیند است.

در این مطالعه با در نظر گرفتن اهمیت زمان بحرانی در فاز اول منیپولیشن، پارامترهای ابعادی تیرک و سوزن میکروسکوپ موردبررسی قرار گرفته است. ابتدا ۲۷ آزمایش با در نظر گرفتن سه سطح برای هر پارامتر انجام گرفته است. سپس با استفاده از روش آنالیز واریانس میزان اثرگذاری متغیرها برآورد گردیده است. در ادامه، مدل رگرسیون بر پایه داده‌ها استخراج شده است. آنالیزهای صورت گرفته قابلیت اطمینان این مدل را ۹۱/۰۴٪ برآورد می‌کند. این امر قابلیت پیش‌بینی مناسب مدل را تأیید می‌کند. در نهایت با روش سطح پاسخ تأثیر پارامترها بر زمان بحرانی منیپولیشن به صورت جداگانه تحلیل شده است. نتایج به دست آمده از نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ تبیین می‌کند که ضخامت تیرک می‌تواند موجب تغییرات قابل توجه زمان بحرانی شود.

این نتایج می‌تواند به عنوان مبنایی در جهت پیش‌بینی و بهینه‌سازی شرایط در فرآیندهای مشابه به کار گرفته شده و در مطالعات آتی توسعه یابد.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

H

ارتفاع سوزن

L	طول تیرک
Rt	شعاع سوزن
T	ضخامت تیرک
W	عرض تیرک
T _{cr}	زمان بحرانی

واژه نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
میکروسکوپ نیروی اتمی	Atomic force microscopy	میکروسکوپی؛ ریزبینی
تری آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان	3aminopropyltriethoxy silane (APTES)	
دابل هرتز	Double-Hertz	
مدل‌های الاستیک	Elastic Models	
نانوذرات لیپیدی	lipid nanoparticles	
لیپوزوم‌ها	Liposomes	
نانو منیپولیشن	Nano manipulation	دستکاری نانو
منیپولیشن نوری	optical manipulation	دستکاری نوری

کشسان گرانرو، کشسان سخترو		ویسکوالاس تیک
------------------------------------	--	------------------

تقدیر و تشکر

	optical diffraction	پراش نوری
مالش چرخشی	Rolling friction	اصطکاک چرخشی
مالش لغزشی	Sliding friction	اصطکاک لغزشی
مدل های	Viscoelastic Models	مدل های

مراجع

- [1] S. Yuan, L. Liu, Z. Wang, N. Xi, Y. Wang, "Study of nano-manipulation approach based on the least action principle using AFM-based robotic system," in Proceeding 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, China, 26–28 Jul. 2017, pp. 4424–4429. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028055>
- [2] M. H. Korayem, M. Mozafari, Y. H. Sooha, Z. Rastegar, "Development and application of rough viscoelastic contact models in the first phase of 3D manipulation for biological micro-/nanoparticles by AFM," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 91, no. 9, pp. 3739–3753, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01967-5>
- [3] M. H. Korayem, S. Shahali, Z. Rastegar, "Simulation of 3D nanomanipulation for rough spherical elastic and viscoelastic particles in a liquid medium; experimental determination of cell's roughness parameters and Hamaker constant's correction," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 90, pp. 313–327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.10.007>
- [4] M. H. Korayem and R. N. Hefzabad, "Nonlinear modeling of nanoscale interaction forces between atomic force microscope and carbon nanotubes," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 161, p. 104690, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104690>
- [5] M. H. Korayem, A. A. Farid, R. N. Hefzabad, "Nonclassical dynamic modeling of nano/microparticles during nanomanipulation processes," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 11, no. 1, pp. 147–166, 2020. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.13>
- [6] G. Wang, Y. Ding, H. Long, Y. Guan, X. Lu, Y. Wang, L. Yang, "Simulation of Optical Nano-Manipulation with Metallic Single and Dual Probe Irradiated by Polarized Near-Field Laser," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, p. 815, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12020815>
- [7] A. Craciun, B. Donnio, J. Gallani, M. Rastei, "High-resolution manipulation of gold nanorods with an atomic force microscope," *Nanotechnology*, vol. 31, no. 8, p. 085302, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab5404>
- [8] T. Zhang, H. Yu, P. Li, X. Wang, F. Wang, J. Shi, Z. Liu, P. Yu, W. Yang, Y. Wang, "Microsphere-based super-resolution imaging for visualized nanomanipulation," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 42, pp. 48093–48100, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12126>
- [9] C. Hou, D. Sun, L. Dong, "Nanomanipulation in biomedical applications," *Current Robotics Reports*, vol. 2, pp. 133–145, 2021. <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00047-4>

- [10] Y. Yin, H. Xu, Y. Wang, Z. Liu, S. Zhang, Z. Weng, Z. Song, Z. Wang, "Improving adhesion between nanoparticles and surface of mica substrate by aminosilane modification," *Plasmonics*, vol. 15, no. 2, pp. 399–407, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-01030-8>
- [11] X. Ma, W. Wang, G. Xie, D. Guo, S. Wen, "Friction measurement and motion state determination of a single polystyrene nanoparticle during manipulation," *Micro & Nano Letters*, vol. 15, no. 15, pp. 1140–1145, 2020. <https://doi.org/10.1049/mnl.2020.0383>
- [12] Y. Wen, H. Lu, Y. Shen, H. Xie, "Nanorobotic Manipulation System for 360° Characterization Atomic Force Microscopy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2916–2924, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2910042>
- [13] Y. Takechi-Haraya, "Atomic Force Microscopy to Measure the Mechanical Property of Nanosized Lipid Vesicles and Its Applications," *Yakugaku Zasshi: Journal of the Pharmaceutical Society of Japan*, vol. 144, no. 5, pp. 511–519, 2024. <https://doi.org/10.1248/yakushi.23-00178-2>
- [14] M. Taheri, H. Faraji, and P. Karimi, "Manipulation of breast cell tissue with the aim of calculating Young's modulus, using Tatara contact theory and atomic force microscopy," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 1–16, 2023.
- [15] M. Taheri, "Investigation of new friction models in two-dimensional manipulation of gastric cancer tissue," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 1–16, 2023.

CONTENTS

Experimental Study, Modeling and Identification of the Contact Interface Between the Disc and Brake Pads with Thin layer Element	Fahimeh Noohi, Amin Nikoobin Mohammad Reza Ashory	1
Numerical and Experimental Investigation of Fracture Fatigue and Resistance of Coating in Abrasion due to the Thermal Spray Method	Mostafa Baran Pour, Meisam Mohahmmadi Afshin Iranmanesh	15
Study of the Roughness Effect on Drag Coefficients in a Flow around a 2D Re-Entry Capsule	Samira Sourani, Morteza Bayareh, Alireza Shateri	31
Numerical Investigation of Air Preheater to Determine the Formation of Dew in Corrugated Sheets in Order to Determine the Surfaces with the Possibility of Corrosion	Hasan Mohammadi Siboni, Hamid Reza Nazif	45
An assistive System to Guide Visually Impaired People Behind Work Desks	Amirmohammad Barsalani Hamidreza Mohammadi Daniali, Arman Mardani	63
Determining the Critical time for Two-Dimensional Manipulation of Micro-Nanoparticles using a Regression Equation	Moein Taheri, Fereshte Ghane	83



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

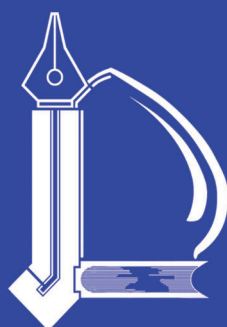
Fax: +98 51 38763301

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. 43

Experimental Study, Modeling and Identification of the Contact Interface Between the Disc and Brake Pads with Thin layer Element

Fahimeh Noohi, Amin Nikoobin
Mohammad Reza Ashory

1

Numerical and Experimental Investigation of Fracture Fatigue and Resistance of Coating in Abrasion due to the Thermal Spray Method

Mostafa Baran Pour, Meisam Mohahmmadi
Afshin Iranmanesh

15

Study of the Roughness Effect on Drag Coefficients in a Flow around a 2D Re-Entry Capsule

Samira Sourani, Morteza Bayareh
Alireza Shateri

31

Numerical Investigation of Air Preheater to Determine the Formation of Dew in Corrugated Sheets in Order to Determine the Surfaces with the Possibility of Corrosion

Hasan Mohammadi Siboni, Hamid Reza Nazif

45

An assistive System to Guide Visually Impaired People Behind Work Desks

Amirmohammad Barsalani
Hamidreza Mohammadi Daniali
Arman Mardani

63

Determining the Critical time for Two-Dimensional Manipulation of Micro-Nanoparticles using a Regression Equation

Moein Taheri, Fereshte Ghane

83

Vol. 38, No.1
Spring 2026