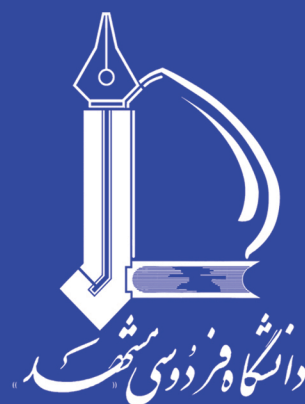


- ۱ بررسی تأثیر پارامترهای فرایندی و بهینه‌سازی زاویه خم در خم‌کاری با لیزر به روش سطح پاسخ
علی‌اکبر اصغریور - محمد بخشی جویباری - حمید گرجی
- ۲۵ استخراج ویژگی‌های آیرودینامیکی چتر ریونی توسط آزمون کشش خودرو
محمد رضا سلیمی - امیر حمزه فرج الهی - امیرحسین محسنی کفشگر کلانی
محمود ایوبی
- ۴۱ بررسی تأثیر بهینه‌سازی پوسته خارجی و جدار نورگذر بر کاهش مصرف انرژی و زمان بازگشت سرمایه ساختمان‌های آموزشی در اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم
امیر یاری نژاد - عباس مهروان
- ۶۱ بررسی تجربی و تئوری مدول یانگ بافت سرطانی سینه (MCF-10) با استفاده از تیرک‌های مختلف میکروسکوپ نیروی اتمی
معین طاهری - علی جباری - زهرا سادات اقدامی - حامد فرجی
نیما رحمانی
- ۷۷ پیاده‌سازی روش گیس-اپل در تجزیه و تحلیل دینامیکی یک ربات جدید هیبریدی سریال-موازی PP-(3RSS-PS)
سید نادر نبوی - جواد انفرادی
- ۹۳ طراحی، ساخت و بررسی تجربی عملکرد اجاق خورشیدی سهموی
ناصر بهارلو هوزه - علی صادقی - سعید گلشادی
- ۱۰۷ ارائه یک روش عددی از مرتبه دقت بالا برای حل معادلات دیفرانسیل-جبری ظاهر شده در سیستم‌های مکانیکی
فائزه کلانتری - محمدعلی مهرپویا - نبی چگینی
- ۱۲۳ بهینه‌سازی فرایند شناسایی پارامتر مدل‌های تک - دیودی، دو دیودی، و سه دیودی سلول خورشیدی مدل R.T.C. توسط الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی
علی سعداله - جواد ریاضت





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 زاده
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 سید محمد 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	علی اکبر اصغرپور - محمد بخشی جویباری حمید گرجی	بررسی تأثیر پارامترهای فرایندی و بهینه سازی زاویه خم در خم کاری با لیزر به روش سطح پاسخ
۲۵	محمدرضا سلیمی - امیرحمزه فرج الهی امیرحسین محسنی کفشگر کلائی - محمود ایوبی	استخراج ویژگی های آیرودینامیکی چتر ریونی توسط آزمون کشش خودرو
۴۱	امیر یاری نژاد - عباس مهروان	بررسی تأثیر بهینه سازی پوسته خارجی و جدار نورگذر بر کاهش مصرف انرژی و زمان بازگشت سرمایه ساختمان های آموزشی در اقلیم معتدل با تابستان های خشک و بسیار گرم
۶۱	معین طاهری - علی جباری - زهرا سادات اقدامی حامد فرجی - نیما رحمانی	بررسی تجربی و تئوری مدول یانگ بافت سرطانی سینه (MCF-10) با استفاده از تیرک های مختلف میکروسکوپ نیروی اتمی
۷۷	سید نادر نبوی - جواد انفرادی	پیااده سازی روش گیبس - اپل در تجزیه و تحلیل دینامیکی یک ربات جدید هیبریدی سریال - موازی PP-(3RSS-PS)
۹۳	ناصر بهارلو هوره - علی صادقی - سعید گلشادی	طراحی، ساخت و بررسی تجربی عملکرد اجاق خورشیدی سهموی
۱۰۷	فائزه کلانتری - محمدعلی مهرپویا - نبی چگینی	ارائه یک روش عددی از مرتبه دقت بالا برای حل معادلات دیفرانسیل - جبری ظاهر شده در سیستم های مکانیکی
۱۲۳	علی سعداله - جواد ریاضت	بهینه سازی فرایند شناسایی پارامتر مدل های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی سلول خورشیدی مدل R.T.C. توسط الگوریتم بهینه سازی شبکه عصبی

Effect of Process Parameters and Optimization of Bending Angle in Laser Bending Process by Response Surface Method

Research Article

Aliakbar Asgharpour¹, Mohammad Bakhshi-Jooybari² , Hamid Gorji³

DOI: [10.22067/jacsm.2023.82668.1185](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.82668.1185)

1. Introduction

The laser-forming process is a non-contact method that uses laser energy to form and bend sheets without using rigid tools or external force. The ability to form sheet metals with high strength, not using a set of tools, the flexibility of the process, and good automation capability combined with other laser applications, such as cutting and welding, are among the significant advantages of this method compared to other traditional forming processes. These advantages are mainly due to the use of a laser beam as a part of the deformation tool in the process. The principle of the laser-bending process is depicted in Fig 1.

Most of the materials used in the research were titanium, magnesium, steel, and their alloys. In this paper, the extent and type of the influence of different parameters on the laser-bending process, such as laser energy parameters and geometric parameters of the sheet on the bending angle were studied. Moreover, their values were optimized to achieve the maximum bending angle using experimental, numerical, and statistical methods on a 6061 aluminum sheet. Therefore, the moot point investigated in this paper is to achieve a correct understanding of the impact of various process parameters on the bending angle and to achieve the maximum bending angle by optimizing the existing parameters of the process.

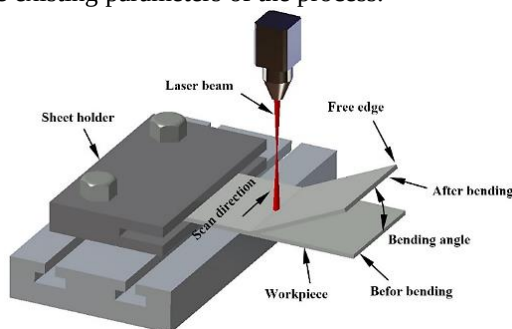


Figure 1. Schematic of the laser-bending process

2. Experimental setup procedure

A Nd: YAG pulsed laser machine (model 4297 PMT) with a maximum power of W400 was employed to perform the

experimental tests. The specimens used in the experimental tests are made of AA 6061 sheets with dimensions of $2 \times 50 \times 100$ mm. The sheet surface was covered by the graphite spray to increase the absorption coefficient of the laser beam. To measure the bending angle created in the specimen, a coordinate measuring machine CMM Mora3 with an accuracy of 0.001 mm was used. To measure the bending angle using the CMM machine, the position of 4-5 points was determined on each of the bent plates of the sheet. Next, by determining the passing plane through the identified points, the bending angle between the two planes was calculated in Inca 3D software. Figure 2 represents the experimental setup along with the bent sheet.

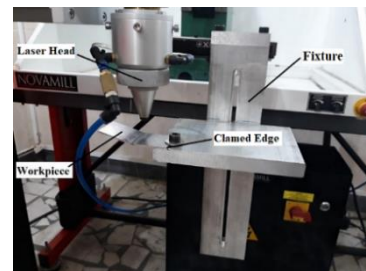


Figure 2. Experimental setup of the laser-bending process

3. Numerical simulation

The model dimensions used in the simulation were considered the same as the dimensions of the sheet in the experimental tests. The heat flux created by the laser beam leads to high-temperature differences that affect the material properties; therefore, temperature-dependent properties were used in the simulations. In addition, mechanical boundary conditions were used to limit the displacement of the sheet during the simulation process. The subroutine DFLUX of the ABACUS software was utilized to define heat flux with non-uniform distribution as a function of temperature, time, and position. The amount of heat flux density applied to the surface was calculated using Equation 1.

*Manuscript received: May 29, 2023. Revised, July 30, 2023, Accepted, October 9, 2023.

¹. M.Sc. Graduate, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

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

³. Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

$$I = \frac{2AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2r_1^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

Therefore, the average heat flux within the laser beam diameter range is calculated by integrating heat flux function in the range of laser beam radius (Equation 2).

$$I_m = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r I(2\pi r_1) dr_1 \quad (2)$$

$$= \frac{2\pi}{\pi r^2} \int_0^r \frac{2AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2r_1^2}{r^2}\right) (r_1) dr_1 = \frac{0.865AP}{\pi r^2}$$

In order to simulate the laser-bending process, the element type C3D8T was used. In addition, five elements were created along the sheet thickness for an accurate representation of the thermal gradient. Figure 3 illustrates the model with the assigned mesh used in this study.

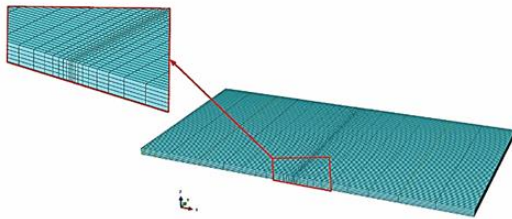


Figure 3. Meshing the 3D model of the sheet

4. Optimization by Response Surface Method

The behavioral modeling of the process is a method that can provide acceptable accuracy by eliminating time-consuming and costly experiments. One of the most common methods of behavioral modeling is the response surface methodology (RSM). The purpose of using this method is to determine a relationship between the response (Y) and several controllable or input variables, which are illustrated by $X_1, X_2, \dots$, and X_K . RSM can be designed into different methods according to their application. In this study, the central composite design (CCD) method was used to optimize and evaluate the effect of parameters in the laser-bending process. Table 1 shows the selected parameters and their corresponding values.

Table 1. Selected parameters and their corresponding levels

Factors	Unit	Symbol	Levels				
			- α	-1	0	+1	+ α
Laser power	W	P	375	400	425	450	475
Beam diameter	mm	D	1.5	2	2.5	3	3.5
Scan velocity	mm/s	V	14	18	22	26	30
Step time	s	t	8	10	12	14	16
Pass number	-	n	3	5	7	9	11
Sheet length	mm	L	90	100	110	120	130
Sheet width	mm	W	40	50	60	70	80
Sheet thickness	mm	S	2	2.5	3	3.5	4

5. Results and Discussion

Experimental results

Two specimens of AA 6061 sheets with a thickness of 2 mm were tested at different laser powers in order to examine the repeatability of the experimental tests. The values of these parameters and their measured bending

angle are illustrated in Table 2. According to the results shown in Table 2, the AA 6061 sheet bending using the laser-bending process has a high repeatability.

Table 2. Parameters and values used in the experimental test

Laser power (W)	Scan velocity (mm/s)	Pass number	Beam diameter (mm)	Bending angle sample 1	Bending angle sample 2	Deviation (%)
220	10	7	3	0.636	0.649	2
240	15	10	3	0.784	0.789	0.6
270	10	8	3	1.171	1.168	0.3
330	15	8	3	1.296	1.238	1

Validation of numerical simulation

In order to validate the simulation results, the experimental test was conducted for five laser power values of 240, 270, 300, 330, and 390 W, while other parameters were considered constant. The results of comparing experimental and simulation results are shown in Figure 4. As can be seen, there is a good agreement between the bending angle obtained from the simulation and the experimental tests.

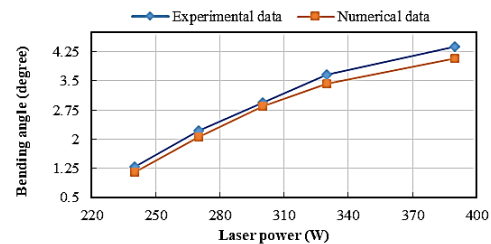


Figure 4. Comparison of experimental and simulation results under the conditions: D=3mm, V=18mm/s, S=2mm, n=9

Simulation results

An important phenomenon that occurs in the laser-bending process using the temperature gradient mechanism (TGM) is the counter-bending at the beginning of the process. This phenomenon cannot be observed due to the small amount. The counter-bending is observable by plotting a diagram of the free-edge displacement of the sheet in terms of the time obtained from the numerical simulation results. Figure 5 shows the time-displacement graph.

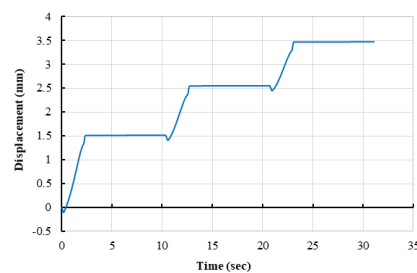


Figure 5. Time-displacement graph

Figure 6 indicates the graph of temperature versus time. This graph shows the temperature difference between the top and bottom surfaces of the sheet obtained from the numerical simulation. The created temperature

difference is the cause of the TGM. The maximum temperature difference between the upper and lower surfaces of the sheet is 350°C.

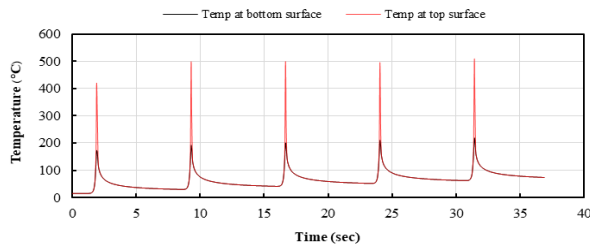


Figure 6. Temperature-time graph at the center of the sheet

Effect of process parameters

The influence of each of the examined parameters on the bending angle is shown in Figure 7.

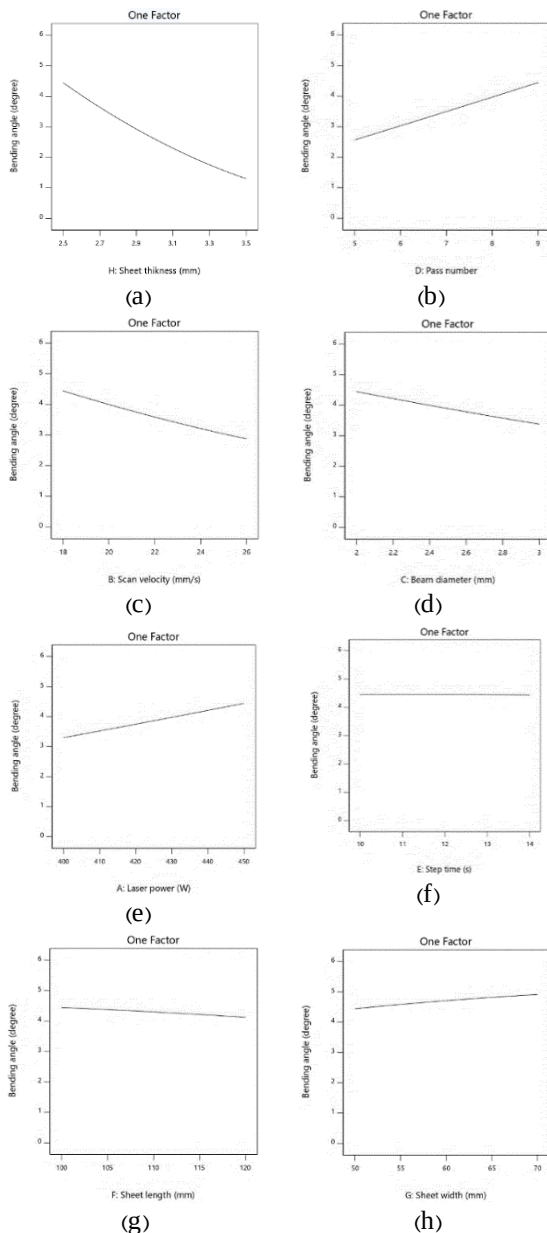


Figure 7. Influence of parameters on the bending angle

According to the evaluations conducted based on the

design of the experiment (DOE) using the CCD method, with the increase in thickness from 2.5 mm to 3.5 mm, the bending angle decreased from 1.7° to 0.379°; that is, with an increase of 1 mm in the thickness in two experiments with the combination of specific parameters based on the DOE conducted in this study, the bending angle decreased by about 77%. On the other hand, with the rise in the pass number, the value of the bending angle augments. Increasing the pass number means replicating the laser radiation, which increases the bending angle. However, as the scan velocity rises, the value of the bending angle will decline because as the scan velocity increases, the amount of thermal energy applied to the surface of the sheet along the scanning path decreases. Raising the laser beam diameter leads to a decrease in the bending angle. In other words, as the laser beam diameter increases, the energy intensity per unit area of the sheet decreases, and as a result, the value of the bending angle also decreases, while the bending angle rises with increasing laser power. Increasing the laser power means raising the input energy and the effect of the laser energy. The results showed that the slant of the graph for step time, sheet length, and sheet width have the lowest values compared to other parameters. Therefore, the parameters of step time, sheet length, and sheet width do not have a great effect on the bending angle, so the effect of these three parameters on the bending angle can be ignored in this process.

In order to validate the effects shown for the parameters, an analysis of variance was used. This analysis was performed assuming the normality of the error distribution, the stability of the variance, and its independence. The normal probability plot of the residual is shown in Figure 8. The scatter of the test points around the diagonal line indicates that experiments were performed correctly and reliable results were obtained.

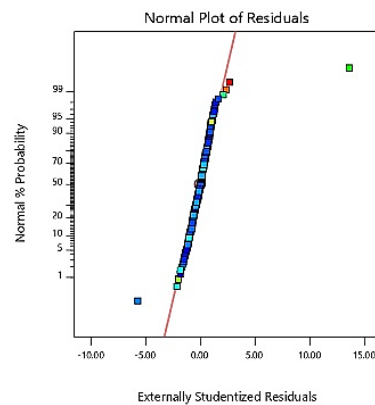


Figure 8. Normal probability plot of residuals

The most important results of analysis of variance (ANOVA) are shown in Table 3. This table summarizes the effectiveness or ineffectiveness of the factors evaluated in this study and also the extent of the impact of each of the effective factors in the process. As can be seen, all selected parameters with a p-value of less than 0.05 are among the effective parameters in the process. In addition, the F-value denotes the effectiveness of every parameter in the process. Generally, the higher F-value of a parameter showed the higher influence of that parameter.

Table 3. ANOVA table for parameters

source	sum of squares	Mean square	F-Value	p-value
Model	350.61	7.97	224.91	< 0.0001
A-Laser power	22.69	22.69	640.52	< 0.0001
B-Scan velocity	34.72	34.72	979.90	< 0.0001
C-Beam diameter	20.67	20.67	583.46	< 0.0001
D-Pass number	41.95	41.95	1184.20	< 0.0001
E-Step time	0.1108	0.1108	3.13	0.0782
F-Sheet length	1.18	1.18	33.35	< 0.0001
G-Sheet width	3	3	84.74	< 0.0001
H-Sheet thickness	171.45	171.45	4839.21	< 0.0001
AB	0.7849	0.7849	22.15	< 0.0001
AC	0.4177	0.4177	11.79	0.0007
AD	2.09	2.09	58.96	< 0.0001
AE	0.0114	0.0114	0.3205	0.5718
AF	0.0368	0.0368	1.04	0.3092
AG	0.2649	0.2649	7.48	0.0067
AH	5.25	5.25	148.24	< 0.0001
BC	0.823	0.823	2.32	0.1289
BD	3.82	3.82	107.89	< 0.0001
BE	0.0020	0.0020	0.0551	0.8146
BF	0.1247	0.1247	3.52	0.0618
BG	0.0396	0.0396	1.12	0.2916
BH	11.79	11.79	332.74	< 0.0001
CD	2.30	2.30	65.01	< 0.0001
CE	0.0111	0.0111	0.3123	0.5768
CF	0.0031	0.0031	0.0887	0.7661
CG	0.1706	0.1706	4.82	0.0292
CH	4.23	4.23	119.49	< 0.0001
DE	0.0129	0.0129	0.3648	0.5464
DF	0.0593	0.0593	1.67	0.1969
DG	0.4470	0.4470	12.62	0.0005
DH	18.25	18.25	515.25	< 0.0001
EF	0.0353	0.0353	0.9969	0.3191
EG	0.0823	0.0823	2.32	0.1289
EH	0.0004	0.0004	0.0104	0.9189
FG	0.0056	0.0056	0.1590	0.6904
FH	0.6295	0.6295	17.77	< 0.0001
GH	0.3711	0.3711	10.47	0.0014
A ²	0.0033	0.0033	0.7602	0.0933
B ²	0.1770	0.1770	0.0264	5.00
C ²	0.0191	0.0191	0.4638	0.5386
D ²	0.0028	0.0028	0.7782	0.0795
E ²	0.0029	0.0029	0.7737	0.0829
F ²	0.0108	0.0108	0.5821	0.3038
G ²	0.0343	0.0343	0.3264	0.9671
H ²	2.55	2.55	72.03	< 0.0001
Residual	8.40	0.0354	-	-
Lack of Fit	8.40	0.0368	-	-
Pure Error	0.001	0.00018	-	-
Adeq Precision	68.4682	-	-	-
Cor Total	359.01	-	-	-

Optimizing the laser-forming process

The purpose of optimization is to reach the maximum value for the bend angle. Considering the specified limits for the process parameters, the optimal value for reaching the maximum bending angle for each parameter is shown in Figure 9. Moreover, Figure 9 demonstrates the lowest (0.008°) and highest (5.369°) actual values for the bend angle, while the maximum bending angle predicted by the regression model considering the optimal values for each parameter is 4.911°.

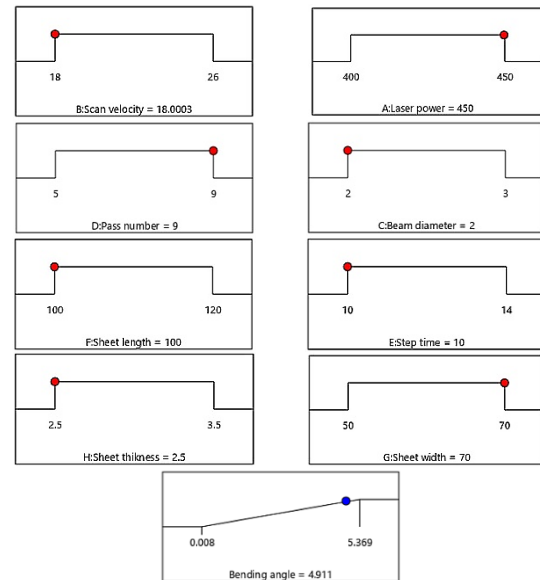


Figure 9. Optimal value of each parameter

7. Conclusion

In order to investigate the effect of parameters on the laser-bending process and to optimize the parameters to achieve the maximum bending angle, the process parameters were numerically, experimentally, and statistically investigated. The following results were summarily obtained from this study:

- Among the eight investigated parameters, the parameters of sheet thickness, pass number, scan velocity, laser power, and laser beam diameter were introduced as the parameters that had the greatest influence on the bending angle.
- Step time as well as the length and width of the sheet were identified as the parameters that do not have much effect on the bending angle.
- The experimental and numerical results demonstrated that sheet thickness, laser beam diameter, scan velocity, step time, and sheet length have an inverse relationship with bending angle. On the other hand, the three remaining parameters, i.e. laser power, pass number, and sheet width, are directly related to the bending angle in this process.
- The results of the simulation revealed that the value of the bending angle increases with a rise in the number of pass numbers, but the value of the increase in the bending angle in the number of high passes per pass decreases slightly.
- The optimization results showed that the maximum bending angle obtained through the model (4.911°) is obtained when the sheet thickness (2.5 mm), laser beam diameter (2 mm), step time (10 s), sheet length (100 mm), and scan velocity (18 mm/s) are at a low level, and the pass number (9), sheet width (70 mm), and laser power (450W) are at a high level.



بررسی تأثیر پارامترهای فرایندی و بهینه‌سازی زاویه خم در خم کاری با لیزر به روش سطح پاسخ*

مقاله پژوهشی

حمید گرجی^(۳)

محمد بخشی جویباری^(۲)

علی اکبر اصغریپور^(۱)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.82668.1185

چکیده فرایند شکل دهی با لیزر، یک موضوع تحقیقاتی و صنعتی نسبتاً جدید است. مواد استفاده شده در پژوهش‌های انجام شده از سوی محققان، نوعاً تیتانیوم، منیزیم، فولاد و آلیاژهای آن بوده است. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن انعکاس سطحی بالای پرتو لیزر و ضریب جذب پایین، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، ابتدا نحوه و میزان تأثیر پارامترهای مختلف فرایندی بر روی زاویه خم در فرایند خم کاری با لیزر ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شد. سپس، به منظور دستیابی به حداکثر زاویه خم، تمام پارامترها به روش سطح پاسخ (RSM) بهینه‌سازی شدند. علاوه بر این، تکرارپذیری فرایند به همراه صحت و اعتبار شبیه‌سازی با اندازه‌گیری دقیق زاویه خم با انجام آزمایش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که ضخامت ورق بیشترین تأثیر را بر زاویه خم دارد، به طوری که با افزایش ۱mm در ضخامت ورق، مقدار زاویه خم ۷۷٪ کاهش می‌یابد. همچنین با بهینه‌سازی پارامترها، حداکثر زاویه خم ۴/۹۱۱ درجه به دست آمد.

واژه‌های کلیدی خم کاری با لیزر، بهینه‌سازی، زاویه خم، شبیه‌سازی اجزای محدود، روش سطح پاسخ (RSM).

Investigating the Effect of Process Parameters and Optimization of Bending Angle in Laser Bending

Aliakbar Asgharpour

Mohammad Bakhshi-Jooybari

Hamid Gorji

Abstract The laser forming process is an emerging area of research and industry, primarily focused on materials like titanium, magnesium, steel, and their alloys. However, aluminum alloys have received less attention due to challenges related to surface reflection and low absorption coefficients. In this research, the effect of different process parameters on bending angle in the laser bending of Al 6061 sheets was investigated by experiments and finite element simulation. The parameters were optimized by Response Surface Method (RSM) to achieve the maximum bending angle. In addition, the reproducibility of the process, as well as the accuracy and validation of the simulation, were examined by conducting experiments that involved accurate measurement of the bending angle. The results revealed that the sheet thickness had the most significant effect on the bending angle. Specifically, with an increase of 1 mm in the sheet thickness, the bending angle decreased by 77%. Additionally, through process parameter optimization, the maximum bending angle achieved was 4.911 degrees.

Key Words Laser bending, Optimization, Bending angle, Finite element simulation, Response Surface Method (RSM).

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۳/۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۷/۱۷ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران.

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

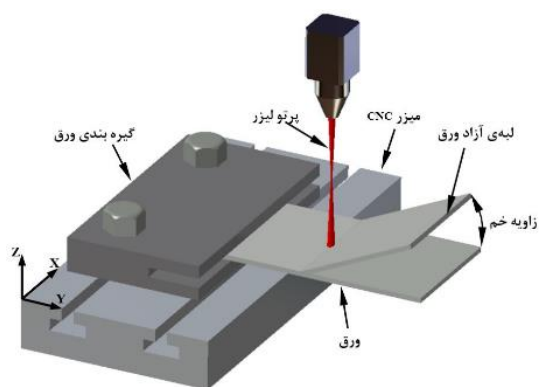
Email: bakhshi@nit.ac.ir

مقدمه

به‌کارگیری روش‌های سنتی مانند خم کاری با قالب، برای خم کاری و شکل‌دهی قطعات بزرگ مانند بدنه کشتی‌ها و همچنین تولید قطعات با تعداد محصول کم، با محدودیت‌های فراوانی همراه می‌باشد. این محدودیت‌ها موجب تشویق صنعتگران به بهره بردن از روش‌های جایگزین مناسب گردیده است.

فرایند شکل‌دهی با استفاده از پرتو لیزر یک روش شکل‌دهی غیر تماسی است که بدون استفاده از ابزار سخت و نیروی خارجی، از انرژی لیزر برای شکل‌دهی و خم کاری ورق‌های فلزی استفاده می‌شود. توانایی شکل‌دهی فلزات با استحکام بالا، عدم استفاده از مجموعه ابزارها، انعطاف‌پذیری سیستم و قابلیت خودکارسازی خوب توأم با سایر کاربردهای لیزر مانند برش و جوش کاری از جمله مزیت‌های قابل توجه این روش در مقایسه با سایر فرایندهای شکل‌دهی سنتی است. این مزیت‌ها عمدتاً ناشی از استفاده از پرتو لیزر به‌عنوان بخشی از ابزار تغییر شکل در فرایند می‌باشد [1]. امروزه این فرایند در صنایع مختلف هوافضا، کشتی‌سازی و صنعت میکروالکترونیک به کار گرفته می‌شود [2]. در این فرایند، با پرتو لیزر با سرعت مشخص بر روی سطح ورق یک گرادیان دمایی در راستای ضخامت ورق ایجاد می‌شود. این امر، موجب ایجاد تنش‌های حرارتی در راستای ضخامت ورق می‌شود. اگر میزان حرارت‌دهی موضعی به اندازه‌ای باشد که تنش حرارتی ایجاد شده در قطعه از حد الاستیک ماده بیشتر گردد، در این حالت کرنش‌های حرارتی تبدیل به کرنش‌های پلاستیک فشاری به‌صورت موضعی می‌شوند. ابتدا در اثر کرنش‌های پلاستیک کششی در سطوح بالایی که بزرگ‌تر از کرنش ایجاد شده در سطوح پایین هستند، یک خم منفی در قطعه ایجاد می‌شود و لبه ورق به سمت پایین خم می‌شود، اما با گذشت زمان و خنک شدن قطعه، سطوح بالایی آن بیشتر منقبض می‌گردد و در نهایت خم مثبت در قطعه و رو به بالا به صورت دائمی ایجاد می‌شود [3]. اساس فرایند شکل‌دهی با پرتو لیزر شکل‌دهی ورق با اعمال تنش‌های حرارتی است که در اثر تابش پرتو لیزر در آن القا می‌شود. نحوه توزیع دمای القا شده در اثر تابش پرتو لیزر بر روی سطح ورق، مشخص‌کننده مکانیزم شکل‌دهی است. توزیع دمایی در قطعه‌کار به پارامترهای فرایند نظیر توان

لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن پرتو و ضخامت قطعه‌کار بستگی دارد [4، 5]. گیگر و ولرتسن [6] سه مکانیزم فرایند شکل‌دهی با پرتو لیزر را که عبارت از مکانیزم‌های گرادیان دمایی، کماتش و کوتاه کردن است، شناسایی نمودند. آنان از مکانیزم گرادیان دمایی در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی نمودند. شکل (۱) نمایی از فرایند خم کاری با لیزر را نمایش می‌دهد.



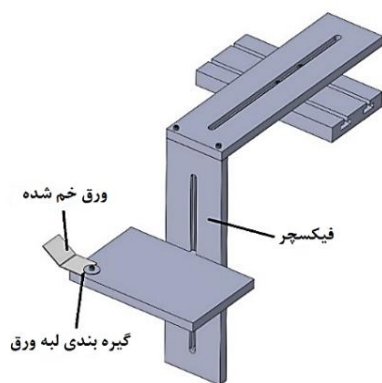
شکل ۱ تصویر شماتیک از فرایند خم کاری با اشعه لیزر

اولین فعالیت‌ها در استفاده از لیزر به‌منظور شکل‌دهی ورق‌های فلزی در سال ۱۹۸۶ توسط نامبا انجام شد [7]. پس از آن، بسیاری از محققان از پرتو لیزر به‌عنوان ابزاری برای شکل‌دهی استفاده کرده‌اند و تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شد. ریاحی و همکاران [8] به بررسی اثر توزیع شار حرارتی یکنواخت و گوسی در اندازه‌های مختلف توان، سرعت اسکن و قطر پرتو لیزر بر زاویه خم پرداختند. ورق استفاده شده در این مطالعه از یک ورق دولایه از جنس (Al/Sic) بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که توزیع شار حرارتی یکنواخت، زاویه خم بیشتری نسبت به توزیع شار حرارتی گوسی ایجاد می‌کند. یانجین و همکاران [9] اثر خواص مواد را در فرایند خم کاری با لیزر صفحه فلزی از جنس فولاد مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، ضریب انبساط حرارتی رابطه مستقیم با مقدار شکل‌دهی دارد. همچنین افزایش ضریب هدایت حرارتی عامل محدود کننده شکل‌دهی نهایی است. صفری و همکاران [10] شکل‌دهی سطوح استوانه‌ای با شعاع انحنا دلخواه را بر روی ورق فولاد کم‌کربن به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق یاد شده پارامترهای مربوط به لیزر با توجه به شرایط دستگاه لیزر ثابت فرض شد و

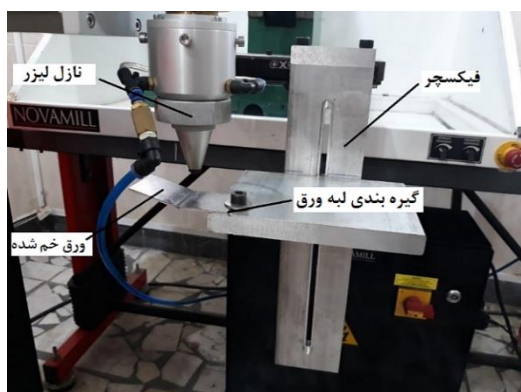
که توان لیزر بالاتر و زمان اسکن کمتر تأثیر معنی داری بر زاویه خم دارد. در همان سال بهرا و همکاران [14] از روش تاگوچی برای بهینه سازی پارامترها برای دستیابی به حداکثر زاویه خم در فرایند خم کاری با لیزر استفاده کردند. چهار پارامتر ورودی توان لیزر، سرعت اسکن، قطر پرتو لیزر و مدت زمان پالس برای بهینه سازی در نظر گرفته شد. نتایج آن ها نشان داد که حداکثر زاویه خم که می توان با در نظر گرفتن این پارامترهای بهینه به دست آورد، ۲۰ درجه بود. علاوه بر این، از بین چهار پارامتر مورد بررسی در این مطالعه، قطر پرتو لیزر بیشترین تأثیر را بر زاویه خم دارد. ونکادشواران و همکاران [15] از روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی رابطه بین زاویه خم و پارامترهای فرایند مانند توان لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن و ضخامت ورق در فرایند خم کاری با لیزر ورق ALSI 304 استفاده کردند. نتایج آن ها نشان داد که مقادیر بهینه پارامترها باعث افزایش بهره وری و کاهش هزینه کل عملیات برای یک زاویه خم خاص می شود. در سال ۲۰۱۳ زهرانی و مراچی [16] پارامترها را برای به دست آوردن حداکثر زاویه خم در فرایند خم کاری با لیزر ورق فولادی AISI 1010 از طریق روش سطح پاسخ (RSM) و با استفاده از طرح باکس بنکن (BBD) مدل سازی و بهینه سازی کردند. نتیجه این بهینه سازی منجر به ارائه ترکیب های پارامتری بهینه شده است که در آن با کنترل پارامترها، زاویه خم حداکثر خواهد بود. روحی و همکاران [17] تأثیر چهار پارامتر فرایند شامل ضخامت ورق، توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد اسکن را بر روی شکل دهی با لیزر ورق Al6061-T6 بررسی کردند. آن ها از روش سطح پاسخ (RSM) به منظور محدود کردن آزمایش های مورد نیاز برای کاهش هزینه ها و تعیین اثر پارامترها بر زاویه خم استفاده کردند. نتایج آن ها نشان داد که توان لیزر و زاویه اسکن رابطه مستقیم با زاویه خم دارند، در حالی که ضخامت ورق و سرعت اسکن رابطه عکس دارند. در سال ۲۰۱۶ تأثیر گرادیان دما در ورق های آلومینیوم Al 6061-T6 برای سه ضخامت بر زاویه خم توسط روحی و همکاران [18] مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، تأثیر چهار پارامتر شامل توان لیزر، سرعت اسکن، تعداد اسکن و ضخامت ورق بر گرادیان دمایی ورق های آلیاژ آلومینیوم با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) مطالعه شد. نتایج آن ها نشان داد که گرادیان دما رابطه مستقیم با میزان زاویه خم ایجاد شده در ورق دارد. علاوه بر این، آن ها دریافتند که از بین پارامترهای ورودی، توان لیزر و ضخامت ورق تأثیر مستقیم دارند و سرعت اسکن و قطر پرتو

پارامتر لازم برای شکل دهی سطح ورق به صورت استوانه ای با شعاع انحنای دل خواه پیشنهاد و معرفی شد. از آنجایی که فرایند شکل دهی با لیزر از جمله فرایندهای شکل دهی بدون قالب می باشد، تولید قطعات با هندسه مشخص در آن پیچیده است زیرا در این فرایند باید پارامترهای لیزر و ورق اولیه طوری تنظیم شود که منجر به تولید قطعه با هندسه مشخص شود. باوجود چندین پارامتر متغیر، دستیابی به یک زاویه خم مشخص در فرایند خم کاری با لیزر پیچیده می باشد. در این زمینه تحقیقاتی توسط سایر محققان انجام شده است. به طور نمونه، یک مطالعه تجربی در زمینه اثر عوامل مؤثر بر خم کاری ورق های فلزی از جنس آلومینیوم و فولاد توسط شیچون و همکارش [3] صورت گرفته است. به این ترتیب، پارامترهای مؤثر بر زاویه خم به سه دسته پارامترهای وابسته به انرژی لیزر، پارامترهای وابسته به جنس ورق و پارامترهای هندسی ورق تقسیم گردید. حسین پور و همکاران [11] در یک مطالعه تجربی و آماری با استفاده از یک لیزر نئودیم - یاق پالسی، اثر پارامترهای فرایندی مانند خواص ماده، توان لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن پرتو لیزر، ضخامت ورق و تعداد اسکن پرتو لیزر را بر زاویه خم بررسی کردند. در این مطالعه از دو جنس ورق فولاد St-12 و فولاد ۳۰۴ برای انجام آزمایش های تجربی استفاده شد. نتایج آن ها نشان داد که پارامترهای تعداد اسکن پرتو لیزر، جنس ماده، ضخامت ورق، سرعت اسکن و قطر پرتو لیزر به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی خم ورق دارند. مولای و همکاران [12] یک روش تحلیلی برای پیش بینی زاویه خم برای ورق های AISI 304 پیشنهاد کردند. علاوه بر این، آن ها تأثیر پارامترهای مختلف فرایند مانند توان لیزر و سرعت اسکن را بر زاویه خم در فرایند خم کاری با لیزر بررسی کرده اند. نتایج آن ها نشان داد که مدل پیشنهادی زاویه خم دقیق را برای فرایند خم کاری با لیزر چند پاسه پیش بینی می کند. همچنین میزان زاویه خم در فرایند خم کاری با لیزر چند پاسه به پارامترهای توان لیزر و سرعت اسکن بستگی دارد. در سال ۲۰۲۰ بونپوانگ و همکاران [13] بهینه سازی پارامترهای فرایند خم کاری با لیزر را با استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای ورق های فولاد ضد زنگ بررسی کردند. علاوه بر این، آن ها اثر سه پارامتر نرخ تکرار پالس، توان لیزر و زمان اسکن را هم مورد مطالعه قرار دادند. آنان دریافتند که زاویه خم با افزایش نرخ تکرار پالس و توان لیزر افزایش، اما زاویه خم با افزایش زمان اسکن کاهش می یابد. نتایج بهینه سازی نشان داد

استفاده شده است. شکل (۲) فیکسچر طراحی شده را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان زاویه خم ایجاد شده در قطعه کار از یک دستگاه اندازه‌گیری مختصات CMM مدل Mora3 با دقت 0.001 میلی‌متر استفاده شد. با توجه به اینکه فرایند خم کاری با لیزر یک فرایند حرارتی است، ایجاد اعوجاج حرارتی در لبه آزاد ورق امری اجتناب‌ناپذیر است. از این رو، مقدار خطای ناچیزی بین $0.27 - 0.41$ درجه هنگام اندازه‌گیری زاویه با استفاده از دستگاه CMM در قطعات خم شده مشاهده شد. روش اندازه‌گیری زاویه خم با استفاده از دستگاه CMM بدین صورت بوده است که در ابتدا موقعیت ۴ تا ۵ نقطه بر روی هر یک از صفحات خم شده ورق مشخص شد. سپس با تعیین صفحه عبوری از طریق نقاط شناسایی شده، زاویه بین دو صفحه در نرم‌افزار Inca 3D محاسبه گردید. شکل (۳) نمونه‌ای از قطعه خم کاری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شماتیک فیکسچر طراحی شده برای انجام آزمایش‌ها



شکل ۳ تجهیزات استفاده شده در انجام آزمایش‌ها

شبیه‌سازی عددی

در مقاله حاضر از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس (ABAQUS)

تأثیر معکوس بر بزرگی گرادیان دما دارند. در سال ۲۰۲۰ خندانل و همکاران [19] ایده جدیدی بر اساس روش اسکن دایره‌ای ارائه کردند که در قالب دو طرح گام‌به‌گام و معکوس ارائه شده است. با توجه به نتایج آن‌ها، استخراج دقیق مسیر اسکن لیزری برای تمام شکل‌های دوبعدی و سه‌بعدی آسان خواهد بود. از آنجایی که این استراتژی قابل برنامه‌ریزی است، می‌توان تنها با تغییر پارامترهای ورودی، از این روش برای طراحی و پیاده‌سازی شکل‌های مختلف استفاده کرد. تحقیق دیگری توسط خندانل و همکاران [20] انجام شده است که در آن تأثیر خنک‌سازی اجباری بر شکل‌دهی لوله لیزر به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که خنک‌سازی موضعی با آب، مدت زمان خم ۱ درجه را در مقایسه با خنک‌سازی در دمای محیط، حدود ۸ تا ۱۳ برابر کاهش می‌دهد.

در مقاله حاضر چگونگی و میزان تأثیر پارامترهای مختلف در فرایند خم کاری با لیزر مانند پارامترهای انرژی لیزر و پارامترهای هندسی ورق بر روی زاویه خم و همچنین بهینه کردن مقدار آن‌ها به منظور دستیابی به حداکثر زاویه خم، با استفاده از روش‌های تجربی، عددی و آماری بر روی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب، مسئله مورد تحقیق در این مقاله، رسیدن به درک درست نسبت به رفتار پارامترهای مختلف فرایند بر زاویه خم و دستیابی به بیشترین مقدار زاویه خم با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای موجود فرایند می‌باشد.

مراحل انجام پژوهش

مواد و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش تجربی
برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه لیزر پالسی Nd:YAG مدل ۴۲۹۷ PMT با حداکثر توان ۴۰۰W استفاده شد. کله‌گی دستگاه ثابت بوده و حرکت قطعه کار توسط یک میز با کنترل عددی انجام می‌شد. ورق استفاده شده از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ با ابعاد $2 \times 50 \times 100$ میلی‌متر بوده است. پس از برش قطعه کار، سطح آن با محلول استون تمیز شد. همچنین سطح ورق توسط اسپری گرافیت پوشانده شد تا ضریب جذب پرتو لیزر افزایش یابد. علاوه بر این، برای محدود کردن لبه ورق و قرار دادن قطعه کار در زیر نازل لیزر، در ابتدا یک فیکسچر طراحی و ساخته شد که می‌تواند در راستای عمودی (Z) تنظیم و جابه‌جا شود. از جابه‌جایی در جهت Z برای تنظیم قطر پرتو لیزر

به صورت تابعی از موقعیت، زمان و دما در تحلیل مسائل انتقال حرارت استفاده می شود. مقدار چگالی شار حرارتی وارد بر سطح از رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$I = \frac{2AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2r_1^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

بنابراین مقدار شار حرارتی متوسط در محدوده قطر اشعه لیزر از انتگرال گیری تابع شار حرارتی در دامنه شعاع پرتو لیزر محاسبه می شود (رابطه ۲).

$$I_m = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r I(2\pi r_1) dr_1 \\ = \frac{2\pi}{\pi r^2} \int_0^r \frac{2AP}{\pi r_1^2} \exp\left(-\frac{2r_1^2}{r^2}\right) (r_1) dr_1 = \frac{0.865AP}{\pi r^2} \quad (2)$$

در رابطه بالا A ضریب جذب سطح، P توان خروجی لیزر، r شعاع پرتو لیزر و r_1 فاصله بین نقطه مورد بررسی و مرکز پرتو لیزر است [9].

به منظور شبیه سازی فرایند شکل دهی با لیزر، از المان های نوع C3D8T (المان هشت گرهی کوپل حرارتی- با جابه جایی ۳ محوره) برای شبکه بندی مدل استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور نمایش دقیق شیب حرارتی از تعداد پنج المان در راستای ضخامت ورق استفاده شده است (شکل ۴).

نسخه ۲۰۱۷ به منظور شبیه سازی فرایند خم کاری با لیزر استفاده شده است. قابلیت تحلیل ترکیبی مکانیکی و حرارتی این نرم افزار به طور هم زمان امکان تحلیل و مدل سازی را در این فرایند فراهم کرده است [21]. شار حرارتی ایجاد شده توسط پرتو لیزر منجر به تغییرات دمای بالا می شود که بر خواص مواد تأثیر می گذارد؛ بنابراین، از خواص وابسته به دما در شبیه سازی ها استفاده شد. خواص فیزیکی و مکانیکی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین از شرایط مرزی مکانیکی برای محدود کردن جابه جایی ورق در طول فرایند شبیه سازی استفاده شده است. به این منظور، دو نوع گیره بندی یک سر گیردار و گیره بندی V شکل مرسوم است. در روش گیره بندی V شکل قطعه کار بر روی دو پایه ساده نگه داشته می شود. در روش گیره بندی یک سر گیردار، یک انتهای ورق توسط گیره بسته می شود و تمام شش درجه آزادی آن محدود می گردد. جابه جایی ورق به منظور ایجاد زاویه خم از انتهای آزاد ورق اتفاق می افتد. در این مطالعه در انجام آزمایش های تجربی و شبیه سازی عددی از شیوه گیره بندی یک سر گیردار به منظور مقید کردن حرکت ورق استفاده شده است.

برای مدل کردن منبع حرارت لیزر با توزیع حرارت گوسی شکل، لازم است منبع حرارتی به وسیله یک زیر برنامه DFLUX به زبان فرترن به نرم افزار آباکوس داده شود. زیر برنامه DFLUX به منظور تعریف شار حرارتی با توزیع غیریکنواخت و

جدول ۱ مشخصات ماده وابسته به دما برای AA 6061 T6 [22]

T (C)	Yield stress (MPa)	Young's modulus (GPa)	T (C)	Specific heat (J/Kg C)	Density (Kg/m ³)	T (C)	Conductivity (W/m C)
۲۰	۱۲۵	۷۰	۲۰	۸۹۸	۲۷۵۰	۲۰	۱۷۰
۱۰۰	۹۵	۷۰	۱۲۰	۹۵۱	۲۷۳۰	۵۸۵	۲۲۰
۲۰۰	۵۵	۶۱	۲۲۰	۱۰۰۳	۲۷۱۰	-	-
۳۰۰	۲۷	۵۵/۶	۳۲۰	۱۰۵۵	۲۶۹۰	-	-
۴۰۰	۱۵	۴۹/۳	۴۲۰	۱۱۰۸	۲۶۶۰	-	-
۵۰۰	۵	۴۱/۳	۵۸۷	۱۱۹۵	۲۶۳۰	-	-
۶۰۰	۵	۵	۶۴۴	۱۲۰۰	۲۴۵۰	-	-

برای ساخت مدل‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از به‌کارگیری این روش، تعیین یک رابطه بین پاسخ (Y) و تعدادی از متغیرهای قابل کنترل یا ورودی می‌باشد که با $X_1, X_2, \dots, X_K$ از ضریب تأثیر عوامل ورودی در خود آن عوامل تعریف می‌شود. این مدل در حالت کلی، طبق معادله (۴) تعریف می‌شود.

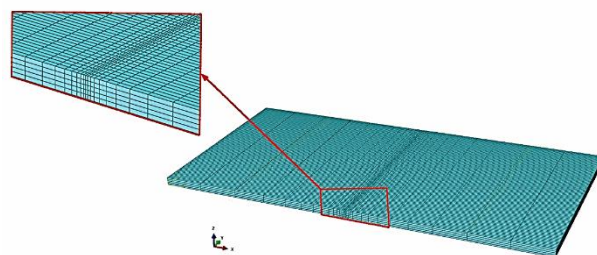
$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} X_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4)$$

در این معادله β_0 ضریب تأثیر عوامل ورودی، β_i عامل مؤثر بر پاسخ و k تعداد عوامل هستند. در مدل برازش از پارامترهایی استفاده می‌شود که دارای تأثیر معنی‌داری بر متغیر پاسخ باشند [23]. روش‌های سطح پاسخ (RSM) می‌توانند بسته به کاربردشان در طرح آزمایش به روش‌های متفاوتی از جمله طراحی باکس بنکن (BBD) و طراحی ترکیب مرکزی (CCD) تقسیم می‌شود. در این مقاله به منظور بهینه‌سازی و ارزیابی تأثیر پارامترها در فرایند خم کاری با لیزر از طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) استفاده شده است. همچنین در مطالعه حاضر از نرم‌افزار Design-Expert-11 برای طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) استفاده شده است. یکی از مزیت‌های این روش نسبت به روش طراحی باکس بنکن (BBD) این است که در RSM تمامی پارامترها در پنج سطح بررسی می‌شوند. این پنج سطح به صورت $(-1, -\alpha, 0, +1, +\alpha)$ کدگذاری می‌شوند [24]. به طور کلی تعداد نقاط طراحی به روش ترکیب مرکزی (CCD) با معادله (۳) تعیین می‌شود.

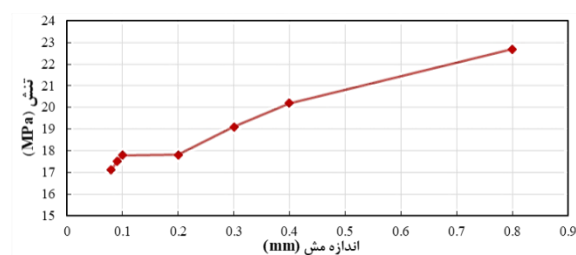
$$n = 2^k + k + n_0 \quad (3)$$

در این رابطه n_0 برابر با تعداد نقاط مرکزی می‌باشد. طراحی به شیوه ترکیب مرکزی از ترکیب یک طراحی مرتبه اول عاملی $2k$ به تعداد $2k$ از نقاط طراحی اضافی موسوم به نقاط محوری و n_0 نقاط مرکزی به دست می‌آید. با تعریف هشت پارامتر و تعیین پنج سطح برای هر عامل تعداد آزمایش‌ها به منظور بهینه‌سازی به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) برابر ۲۸۲ آزمایش خواهد بود. در مقاله حاضر کلیه ۲۸۲ آزمایش به منظور بهینه‌سازی زاویه خم، شبیه‌سازی شد. جدول (۲) پارامترهای انتخاب شده و مقادیر مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد. همان طوری که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، زمان استپ به عنوان

برای به دست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی، از همگرایی تنش در راستای عبور پرتو لیزر استفاده شده است. از این رو، برای به دست آوردن ابعاد و تعداد بهینه المان، مدل‌هایی با اندازه دانه‌بندی مختلف، شبیه‌سازی شد. اندازه شبکه به صورت مرحله‌ای کاهش یافت تا نتایج مورد نظر همگرا گردد. با توجه به نتایج به دست آمده، با کاهش اندازه از 0.4 به 0.2 mm تغییر محسوسی در توزیع تنش معادل به وجود می‌آید، در حالی که اختلاف توزیع تنش با تغییر اندازه شبکه از 0.1 به 0.2 mm کمتر از 0.2 درصد است. این در حالی است که زمان اجرای شبیه‌سازی با المان 0.1 mm، بیش از دو برابر زمان اجرای شبیه‌سازی با المانی به ابعاد 0.2 است؛ بنابراین اندازه المان 0.2 mm به عنوان اندازه مناسب برای شبیه‌سازی استفاده شد (شکل ۵). تعداد کل المان استفاده شده برای مدل ۱۱۵۰۰ می‌باشد.



شکل ۴ شبکه‌بندی مدل سه بعدی



شکل ۵ اندازه شبکه به دست آمده برای المان

بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ

مدل‌سازی رفتاری فرایند روشی است که می‌تواند با حذف آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه، دقت قابل قبولی را ارائه دهد. یکی از متداول‌ترین روش‌های مدل‌سازی رفتاری، روش سطح پاسخ (RSM) است. روش سطح پاسخ (RSM) شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیاتی کاربردی است که

نتایج و بحث

نتایج تجربی

به منظور بررسی قابلیت تکرارپذیری فرایند خم کاری با لیزر، برای هر مقدار توان لیزر، دو نمونه AA 6061 به ضخامت ۲mm تحت آزمایش قرار گرفت و بعد از خم کاری، مقدار زاویه خم برای هر نمونه اندازه گیری شد. مقادیر پارامترها به همراه زاویه خم به دست آمده، در جدول (۳) آورده شده است. مقدار پارامترهای طول، عرض، ضخامت و زمان استپ در آزمایش های تجربی، ثابت در نظر گرفته شد. هدف از تغییر سایر پارامترها مانند توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد اسکن ایجاد شرایط متفاوتی برای آزمایش تجربی بود تا تکرارپذیری فرایند در آزمایش های تجربی در شرایط مختلف بررسی شود. همان طوری که ملاحظه می شود، در یک توان معین، مقدار زاویه خم هر دو نمونه با خطای بسیار کمی مشابه یکدیگرند. بیشترین و کمترین درصد خطا برای تکرارپذیری فرایند، به ترتیب برابر با ۲ و ۰/۳ درصد است که به ترتیب متعلق به توان های ۲۲۰ و ۲۷۰W می باشد. نمونه ای از ورق های خم کاری شده با اشعه لیزر به همراه مقدار هر پارامتر برای انجام آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است. بدین ترتیب، این نتیجه حاصل شد که خم کاری ورق AA 6061 با فرایند خم کاری با لیزر دارای تکرارپذیری مناسب می باشد.

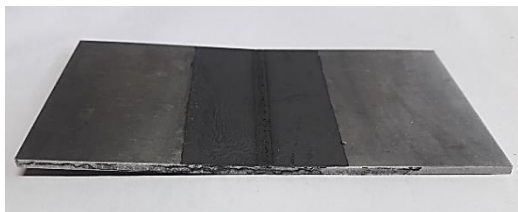
یک پارامتر مستقل در نظر گرفته شد. زمان استپ، مقدار زمانی است که اشعه لیزر از لبه ورق به عنوان نقطه شروع، عرض ورق را طی می کند و مجدد به نقطه اولیه برمی گردد تا پاس بعدی را شروع کند. از آنجایی که فرایند خم کاری با لیزر یک فرایند چند پاسه است، بنابراین فاصله زمانی بین دو پاس متوالی می تواند مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

جدول ۲ پارامترهای مورد بررسی و سطوح متناظر آنها

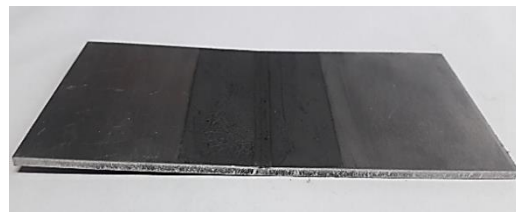
فاکتورها	واحد	علامت	سطح ها				
			-α	-1	0	+1	+α
توان	W	P	۳۷۵	۴۰۰	۴۲۵	۴۵۰	۴۷۵
قطر پرتو لیزر	mm	D	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵
سرعت اسکن	mm/s	V	۱۴	۱۸	۲۲	۲۶	۳۰
زمان استپ	s	t	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
تعداد اسکن	-	n	۳	۵	۷	۹	۱۱
طول ورق	mm	L	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۳۰
عرض ورق	mm	W	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
ضخامت ورق	mm	S	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴

جدول ۳ پارامترهای مورد بررسی و مقادیر آن برای آزمایش های تجربی

توان، P (W)	سرعت اسکن، V (mm/s)	قطر پرتو لیزر، D (mm)	تعداد اسکن، n	زاویه خم نمونه ۱ (درجه)	زاویه خم نمونه ۲ (درجه)	میزان خطا (%)
۲۲۰	۱۰	۳	۷	۰/۶۳۶	۰/۶۴۹	۲
۲۴۰	۱۵	۳	۱۰	۰/۷۸۴	۰/۷۸۹	۰/۶
۲۷۰	۱۰	۳	۸	۱/۱۷۱	۱/۱۶۸	۰/۳
۳۳۰	۱۵	۳	۸	۱/۲۹۶	۱/۲۳۸	۱



(ب)



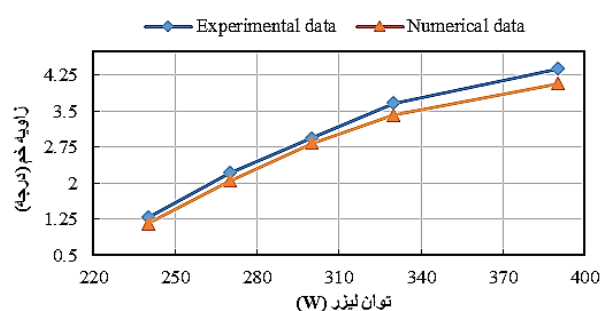
(الف)

شکل ۶ قطعات خم کاری شده در آزمایش های تجربی با شرایط تنظیمی: $W=240$, $P=10$ mm, $n=2$ mm/s, $S=15$ mm, $V=3$ D=

(الف) نمونه ۱، (ب) نمونه ۲

صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی فرایند

در این مقاله از مقایسه نتایج آزمایش تجربی برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. به این منظور، آزمایش تجربی برای پنج مقدار توان ۲۴۰، ۲۷۰، ۳۰۰، ۳۳۰ و ۳۹۰ وات انجام شد، در حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین زاویه خم به دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده و آزمایش‌های تجربی وجود دارد.



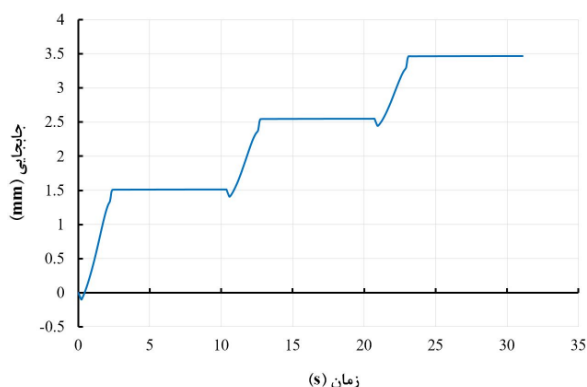
شکل ۷ مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی با شرایط:

$$D=3\text{mm}, V=18\text{mm/s}, S=2\text{mm}, n=9$$

نتایج شبیه‌سازی عددی

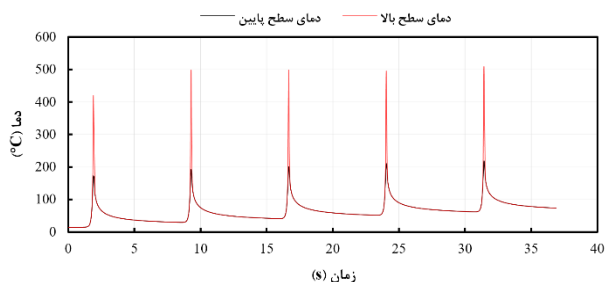
نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی که نحوه جابه‌جایی لبه آزاد ورق و همچنین تصویر توزیع دمای ورق در حین فرایند خم کاری با لیزر را نشان می‌دهد، به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است. در این شبیه‌سازی زمان کل فرایند ۷۰ ثانیه می‌باشد. شرایط تنظیم پارامترها برای نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده برابر با توان لیزر ۴۵۰W، قطر پرتوی لیزر ۲mm، سرعت اسکن ۱۸mm/s، ضخامت ورق ۲/۵mm و تعداد عبور پرتوی لیزر ۵ در نظر گرفته شده است. همان‌طوری که در شکل (۸) نشان داده شده است، با ادامه پیمایش پرتو لیزر بر روی سطح ورق، میزان زاویه خم افزایش می‌یابد. در انتهای فرایند، میزان جابه‌جایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از روابط مثلثاتی به زاویه خم تبدیل می‌شود. زاویه خم به دست آمده در شبیه‌سازی شکل زیر برابر با ۲/۳۳۴ درجه می‌باشد.

یکی از نکات مهم در خم کاری با پرتو لیزر و استفاده از سازوکار گرادیان دمایی، وقوع یک خم منفی در ابتدای فرایند

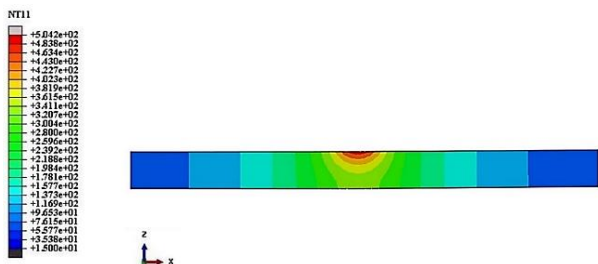


شکل ۱۰ نمودار زمان - جابه‌جایی به دست آمده از شبیه‌سازی

در شکل (۱۱) نمودار دما نسبت به زمان نشان داده شده است. این نمودار اختلاف دما بین سطوح بالا و پایین ورق را که از شبیه‌سازی به دست آمده، نشان می‌دهد. اختلاف دمای ایجاد شده عامل ایجاد سازوکار گرادیان دمایی است. بیشترین مقدار دمای ایجاد شده در این آزمایش بر روی سطح بالای ورق 504°C و بیشترین اختلاف دما در زمان $9/292$ ثانیه رخ می‌دهد، زمانی که پرتو لیزر در مرحله دوم از مرکز صفحه عبور می‌کند. حداکثر اختلاف دما بین سطوح بالایی و پایینی ورق 350°C است. شکل (۱۲) گرادیان دمایی ایجاد شده در راستای ضخامت ورق را نشان می‌دهد.



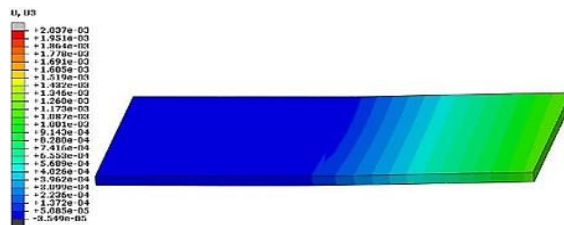
شکل ۱۱ نمودار دما- زمان در مرکز صفحه به دست آمده از شبیه‌سازی با شرایط تنظیمی: $D=3\text{mm}$, $P=400\text{W}$, $V=18\text{mm/s}$, $S=2\text{mm}$, $n=5$



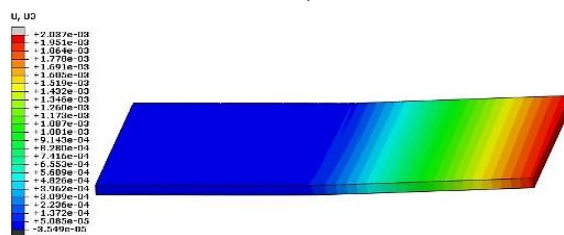
شکل ۱۲ کانتور توزیع دما در امتداد ضخامت ورق



(الف)



(ب)



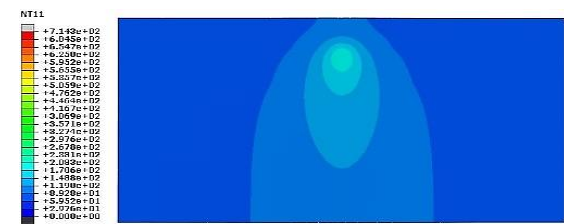
(ج)

شکل ۸ کانتور جابه‌جایی ورق آلومینیوم در حین فرایند

(الف) $3/490$ ثانیه، (ب) $35/017$ ثانیه، (ج) 70 ثانیه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹ کانتور توزیع دمایی ورق آلومینیوم در حین فرایند

(الف) $1/662$ ثانیه، (ب) $30/056$ ثانیه، (ج) $58/039$ ثانیه

نتایج حاصل از طراحی ترکیب مرکزی (CCD)

در این بخش تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه و همچنین مقادیر بهینه به دست آمده در فرایند خم کاری با لیزر، به طور مجزا و کامل توضیح داده شده است.

مرحله بعد از آماده‌سازی داده‌های آزمایش، برازش منحنی برای پاسخ‌های غیر خطی است که معمولاً از طریق رگرسیون انجام می‌شود. بهترین مدل برازش مربوط به چندجمله‌ای با بیشترین درجه و بیشترین مقدار برای F-value می‌باشد. مقدار F-value در مدل استفاده شده برابر با ۲۲۴/۹۱ می‌باشد که نشان دهنده معنی‌دار بودن مدل است. همچنین پارامترهای آماری مانند p-value و مقادیر R^2 برای مقایسه و انتخاب مدل‌ها استفاده می‌شوند. مقدار سطح اطمینان در مطالعه حاضر برابر با ۹۵ درصد انتخاب شده است. این بدان معنی است که مقادیر p-value کوچک‌تر از ۵ درصد نشان دهنده معنی‌دار بودن مدل است. با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار p-value برای مدل انتخاب شده کوچک‌تر از ۰/۰۰۰۱ می‌باشد. همچنین مدل انتخابی باید واجد این شرایط باشد که اختلاف بین دو مقدار Predicted R^2 و Adjusted R^2 کمتر از ۰/۲ باشد که مقدار به دست آمده در این مطالعه برابر ۰/۰۱ می‌باشد. با توجه به نکات ذکر شده، مدل درجه دوم به عنوان مدل پیشنهادی ارائه شده است. مدل پیشنهادی به همراه مقادیر R^2 ، Predicted R^2 و Adjusted R^2 در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴ مدل پیشنهادی بر اساس نتایج به دست آمده

Source	Std. Dev.	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2
Linear	۰/۴۸۱۳	۰/۸۲۳۹	۰/۸۱۸۷	۰/۸۱۱۷
Quadratic	۰/۸۱۸۲	۰/۹۷۶۶	۰/۹۷۲۳	۰/۹۶۶۵
2FI	۰/۲۲۰۳	۰/۹۶۶۹	۰/۹۶۲۰	۰/۹۵۸۲

مدل رگرسیون برای پیش‌بینی تابع هدف، یعنی زاویه خم استفاده می‌شود. مقدار R^2 کیفیت برازش داده‌های واقعی را با مدل مشخص می‌کند و بهترین مقدار آن $R^2 = ۱$ می‌باشد؛ به عبارت دیگر، مقدار R^2 بیانگر مقدار تشابه مقادیر واقعی با مقادیر به دست آمده توسط مدل است و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد که توافق خوبی بین مقادیر واقعی و مقادیر به دست آمده از مدل وجود دارد. با توجه به جدول

(۴) مشاهده می‌شود که مقادیر R^2 و Adjusted R^2 نزدیک به ۱ (۱۰۰٪) است که نشان می‌دهد مدل به دست آمده از تحلیل می‌تواند پاسخ را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. در تحقیق حاضر مقدار R^2 برابر ۰/۹۷۶۶ می‌باشد، به این معنی که مدل حاضر می‌تواند زاویه خم را با دقت ۹۷٪ پیش‌بینی کند. علاوه بر این، Adeq Precision نسبت سیگنال به نویز (S/N) را اندازه‌گیری می‌کند که در این مقاله مقدار آن ۶۸/۴۶۸۲ برای مدل به دست آمده. به طور کلی نسبت بزرگ‌تر از ۴ مطلوب است. بر این اساس نسبت به دست آمده در این مطالعه می‌تواند به‌عنوان نسبت مناسب تلقی شود. معادله رگرسیون حاوی پارامتر مؤثر برای پیش‌بینی زاویه خم می‌باشد که با معادله (۵) بیان می‌شود. این فرمول از پارامترهایی تشکیل شده است که مقدار p-value متناظر آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ است (جدول ۵)؛ به عبارت دیگر، این فرمول شامل پارامترهایی است که در جدول ANOVA به‌عنوان پارامترهای مؤثر معرفی شده‌اند.

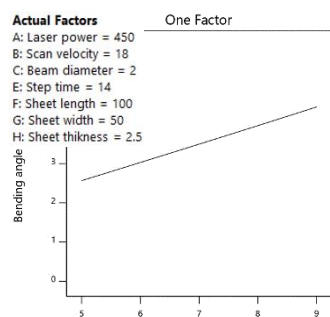
$$\begin{aligned} a_b = & 0.9172 - 0.2932A - 0.3626B - 0.2798C + 0.3986D - \\ & 0.0205E - 0.0669F + 0.1066G - 0.8059H - 0.0554AB - \\ & 0.0404AC + 0.0903AD + 0.0322AG - 0.1432AH - \\ & 0.1222BD + 0.2146BH - 0.0249CD + 0.1286CH + \\ & 0.0418DG - 0.267DH + 0.0496FH - 0.0381GH + 0.0711B^2 \\ & + 0.27H^2 \end{aligned} \quad (5)$$

تأثیر پارامترهای فرایند

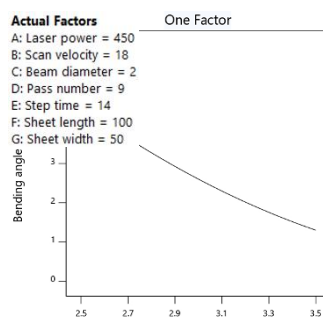
تأثیر پارامترهای مورد بررسی در این مقاله در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این در حالی است که برای بررسی اثر تغییر هر پارامتر بر زاویه خم، سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۳-الف) بیانگر تأثیر ضخامت ورق بر زاویه خم است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر اساس طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD)، می‌توان گفت که با افزایش ضخامت از ۲/۵mm به ۳/۵mm، زاویه خم از ۱/۷ به ۰/۳۷۹ درجه کاهش پیدا کرده است؛ یعنی به ازای افزایش ۱mm ضخامت ورق در دو آزمایش با ترکیب پارامترهای مشخص بر اساس طراحی آزمایش انجام شده در این تحقیق، زاویه خم حدود ۷۷٪ کاهش یافت. دلیل این کاهش عدم خم منفی اولیه قابل توجه در ابتدای فرایند در لایه‌های پایینی ورق است. مقدار تنش حرارتی ایجاد شده در لایه‌های زیرین ورق توسط پرتوهای لیزر به تنش جریان ماده نمی‌رسد؛ بنابراین،

تعداد اسکن پرتو لیزر در شکل (۱۳-ب) نشان داده شده است. به طور کلی می توان گفت که با افزایش تعداد اسکن پرتو لیزر، مقدار زاویه خم افزایش می یابد.

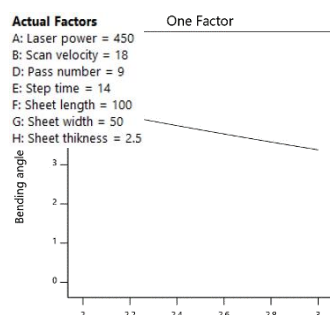
لایه های زیرین از خم شدن ورق جلوگیری می کنند. همچنین با افزایش ضخامت ورق، مدول خمشی مورد نیاز برای خم شدن ورق افزایش می یابد که خم کردن ورق را دشوارتر می کند. تأثیر



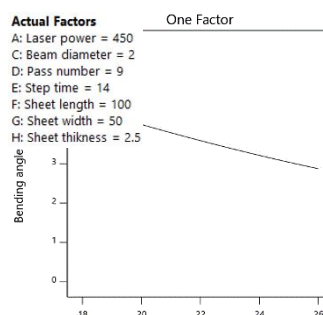
D: Pass number
(ب)



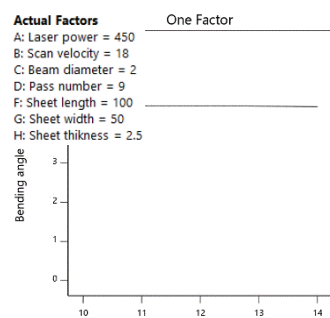
H: Sheet thickness (mm)
(الف)



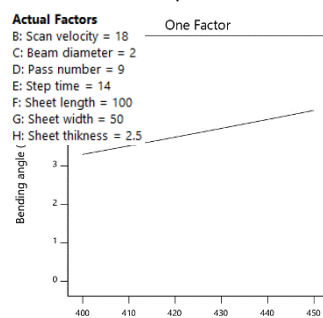
C: Beam diameter (mm)
(ت)



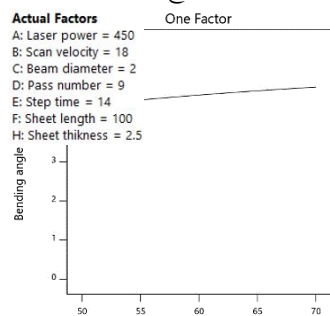
B: Scan velocity (mm/s)
(پ)



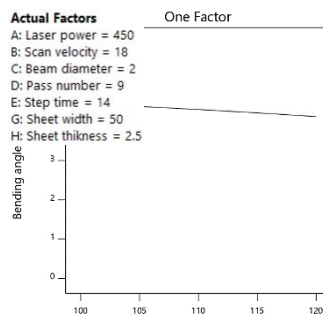
E: Step time (s)
(ج)



A: Laser power (W)
(ث)



G: Sheet width (mm)
(ذ)



F: Sheet length (mm)
(د)

شکل ۱۳ تأثیر پارامترهای بررسی شده بر زاویه خم

پالس نیز افزایش خواهد یافت؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش توان لیزر به معنای افزایش انرژی حرارتی به سطح ورق و به تبع آن، افزایش شیب حرارتی در راستای ضخامت ورق می‌باشد. در نتیجه زاویه خم افزایش خواهد یافت. همان طوری که در شکل‌های (۱۳ ج تا ذ) مشاهده می‌شود شیب نمودار برای سه پارامتر زمان استپ، طول ورق و عرض ورق کمترین مقدار را در مقایسه سایر پارامترها دارند. علاوه بر این با مشاهده مقادیر F-value برای این سه پارامتر که نشان دهنده میزان و نوع اثرگذاری هر پارامتر بر زاویه خم است و با مقایسه آن با سایر پارامترها مشاهده می‌شود که مقادیر F-value مربوط به این سه پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر ناچیز است؛ بنابراین پارامترهای زمان استپ، طول ورق و عرض ورق، تأثیر زیادی روی زاویه خم ندارند به طوری که می‌توان اثر این سه پارامتر را در این فرایند بر روی زاویه خم نادیده گرفت.

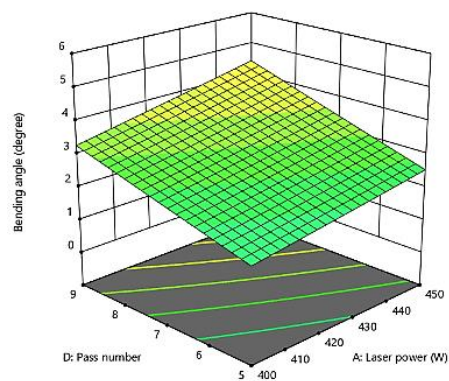
نمودارهای سطح سه‌بعدی بر اساس معادله (۵) هستند و می‌توانند برای درک شهودی پاسخ در حالتی استفاده شوند که ترکیبات مختلفی از پارامترهای ورودی وجود دارد. شکل (۱۴) نمودارهای سطح سه‌بعدی مربوط به زاویه خم را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار قطر پرتو و پارامترهای سرعت اسکن، زاویه خمش کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش توان لیزر و تعداد اسکن منجر به افزایش زاویه خم می‌شود. بدیهی است که افزایش ضخامت ورق منجر به کاهش قابل توجه زاویه خم می‌شود.

نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۳) برای نتیجه‌گیری قطعی استفاده نمی‌شوند. به‌منظور تأیید اثرات نشان داده شده برای پارامترها، از تحلیل واریانس استفاده می‌شود. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع خطا، ثابت بودن واریانس و استقلال آن انجام می‌شود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده تحلیل آماری ANOVA برای این مطالعه در جدول (۵) نشان داده شده است. در این جدول، مؤثر بودن یا نبودن پارامترها و همچنین میزان تأثیر هر یک از پارامتر بررسی شده در فرایند، بیان شده است. نرمال بودن توزیع خطا توسط نمودار احتمال نرمال به مقادیر باقی مانده بررسی می‌شوند. نمودار احتمال نرمال به مقادیر باقی مانده برای نتایج حاصل از نتایج انجام شده در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به روند توزیع نقاط در اطراف خط مورب می‌توان گفت که مقادیر باقی مانده از توزیع نرمال برخوردار است.

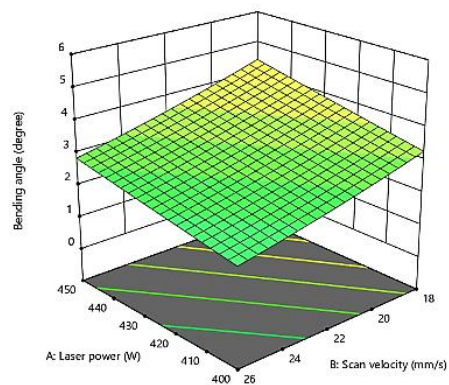
به طوری که با افزایش تعداد اسکن از ۵ به ۹، در حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند، زاویه خم ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. افزایش تعداد اسکن به معنای تکرار تابش پرتو لیزر است که زاویه خم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج به دست آمده نشان داد که میزان افزایش زاویه خم در هر مرحله نسبت به مرحله قبل اندکی کاهش می‌یابد. تأثیر سرعت اسکن بر زاویه خم در شکل (۱۳- پ) نشان داده شده است. همان طوری که در شکل نشان داده شده است، با افزایش سرعت اسکن، مقدار زاویه خم کم خواهد شد. دلیل آن این است که با افزایش سرعت اسکن، مقدار انرژی حرارتی اعمال شده بر روی سطح ورق در راستای مسیر اسکن، کاهش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه داشت که در ورق از جنس آلومینیوم به دلیل داشتن ضریب انتقال حرارت بالا، با کاهش بسیار زیاد سرعت اسکن، مقدار زاویه خم کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان کرد که اگر مقدار سرعت اسکن کم باشد، دما در سطح بالای ورق افزایش می‌یابد و به دلیل ضریب انتقال حرارت بالای ورق آلومینیوم، دما به سرعت از سطح بالای به سطح پایین ورق انتقال پیدا می‌کند. در نتیجه شیب حرارتی مورد نیاز در راستای ضخامت ورق که برای ایجاد خم ضروری است، کاهش می‌یابد و به تبع آن زاویه خم هم کاهش خواهد یافت. شکل (۱۳- ت) اثر قطر پرتو لیزر بر روی زاویه خم را نشان می‌دهد. با افزایش قطر پرتو لیزر با فرض ثابت ماندن توان، انرژی حرارتی لیزر در سطح بزرگ‌تری توزیع می‌شود. در نتیجه، تأثیر قطر پرتو لیزر در تشکیل گرادیان حرارتی که عامل اصلی شکل‌دهی است، کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، با بزرگ‌تر شدن قطر پرتو شدت انرژی وارد بر واحد سطح ورق کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار زاویه خم نیز کمتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که توان لیزر رابطه مستقیمی با زاویه خم در این فرایند دارد، یعنی با افزایش توان لیزر بر میزان زاویه خم افزوده می‌شود (شکل ۱۳- ث). همان طوری که در بخش گذشته بیان شد، لیزر استفاده شده در این مطالعه از نوع پالسی است. در لیزرهای پالسی مقدار انرژی برای هر پالس از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$P_e = P \times P_w \quad (6)$$

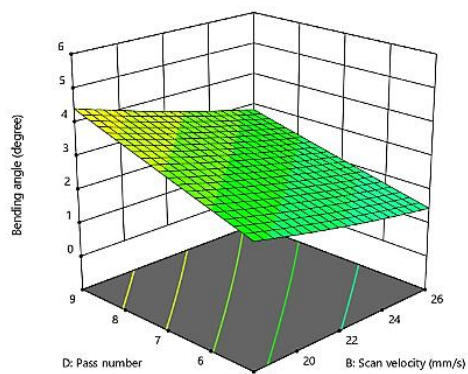
در این رابطه، P_e انرژی هر پالس، P توان و P_w عرض پالس می‌باشد. با توجه به رابطه بالا با فرض ثابت بودن مقدار عرض پالس، اگر مقدار توان افزایش یابد مقدار انرژی به ازای هر



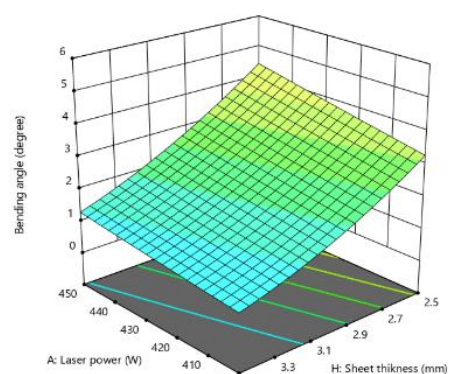
(ب)



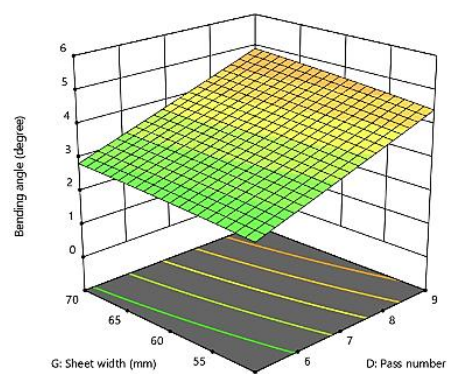
(الف)



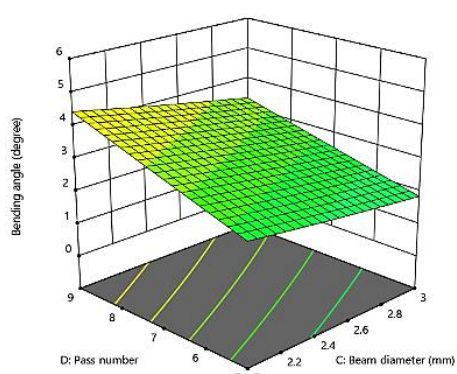
(ت)



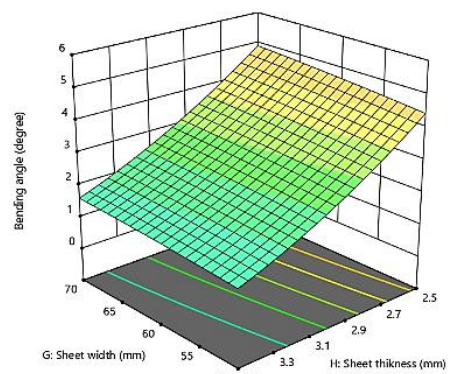
(پ)



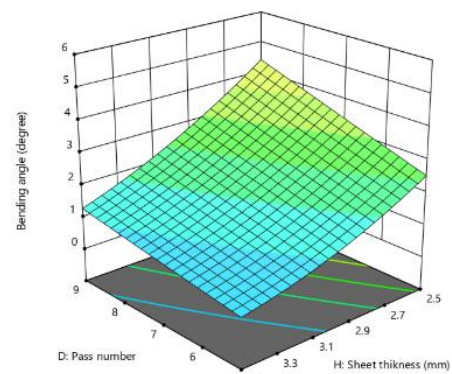
(ج)



(ث)



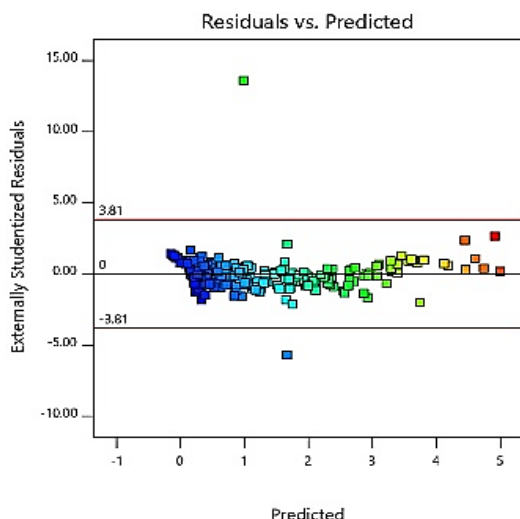
(ذ)



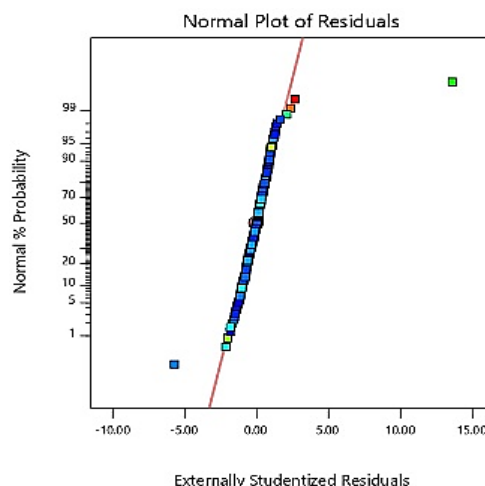
(د)

شکل ۱۴ نمودارهای سطح سه بعدی برای زاویه خم

محاسبه F-value استفاده شده است. مقدار F-value میزان اثرگذاری هر پارامتر را در فرایند بیان می‌کند. به طور کلی هر چه این مقدار برای هر پارامتر بیشتر باشد تأثیر آن پارامتر در فرایند بیشتر خواهد بود. با توجه به مقدار F-value در جدول (۵)، پارامترهای ضخامت ورق، تعداد اسکن پرتو، سرعت اسکن، توان لیزر، قطر پرتو لیزر، عرض ورق، طول ورق و زمان هر استپ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زاویه خم دارند.



شکل ۱۶ نمودار مقادیر باقی مانده در برابر مقادیر برازش شده



شکل ۱۵ نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی مانده

در روش دیگر، مدل ارائه شده توسط نمودار مقادیر باقی مانده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده بررسی می‌شود. نمودار فوق در شکل (۱۶) نشان داده شده است. عدم وجود یک روند مشخص در توزیع نقاط در این نمودار نشان دهنده ثابت بودن واریانس است [25]. این دو شکل صحت فرض‌های تحلیل واریانس را تأیید می‌کند.

در جدول (۴) از Sum of squares و Mean square برای

جدول ۵ تحلیل واریانس برای پارامترها

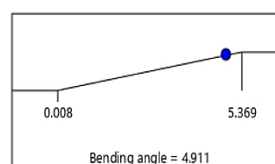
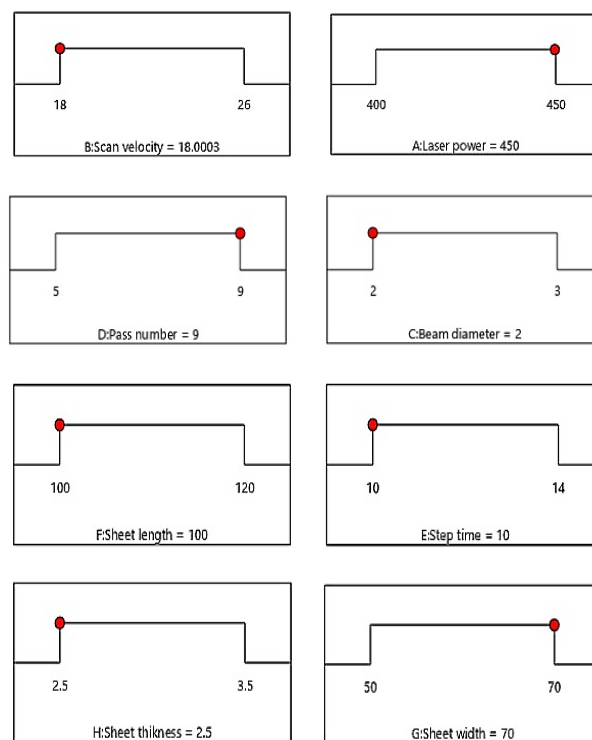
Source	Sum of squares	Mean square	F Value-	P -value
Model	۳۵۰/۶۱	۷/۹۷	۲۲۴/۹۱	<۰/۰۰۰۱
A-Laser power	۲۲/۶۹	۲۲/۶۹	۶۴۰/۵۲	<۰/۰۰۰۱
B-Scan velocity	۳۴/۷۲	۳۴/۷۲	۹۷۹/۹۰	<۰/۰۰۰۱
C-Beam diameter	۲۰/۶۷	۲۰/۶۷	۵۸۳/۴۶	<۰/۰۰۰۱
D-Pass number	۴۱/۹۵	۴۱/۹۵	۱۱۸۴/۲۰	<۰/۰۰۰۱
E-Step time	۰/۱۱۰۸	۰/۱۱۰۸	۳/۱۳	۰/۰۷۸۲
F-Sheet length	۱/۱۸	۱/۱۸	۳۳/۳۵	<۰/۰۰۰۱
G-Sheet width	۳	۳	۸۴/۷۴	<۰/۰۰۰۱
H-Sheet thickness	۱۷۱/۴۵	۱۷۱/۴۵	۴۸۳۹/۲۱	<۰/۰۰۰۱
AB	۰/۷۸۴۹	۰/۷۸۴۹	۲۲/۱۵	<۰/۰۰۰۱
AC	۰/۴۱۷۷	۰/۴۱۷۷	۱۱/۷۹	۰/۰۰۰۷
AD	۲/۰۹	۲/۰۹	۵۸/۹۶	<۰/۰۰۰۱
AE	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۱۴	۰/۳۲۰۵	۰/۵۷۱۸
AF	۰/۰۳۶۸	۰/۰۳۶۸	۱/۰۴	۰/۳۰۹۲
AG	۰/۲۶۴۹	۰/۲۶۴۹	۷/۴۸	۰/۰۰۶۷

ادامه جدول ۵ تحلیل واریانس برای پارامترها

AH	۵/۲۵	۵/۲۵	۱۴۸/۲۴	<۰/۰۰۰۱
BC	۰/۰۸۲۳	۰/۰۸۲۳	۲/۳۲	۰/۱۲۸۹
BD	۳/۸۲	۳/۸۲	۱۰۷/۸۹	<۰/۰۰۰۱
BE	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۵۵۱	۰/۸۱۴۶
BF	۰/۱۲۴۷	۰/۱۲۴۷	۳/۵۲	۰/۰۶۱۸
BG	۰/۰۳۹۶	۰/۰۳۹۶	۱/۱۲	۰/۲۹۱۶
BH	۱۱/۷۹	۱۱/۷۹	۳۳۲/۷۴	<۰/۰۰۰۱
CD	۲/۳۰	۲/۳۰	۶۵/۰۱	<۰/۰۰۰۱
CE	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱	۰/۳۱۲۳	۰/۵۷۶۸
CF	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۳۱	۰/۰۸۸۷	۰/۷۶۶۱
CG	۰/۱۷۰۶	۰/۱۷۰۶	۴/۸۲	۰/۰۲۹۲
CH	۴/۲۳	۴/۲۳	۱۱۹/۴۹	<۰/۰۰۰۱
DE	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۹	۰/۳۶۴۸	۰/۵۴۶۴
DF	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳	۱/۶۷	۰/۱۹۶۹
DG	۰/۴۴۷۰	۰/۴۴۷۰	۱۲/۶۲	۰/۰۰۰۵
DH	۱۸/۲۵	۱۸/۲۵	۵۱۵/۲۵	<۰/۰۰۰۱
EF	۰/۰۳۵۳	۰/۰۳۵۳	۰/۹۹۶۹	۰/۳۱۹۱
EG	۰/۰۸۲۳	۰/۰۸۲۳	۲/۳۲	۰/۱۲۸۹
EH	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱۰۴	۰/۹۱۸۹
FG	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۵۶	۰/۱۵۹۰	۰/۶۹۰۴
FH	۰/۶۲۹۵	۰/۶۲۹۵	۱۷/۷۷	<۰/۰۰۰۱
GH	۰/۳۷۱۱	۰/۳۷۱۱	۱۰/۴۷	۰/۰۰۱۴
A ²	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۷۶۰۲	۰/۰۹۳۳
B ²	۰/۱۷۷۰	۰/۱۷۷۰	۰/۰۲۶۴	۵/۰۰
C ²	۰/۰۱۹۱	۰/۰۱۹۱	۰/۴۶۳۸	۰/۵۳۸۶
D ²	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۸	۰/۷۷۸۲	۰/۰۷۹۵
E ²	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۲۹	۰/۷۷۳۷	۰/۰۸۲۹
F ²	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۰۸	۰/۵۸۲۱	۰/۳۰۳۸
G ²	۰/۰۳۴۳	۰/۰۳۴۳	۰/۳۲۶۴	۰/۹۶۷۱
H ²	۲/۵۵	۲/۵۵	۷۲/۰۳	<۰/۰۰۰۱
Residual	۸/۴۰	۰/۰۳۵۴	—	—
Lack of Fit	۸/۴۰	۰/۰۳۶۸	—	—
Pure Error	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱۸	—	—
Adeq Precision	۶۸/۴۶۸۲	—	—	—
Cor Total	۳۵۹/۰۱	—	—	—

بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی با لیزر

هدف از بهینه‌سازی در این مقاله، رسیدن به بیشترین مقدار برای زاویه خم است. با در نظر گرفتن حدود مشخص شده برای پارامترهای فرایند که در جدول (۲) ذکر شد، مقدار بهینه برای دستیابی به حداکثر مقدار زاویه خم برای هر پارامتر در شکل (۱۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷، حداکثر زاویه خم زمانی به دست می‌آید که پارامترهای توان لیزر (۴۵۰W)، تعداد اسکن (۹) و عرض ورق (۷۰mm) در سطح بالا و سرعت اسکن (۱۸mm/s)، قطر پرتو لیزر (۲mm)، طول ورق (۱۰۰mm)، زمان استپ (۱۰s) و ضخامت ورق (۲/۵mm) در سطح پایین قرار داشته باشند. همچنین، در شکل ۱۷ کمترین (۰/۸/۰°) و بیشترین (۳۶۹/۵°) مقدار واقعی برای زاویه خم را نشان می‌دهد. در حالی که حداکثر زاویه خم پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون با در نظر گرفتن مقادیر بهینه برای هر پارامتر، ۴/۹۱۱° می‌باشد.



شکل ۱۷ مقادیر بهینه برای هر پارامتر

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر پارامترهای موجود در فرایند خم کاری با پرتو لیزر در ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. همچنین، به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود و روش‌های آماری، پارامترهای مورد نظر جهت دستیابی به حداکثر زاویه خم بهینه شدند. پس از بررسی تمامی موارد ذکر شده در مورد بهینه‌سازی و تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر روی زاویه خم، نتایج زیر به دست آمد:

۱. در بین هشت پارامتر بررسی شده، پارامترهای ضخامت ورق، تعداد اسکن، سرعت اسکن، توان لیزر و قطر اشعه لیزر به‌عنوان پارامترهایی که به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زاویه خم داشتند، معرفی شده‌اند.
۲. زمان گام، طول و عرض ورق به عنوان پارامترهایی که به ترتیب کمترین تأثیر در فرایند را دارند شناخته شدند.
۳. اثر هشت پارامتر بر زاویه خم در فرایند خم کاری با پرتو لیزر بررسی گردید. نتایج بررسی‌های انجام شده به روش تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پارامترهای ضخامت ورق، قطر اشعه لیزر و سرعت اسکن پرتو لیزر، زمان استپ و طول ورق رابطه عکس با زاویه خم و پارامترهای توان لیزر، تعداد اسکن و عرض ورق رابطه مستقیم با زاویه خم در فرایند خم کاری با پرتو لیزر دارند.
۴. در نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مشاهده شده است که مقدار زاویه خم به ازای افزایش تعداد اسکن پرتو لیزر، افزایش می‌یابد اما مقدار افزایش زاویه در تعداد پاس‌های بالا به ازای هر پاس به مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند.
۵. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که حداکثر زاویه خم به دست آمده توسط مدل (۴/۹۱۱ درجه) زمانی به دست می‌آید که ضخامت ورق (۲/۵mm)، قطر پرتو لیزر (۲mm)، زمان استپ (۱۰s)، طول ورق (۱۰۰mm) و سرعت اسکن (۱۸mm/s) در سطح پایین باشند و تعداد اسکن (۹)، عرض ورق (۷۰mm) و توان لیزر (۴۵۰W) در سطح بالا قرار داشته باشند.

فهرست علائم

T	دما
I	شار حرارتی
I _m	شار حرارتی متوسط

واژه‌نامه	A	ضریب جذب سطح
Response Surface Methodology (RSM)	P	توان لیزر
Central Composite Design (CCD)	r	شعاع پرتو لیزر
طرحی ترکیب مرکزی	no	تعداد نقاط مرکزی
Box-Behnken Design (BBD)	K	تعداد فاکتور
طرحی باکس بنکن	D	قطر پرتو لیزر
Finite Element Method (FEM)	V	سرعت اسکن
محدود	t	زمان استپ
Taguchi Design	n	تعداد اسکن
طرحی تاگوچی	L	طول ورق
Analysis of variance (ANOVA)	W	عرض ورق
Thermal Conductivity	S	ضخامت ورق
Heat capacity	β_o	ضریب تأثیر پارامترها
Thermal expansion	β_i	پارامترهای مؤثر بر پاسخ
Young's modulus	Y	متغیر پاسخ
مدول یانگ	α_b	زاویه خم
تنش تسلیم	P_e	انرژی هر پالس
تقدیر و تشکر	P_w	عرض پالس

مراجع

- [1] M. Geiger, F. Vollertsen, and G. Deinzer, "Flexible straightening of car body shells by laser forming", *SAE Technical Paper*, 1993. <https://doi.org/10.4271/930279>
- [2] Y. Shi, H. Shen, Z. Yao, and J. Hu, "Numerical investigation of straight-line laser forming under the temperature gradient mechanism", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 19, no. 2, pp. 144-150, 2006. [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(06\)60036-7](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(06)60036-7)
- [3] W. Shichun, and Z. Jinsong, "An experimental study of laser bending for sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, no. 2, pp. 160-163, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00860-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00860-8)
- [4] Z. Hu, R. Kovacevic, and M. Labudovic, "Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 13, pp. 1427-1439, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00075-5)
- [5] Y. Guan, H. Zhang, J. Liu, and S. Sun, "Laser micro-bending process based on the characteristic of the laser polarization", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 3, pp. 662-671, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.010>
- [6] M. Geiger, and F. Vollertsen, "The mechanisms of laser forming", *CIRP Annals*, vol. 42, no. 1, pp. 301-304, 1993. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62448-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62448-2)
- [7] Y. Namba, "Laser forming in space", in: *Proceedings of the International Conference on Lasers' 85*, Las Vegas,

- NV; 2-6 Dec, pp. 403-407, 1986.
- [8] M. Riahi, M. Hoseinpour Gollo, and S. Nader Ameli Kalkhoran, "Experimental and numerical study of heat flux distribution in laser forming of bi-layer sheets", *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, vol. 4, no. 1, pp. 67-79, 2014. <https://doi.org/10.22061/jcarme.2014.73>
- [9] Y. Guan, S. Sun, G. Zhao, and Y. Luan, "Influence of material properties on the laser-forming process of sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, no. 1, pp. 124-131, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.003>
- [10] M. Safari, and H. Mostaan, "Experimental and numerical investigation of laser forming of cylindrical surfaces with arbitrary radius of curvature", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 1941-1949, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.033>
- [11] M. H. Gollo, S. M. Mahdavian, and H. M. Naeini, "Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd: YAG laser", *Optics & Laser Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 475-482, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.07.004>
- [12] S. Mulay, V. Paliwal, and N. R. Babu, "Analytical approach to predict the bend angle of sheet formed by multiple laser scans", *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 272-277, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.040>
- [13] R. Boonpuang, M. Mongkolwongroj, A. Sakulkalavek, and R. Sakdanuphab, "Empirical modeling and optimization of laser bending process parameters using the central composite design method for HDD slider PSA/RSA adjustment", *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, pp. 290-304, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40516-020-00122-2>
- [14] A. Behera, P. S. Sahu, and S. K. Patel, "Application of Taguchi methodology for optimization of process parameters in laser bending of Al sheet", *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 2323-2327, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.500>
- [15] K. Venkadeshwaran, S. Das, and D. Misra, "Bend angle prediction and parameter optimisation for laser bending of stainless steel using FEM and RSM", *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, vol. 5, no. 3-4, no. 3-4, pp. 308-321, 2021. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2012.048237>
- [16] E. G. Zahrani, and A. Marasi, "Modeling and optimization of laser bending parameters via response surface methodology", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 227, no. 7, pp. 1577-1584, 2013. <https://doi.org/10.1177/0954406212461119>
- [17] A. H. Roohi, H. Moslemi Naeini, and M. Hoseinpour Gollo, "An experimental investigation of parameters effect on laser forming of Al6061-T6 sheets", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 231, no. 5, pp. 433-442, 2015. <https://doi.org/10.1177/1464420715599181>
- [18] A. H. Roohia, H. Moslemi Naeini, M. Hoseinpour Gollo, J. Shahbazai Karimi, and Sh. Imani shahabad, "Effects of temperature gradient magnitude on bending angle in laser forming process of aluminium alloy sheets", *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, vol. 5, no. 2, pp. 97-109, 2016. <https://doi.org/10.22061/jcarme.2016.423>

- [19] S. E. Khandandel, S. M. H. Seyedkashi, and M. Moradi, "A novel path strategy design for precise 2D and 3D laser tube forming process; experimental and numerical investigation", *Optik*, vol. 206, pp. 164302, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164302>
- [20] S. E. Khandandel, S. M. H. Seyedkashi and M. Moradi, "Numerical and experimental analysis of the effect of forced cooling on laser tube forming", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 338, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03063-9>
- [21] M. A. Bhatti, "Fundamental finite element analysis and applications: with Mathematica and Matlab computations", 2005.
- [22] J. Zimmerman, W. Wlosinski, and Z. R. Lindemann, "Thermo-mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic-metal friction welding", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 4, pp. 1644-1653, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.012>
- [23] E. G. Zahrani, and A. Marasi, "Experimental investigation of edge effect and longitudinal distortion in laser bending process", *Optics & Laser Technology*, vol. 45, pp. 301-307, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.031>
- [24] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments," *John Wiley & Sons*, 2016.
- [25] D. C. Montgomery, "Design and analysis of experiments", *John Wiley & sons*, 2017.



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

Derivation of the Aerodynamic Characteristics of a Ribbon Parachute by Truck Tow Test

Research Article

Mohammad Reza Salimi¹, Amir Hamzeh Farajollahi², Amir Hosein Mohseni kafshgarkolaei³, Mahmood Ayoobi⁴

DOI: [10.22067/jacsm.2023.76405.1116](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.76405.1116)

1-Introduction

Since the beginning of the space age, parachute-based recovery systems have often been used to recover space cargo. In this case, two-stage parachute systems are usually used to recover a space cargo. Due to the high initial speed of the cargo when it enters the atmosphere, a high-speed parachute stage is used to reduce the speed of the cargo and make it stable. The so-called first-stage parachute is called a brake chute. Brake chutes are usually of balut, ribbon, and ring slot types, which are selected and designed according to the cargo speed, altitude, weight, and atmospheric conditions. Braking parachutes have more porosity than textile parachutes. The higher the porosity of a parachute, the lower the drag coefficient and opening force, but the higher its stability. This is the reason for using brake parachutes as the first stage of space cargo recovery. After reducing the speed of the cargo and stabilizing it with the braking parachute, the main textile parachutes are used as the second step of recovery and lead to a gentle landing of the cargo on the ground.

One of the methods of studying parachutes is to perform flight tests. In these tests, the cargo and parachute assembly are tested by a rocket or aircraft. Flight tests are the most accurate method of evaluating the performance of parachutes and are the most consistent with realistic conditions. However, these tests are expensive and cannot obtain all the required parameters, such as canopy pressure distribution. In addition to flight testing, other methods, including truck towing and wind tunnel testing are also common for evaluating parachute performance.

The truck towing test is performed by restrained movement (towing) of the parachute by a vehicle, such as an airplane, missile, truck, van, or boat. Truck towing test has some advantages, including relatively easy control of test conditions, accurate performance measurement, reusability of test vehicles, ease of repeated testing, and low cost. On the other hand, this method has some disadvantages, namely the impossibility of testing for high speeds, limitation in the distance of the parachute from the vehicle, measurement errors due to diverse factors (e.g.,

ground effects, the effects of vehicle wake region on parachute aerodynamics, change of wind direction).

In addition to the experimental methods, with the advancement of computational fluid dynamics (CFD) techniques and the increase in the processing power of computers, the use of this method in the design and performance evaluation of parachutes is constantly rising. Although the flexible fabric structure of parachutes makes it difficult to use CFD for performance evaluation, significant progress has been made in this regard. Therefore, today we see a wide range of numerical studies in the field of parachute aerodynamics.

In this research, a flat circular ribbon parachute was designed and constructed. The parachute model was created in CATIA software and after mesh generation by Pointwise software, it was numerically analyzed using Fluent software. In addition to the numerical simulations, the performance of the constructed parachute was evaluated by the truck tow test, which is one of the well-known tests for evaluating the performance of parachutes. Comparing the drag coefficient measured in the truck tow test with the numerical results shows the effectiveness of this method despite its very low costs compared to other parachute testing methods. Based on the searches by the researchers of the present study, no similar research has compared the results of the truck tow test with those of CFD on ribbon parachutes. Therefore, the current research can be considered innovative in this sense.

2-Numerical Simulations

The simulations were performed at seven speeds in the range of 10-120 m/sec. In this case, the flow regime according to the dimensionless Reynolds number ($Re = \rho u L / \mu$) and considering the inflated diameter of the parachute as a length scale is in the range of 1-106. Accordingly, the flow is considered to be incompressible and fully turbulent. Calculations were performed in three dimensions on a grid with about 2 million cells using the finite volume method. Figure 1 shows the designed

*Manuscript received: April 24, 2022. Revised, December 6, 2022, Accepted, August 26, 2023.

¹ Corresponding author: Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.

Email: mohammadsalimi@ari.ac.ir.

² Assistant Professor, Imam Ali University, Tehran, Iran.

³ Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.

⁴ Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.

parachute model. An image of the constructed parachute is also shown in Figure 2.

Figure 3 demonstrates the flow streamlines passing through and around a sector of a parachute at a speed of 120 m/sec. The color of streamlines is set based on the velocity magnitude. As can be seen, a large part of the flow passes through the openings of the parachute. The flow passing through these holes leads to the breaking of the vortices in the wake area and prevents the asymmetric vortex shedding in the wake region. This issue reduces the range of parachute fluctuations and is the main cause of the high stability of ribbon parachutes.

3-Experimental Measurements

Unlike the numerical simulations that were performed at seven speeds of 10, 20, 30, 40, 80, 100, and 120 m/s. Experimental measurements were performed only at two speeds of 20 and 30 m/s. The reason for this problem is the power limitation of the vehicle used to reach speeds greater than 30 m/s.

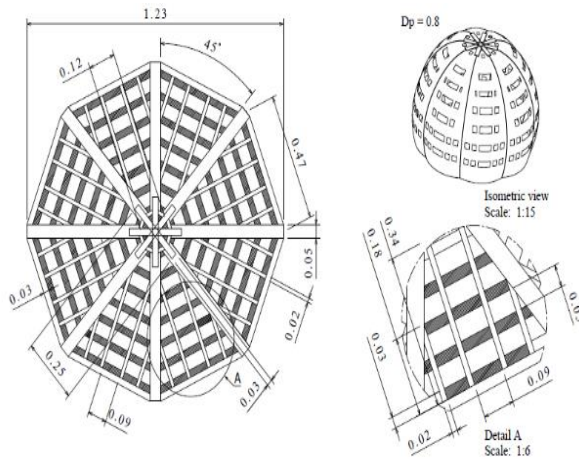


Fig. 1. Designed parachute model



Fig. 2. Constructed parachute

The process of inflating the parachute from the moment it is thrown out of the vehicle to the full opening stage is shown in Figure 4. The drag coefficient values calculated by numerical simulation and the values measured in the truck towing test are shown in Figure 5. As can be seen, the drag coefficient has almost a constant value in the investigated speed range.

This issue shows the lack of change in the flow structures in the examined speed range. As mentioned, due to the limitations in the speed of the vehicle, experimental measurements were performed only at two speeds of 20 and 30 m/s. The difference between numerical results and experimental data at these speeds

was approximately 10%. This difference can be attributed to numerical errors, such as discretization error, turbulence modeling, steady-state simulation, and grid quality. On the other hand, uncertainties related to experimental measurements, such as wind speed and direction, parachute oscillations, and vehicle wake affect parachute aerodynamics and results.

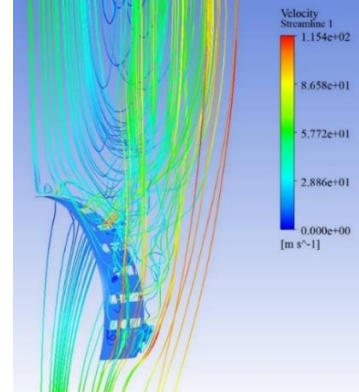


Fig. 3. Flow streamlines around a parachute sector

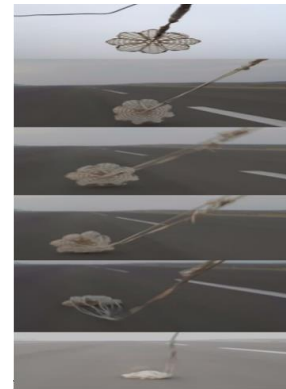


Fig. 4. Parachute inflation process

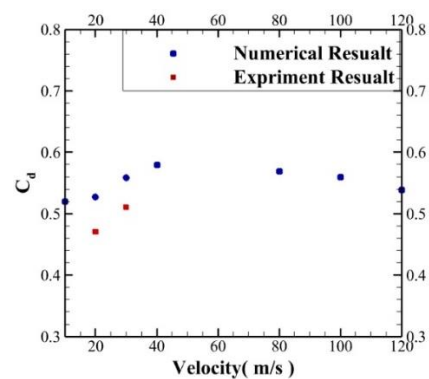


Fig. 5. Comparison between numerical and experimental result.

4- Conclusion

In this research, the performance of a flat circular ribbon parachute was evaluated using CFD and truck towing tests. The drag coefficient the most important aerodynamic coefficient of a parachute was measured and compared using both methods. The comparison of the results showed the appropriate accuracy of the truck towing test as a preliminary estimate of the aerodynamic characteristics of a parachute.



استخراج ویژگی‌های آیرودینامیکی چتر ریبونی توسط آزمون کشش خودرو*

مقاله پژوهشی

محمد رضا سلیمی^(۱) امیر حمزه فرج الهی^(۲) امیر حسین محسنی کفشگر کلانی^(۳) محمود ایوبی^(۴)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.76405.1116

چکیده چترهای ریبونی به عنوان کاهنده‌های سرعت و یا پایدارساز برای محموله‌های پرسرعت و هواپیماها استفاده می‌شوند. ضریب تخلخل بالا و شکل هندسی متفاوت آن‌ها به دلیل عملکرد این چترها در سرعت‌های بالا می‌باشد. در مقاله حاضر یک چتر ریبونی مسطح برای بازیابی یک محموله فضایی ۳۵۰ کیلوگرمی مشخص طراحی و بارهای آیرودینامیکی وارد بر آن محاسبه می‌شود. جنس چتر طراحی شده نایلون ۶۶ بوده و قطر پرباد شده آن ۱/۲ متر می‌باشد. در ابتدا به معرفی انواع روش‌های آزمون چتر پرداخته می‌شود. پس از طراحی اولیه چتر، مدل سه‌بعدی چتر استخراج و جریان پیرامون آن شبیه‌سازی می‌شود. در نهایت برای ارزیابی طراحی چتر و شبیه‌سازی‌های به عمل آمده، آزمون کشش چتر به وسیله خودرو انجام گرفته است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها و داده‌های تجربی حاصل از آزمون کشش خودرو مطابقت خوبی با یکدیگر دارند که نشان از کارایی آزمون کشش خودرو به عنوان یک روش کم هزینه برای اندازه‌گیری تقریبی ضریب پسا و پایداری چتر در سرعت‌های پایین دارد.

واژه‌های کلیدی طراحی چتر ترمزی، شبیه‌سازی چتر، بازیابی محموله فضایی، چتر ریبونی، آزمون کشش خودرو.

Derivation of Aerodynamic Characteristics of a Ribbon Parachute by Truck Tow Test

Mohammad Reza Salimi Amir Hamzeh Farajollahi Amir Hosein Mohseni kafshgarkolaei Mahmood Ayoobi

Abstract Ribbon parachutes are used for speed reduction and stabilization of high-speed payloads and aircraft. The high porosity and their different geometrical shape are due to the performance of these parachutes at high speeds. In this paper, a ribbon parachute for recovery of a 350 kg spatial consignment has been designed, and by means of a set of tools, the aerodynamic and structural loads are calculated. The canopy is made from nylon 66; its deployed diameter is equal to 1.2 m. First, the types of parachute test methods are introduced. After the initial parachute design, the output of the design is modeled and simulated. Finally, to evaluate the design brake parachute, the vehicle's parachute traction test was used for validation. Comparing the results of simulations and experimental data obtained from the truck tow test are in acceptable agreement with each other, which shows the effectiveness of the truck tow test as a low-cost method for approximate measurement of drag coefficient and parachute stability at low speeds.

Key Words Brake Parachute Design, Parachute Simulation, Space Payload Recovery, Ribbon Parachute, Truck Tow Test.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۲/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۶/۴ می‌باشد.

Email: mohammadsalimi@ari.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

(۲) استادیار، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

(۳) کارشناس پژوهشی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

(۴) کارشناس پژوهشی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

مقدمه

از آغاز عصر فضا تاکنون به منظور بازیابی محموله‌های فضایی اغلب از سامانه‌های بازیابی مبتنی بر چتر بهره برده شده است. در این حالت برای بازیابی یک محموله فضایی معمولاً از دو مرحله چتر استفاده می‌شود. با توجه به سرعت اولیه بالای محموله به هنگام ورود به جو از یک مرحله چتر برای کاهش سرعت محموله و ایجاد پایداری در آن استفاده می‌شود. اصطلاحاً به چتر مرحله اول، چتر ترمزی گفته می‌شود. چترهای ترمزی معمولاً از نوع، بالوت، ریبونی و رینگ اسلات می‌باشند که باتوجه به شرایط و ورودی‌های محموله انتخاب و طراحی می‌شوند. بقای محموله و به سلامت فرود آمدن آن به عملکرد مناسب چتر ترمزی وابسته است. از این رو طراحی و آزمون چتر ترمزی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. نتیجه طراحی، شبیه‌سازی‌ها و ساخت چتر در آزمون‌های مرتبط با عملکرد مجموعه پیش از استفاده بر روی محموله فضایی مشخص می‌شود و در صورت نیاز اصلاح یا تغییرات انجام می‌شود.

از مهم‌ترین نکاتی که در طراحی یک سامانه بازیابی اهمیت دارند می‌توان به مواردی چون ضربه پایین هنگام گشایش چترها، حجم و وزن پایین، ضریب پسای بالا، پایداری مناسب و انطباق‌پذیری با محیط اشاره نمود. نحوه گشایش چتر، جانمایی مناسب، بررسی و تحلیل مقاومت مواد تشکیل‌دهنده چترها هنگامی که در معرض حرارت، خستگی، سایش و رطوبت قرار می‌گیرند نیز از جمله موارد مهمی هستند که در طراحی چترها بایستی مورد توجه قرار گیرند [1].

با شروع پرواز فضاپیماهای شاتل (STS-49) در سال ۱۹۹۲ میلادی، چتر ترمزی به زیر سامانه کاهش سرعت فضاپیماهای شاتل اضافه شد. اضافه شدن این زیر سامانه به یک وسیله نقلیه فضایی نیازمند مجموعه‌ای از تجزیه و تحلیل‌های آیرودینامیکی و آزمایش‌های مرتبط با عملکرد سامانه بود [2].

چترهای ترمزی دارای تخلخل بیشتری نسبت به چترهای یکپارچه هستند. تخلخل بیشتر علاوه بر پایداری بیشتر، نیروی بازشوندگی کمتری نسبت به چترهای یکپارچه را سبب می‌شود که یکی از نتایج آن ورود شتاب بازشوندگی کمتر به محموله است. تیلور و همکارانش سامانه فرود فضاپیمای کیستلر (Kistler) را طراحی کردند که شامل چترها و کیسه‌های هوا برای فرود آمدن محموله K-1 بود. این محموله یک کار تجاری و

توسعه‌ای استفاده مجدد حامل‌ها در جهان است. نوع و نحوه آزمایش چترها برای بازیابی برنامه کیسلر در مرجع [1] ارائه شده است. می‌رسون و کنت برجسته‌ترین سامانه‌های هدایت محموله تا مرحله تحویل آن‌ها روی زمین را بررسی کرده است. در مطالعه آن‌ها الزامات عملکردی و ویژگی‌های هر مأموریت مورد بررسی قرار گرفته است [3].

چترها از اصلی‌ترین کاهنده‌های سرعت در کاربردهای مختلف هوایی و فضایی محسوب می‌شوند. تعیین دقیق ضرایب آیرودینامیکی چترها در روند طراحی مجموعه کاهنده سرعت دارای اهمیت به‌سزایی است. ضریب پسای چتر در تعیین میزان سرعت فرود، شتاب و نیروهای وارد بر کانوپی چتر در فرایند باز شدن و مشخص کردن ابعاد و اندازه چتر اهمیت دارد. ضریب پسا به عوامل مختلفی همچون نوع چتر، میزان نفوذپذیری پارچه، سرعت حرکت، جرم محموله و موارد دیگر بستگی دارد.

یکی از روش‌های مطالعه چترها انجام آزمایش‌های پرتابی است. در این آزمون‌ها چتر با ابعاد واقعی یا مقیاس شده را به وسیله راکت پرتاب و یا از یک هواگرد در آسمان رها می‌کنند. در آزمایش‌های پروازی، تمامی پارامترهای مورد نیاز، مانند توزیع فشار کانوپی قابل دسترسی نیست. روش دیگر جهت تخمین ضرایب آیرودینامیکی چترها، انجام شبیه‌سازی عددی است که توسعه و افزایش دقت آن‌ها، در جهت کاهش هزینه‌های آزمایش‌ها دارای تأثیر بسیار مثبتی است. در شبیه‌سازی‌های عددی چترها، در نظر گرفتن دقیق شرایط برهم‌کنش سازه-سیال در فرایند پرباد شدن چتر، دارای پیچیدگی بسیاری است که در این زمینه، تحقیقات متعددی انجام گرفته است [4].

هوانگ (Huang) و همکارانش در سال ۲۰۲۰ فرایند پرباد شدن چتر از نوع دیسک-گپ-بند (disk-gap-band) را در رژیم مافوق صوت و اتمسفر سیاره مریخ مورد مطالعه عددی قرار دادند. آن‌ها از یک مدل اولیه جهت شبیه‌سازی اندرکنش سازه و سیال در رژیم جریان مافوق صوت با در نظر گرفتن اثرات بندهای تعلیق استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی‌های آن‌ها مطابقت خوبی با داده‌های دریافت شده ناسا از مریخ‌نشین کنجکاوی (Curiosity) دارد [5]. یانگ (Yang) و همکارانش در سال ۲۰۲۱ اثرات ضریب گذردهی پارچه روی عملکرد یک چتر در جریان مافوق صوت را به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش گذردهی پارچه،

[11].

پرا تاپ و همکارانش اثرات ناحیه دنباله محموله روی عملکرد چترها را مورد مطالعه قرار داد [12]. سلیمی و همکارانش نیز اثرات ناحیه دنباله محموله روی عملکرد چترهای پارچه‌ای را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها در تحقیق دیگری نیروهای آیرودینامیکی وارد بر یک چتر ریبونی و تنش‌های حاصل از اعمال این نیروها را به صورت عددی شبیه سازی کردند [13,14]. از دیگر تحقیقات انجام گرفته روی اثرات ناحیه دنباله بر عملکرد چترها می‌توان به تحقیق مک‌کویلینگ و پوتوین در سال ۲۰۱۲ اشاره کرد [15].

دی و همکارانش در یک تحقیق تجربی، مراحل باز شدن چتر را با طراحی چتر در زمان‌های مختلف بررسی کردند و با کمک تونل باد ضریب پسا در هر حالت محاسبه شد [16]. آن‌ها در تحقیقی دیگر، یک چتر دونات شکل را به صورت عددی مورد مطالعه قرار داده و اثرات گردابه‌های پشت محموله روی نیروی‌های عرضی و ضریب پسای چتر را بررسی کردند.

جونگ دونگ و همکارانش در مطالعه‌ای برای مدل‌سازی دینامیکی اندرکنش سازه-سیال چتر و بندهای تعلیق از روش تعقیب جبهه مرزی (Front Tracking) استفاده کرده است. چترهای T-10 و G-11 در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بیشتر تمرکز این پژوهش روی رفتار دینامیکی چتر در فاز پر باد شدگی است که در مقایسه با نتایج تجربی قابل قبول می‌باشد [17].

ستین (Setein) در پژوهشی به حل عددی و سه بعدی اندرکنش سازه-سیال چتر پرداخته است. برای قسمت دینامیک جریان از المان محدود فضا-زمان و برای قسمت سازه، از المان محدود کلاسیک استفاده کرده است. نتیجه‌گیری ستین به این صورت است که پیش‌بینی رفتار چتر، نیازمند مدل غیرخطی دقیق رفتار اندرکنش سازه-سیال (FSI) است [18]. ارتگا (Ortega) به ارائه یک تکنیک برای حل آیروالاستیک چتر پرداخته است که از آیرودینامیک تجربی مبتنی بر مدل پر باد شدگی (Filling-time) و قانون مساحت لودکه (Ludtke's Area Law) کمک گرفته است [19]. ستین در سال ۲۰۰۱، یک شبیه‌سازی اندرکنش سازه-سیال چتر با کمک معادلات سه بعدی ناویر استوکس برای جریان تراکم‌ناپذیر را بررسی کرد و همانند سایر تحقیقات در این زمینه، کوپل شدن دینامیک جریان و سازه، به واسطه سطح چتر انجام

گسترده‌ی ناحیه گردابه‌ای موجود در پایین‌دست چتر کاهش یافته و فاصله آن از چتر نیز بیشتر می‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب گذردهی، دامنه نوسانات ضریب پسا نیز کاهش می‌یابد که به معنی افزایش پایداری چتر می‌باشد [6]. جیا (Jia) و همکارانش در سال ۲۰۲۰ جریان مافوق صوت پیرامون یک چتر رینگ-سیل (Ring sail) را برای استفاده در اتمسفر سیاره مریخ مورد مطالعه عددی قرار دادند. آن‌ها اثرات میزان تخلخل پارچه چتر و توزیع آن را روی آیرودینامیک این نوع چتر بررسی کردند. شبیه‌سازی‌های آن‌ها در عدد ماخ ۲، همراه با محموله می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های آن‌ها نشان می‌دهد که تخلخل بیشتر در دامن چتر ساختار پایداری در مقایسه با تخلخل بیشتر در نزدیکی رأس چتر ایجاد می‌کند [7]. همچنین، با افزایش تخلخل در نزدیکی دامن چتر ضریب پسا کاهش می‌یابد اما پایداری مجموعه چتر و محموله بیشتر می‌شود. فن و همکارانش در سال ۲۰۲۲ تحقیق مشابهی روی اثرات ضریب تخلخل پارچه چتر روی عملکرد چتر دیسک-گپ-بند در جو رقیق سیاره مریخ انجام دادند. تحقیق آن‌ها در رژیم جریان گذر صوت و مافوق صوت انجام گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل پارچه چتر، ضریب پسا اگر چه خیلی جزئی اما کاهش می‌یابد [8].

فن و همکارانش در سال ۲۰۲۲ جریان مافوق صوت پیرامون یک شبه-چتر را با در نظر گرفتن اثرات آشفته‌گی جریان مورد بررسی عددی قرار دادند. عدد ماخ جریان در تحقیق آن‌ها برابر ۲ و آشفته‌گی جریان با استفاده از دو رهیافت شبیه‌سازی معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز (RANS) و شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده (DES) مدل‌سازی شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که رهیافت مدل‌سازی آشفته‌گی اگر چه تأثیر محسوسی روی دینامیک موج شوک ندارد اما روی ساختارهای گردابه‌ای جریان بسیار تأثیرگذار می‌باشد [8].

داوودیان و آزادی در تحقیقاتی تأثیر رینولدزهای مختلف روی آیرودینامیک چتر با و بدون حضور هواکش (Vent) را بررسی کردند [9]. در تحقیقی دیگری که به صورت شبیه‌سازی عددی و تجربی انجام شد، تأثیرات تخلخل روی ضرایب پسای چتر بررسی شد [10]. در تحقیقی دیگر که توسط گا (Gao) و همکارانش انجام شد، به صورت عددی و با کمک یک مدل تئوری اثرات تخلخل روی نیروی پسا بررسی و شبیه‌سازی شد

مأموریت خاص طراحی و ساخته شده است. مدل چتر ساخته شده در نرم‌افزار کتیا ایجاد شده و بعد از تولید شبکه محاسباتی توسط نرم‌افزار پوینتوایز (Pointwise) در نرم‌افزار فلوئنت تحلیل عددی شده است. همچنین، چتر ساخته شده توسط آزمون کشش خودرو که یکی از آزمایش‌های شناخته شده در راستای بررسی عملکرد چترها می‌باشد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه ضریب پسای اندازه‌گیری شده در آزمون کشش خودرو با نتایج عددی، نشان از مطابقت نسبتاً مناسب نتایج دارد. این موضوع نشان از کارایی آزمون کشش خودرو با توجه به هزینه‌های بسیار کم آن در مقایسه با سایر روش‌های آزمایش چترها دارد. همچنین، لازم به ذکر است که براساس جستجوهای انجام گرفته محققان پژوهش حاضر، هیچ تحقیق مشابهی در داخل و خارج از کشور با ماهیت مقایسه نتایج آزمون کشش خودرو با نتایج دینامیک سیالات محاسباتی روی چترهای ریبونی یافته نشده است.

روش‌های آزمایش چتر

چترها و سامانه‌های بازیابی چتر را می‌توان با روش‌های مختلفی آزمایش کرد. روش‌های آزمون را می‌توان در سه گروه اصلی آزمون پرواز آزاد، آزمون متصل (کشش) و آزمون تونل باد دسته‌بندی کرد. برای طراحی یک آزمون مناسب، لازم است هر یک از روش‌های مختلف آزمون موجود بررسی شود.

آزمون پرواز آزاد شکل (۱) با قرار دادن کل مجموعه چتر در شرایط مشابه مأموریت صورت می‌گیرد. روش‌های آزمون پرواز آزاد عبارتند از:

۱. سقوط آزاد از هواپیما.
۲. پرتاب از بالگرد.
۳. پرتاب آزمایشی از بالن در ارتفاع بالا.
۴. پرتاب به وسیله راکت در مسیر بالستیک.
- آزمون پرواز آزاد دارای مزایای زیر است:
 ۱. بدون محدودیت فیزیکی در عملکرد سامانه چتر.
 ۲. آزمون با جرم محدود و مشخص.
 ۳. بررسی رفتار جریان و تأثیر گردابه‌های جریان پشت محموله بر چتر در شرایط واقعی.
 ۴. یکسان بودن شرایط آزمایش با شرایط عملیات واقعی.
 ۵. بررسی کامل عملکرد سامانه بازیابی.
 ۶. ارزیابی و بررسی سایر ویژگی‌های عملکردی مانند پایداری

می‌شود. ستین همانند تحقیق قبلی خود در سال ۲۰۰۰، به این نتیجه رسید که برای پیش‌بینی رفتار چتر، به یک مدل‌سازی غیرخطی مرتبه بالا نیاز است.

پروت (Pruett) به تحلیل سازه‌ای یک چتر در مأموریت فرود روی سطح مریخ، با استفاده از دو حلگر المان محدود تنش و LS-DYNA پرداخته است. نتایج به دست آمده حاکی آن است که با در نظر گرفتن خصوصیات ناهمسان‌گردی پارچه چتر، در مقایسه با ویژگی‌های همسان‌گردی، ۴۰٪ کاهش بیشترین تنش در چتر ناهمسان‌گرد مشاهده می‌شود. همچنین نشان داده شد که بیشترین تنش در طناب و تقویت‌کننده‌های شعاعی ایجاد می‌شود [20]. در سال ۲۰۱۰ لئونوف (Leonov)، یک روش الاستیک گسسته را برای آنالیز شکل پر باد شده چتر ارائه داد [21].

ژائو لانگ در سال ۲۰۱۳ یک مطالعه عددی روی تغییر شکل سه بعدی یک چتر در آزمون پروازی با سرعت پایین انجام داده است و نتایج با یک کد المان محدود غیر خطی به کمک LS-DYNA اعتبار سنجی شده‌اند. تغییر شکل و توزیع نیروهای روی کانوپی چتر به عنوان خروجی این تحقیق مد نظر بوده‌اند [22].

در سال ۲۰۱۶، ژائو پر باد شدگی یک چتر را به صورت کوپل سیال-سازه شبیه‌سازی کرد. در تحقیق آن‌ها تغییر شکل سه بعدی چتر با نتایج تجربی صحنه‌سنجی شده‌اند [23]. ژائو لانگ مجدداً در سال ۲۰۱۶، برای بررسی و آنالیز دینامیکی و مشخصه‌های پایداری یک چتر به عنوان یک سامانه در حال فرود (سقوط)، از ترکیب مدل‌های اندرکنش سازه-سیال و دینامیک پرواز سامانه استفاده کرد. رفتار پر باد شدگی یک چتر با روش اویلر-لاگرانژ مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس داده‌های آیرودینامیکی، یک مدل ۹ درجه آزادی از یک سامانه چتر و محموله ایجاد و به منظور شبیه‌سازی مسیر سقوط، حل شده است. نتایج آزمون سقوط نشان می‌دهد که این روش می‌تواند برای هدایت و کنترل همه سامانه‌های سقوط هوایی استفاده شود [24].

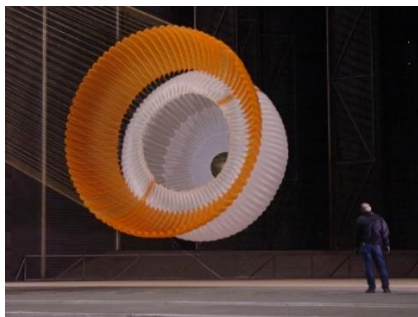
یکی از موضوعات مهم در لحظه باز شدن چترهای بارریزی، نیروی باز شونده‌گی چترها و شتاب باز شونده‌گی وارد به محموله می‌باشد. جامی‌سون (Jamison) در تحقیق تئوری، روشی برای محاسبه نیروهای باز شونده‌گی چتر نجات، سرعت سامانه و برخی دیگر از متغیرهای مهم ارائه کرده است [25].

در تحقیق حاضر یک چتر ریبونی مسطح برای استفاده در یک



شکل ۲ آزمون کشش به وسیله کامیون [27]

آزمون تونل باد شکل (۳) یک شکل تخصصی از آزمایش محبوس است که در آن جسم مورد مطالعه در جریان هوای متحرک ثابت نگه داشته می‌شود. اگر چه تونل‌های باد بسیار متنوعی وجود دارد، اما همه آن‌ها دارای مزایا و معایب مشابهی هستند.



شکل ۳ آزمون تونل باد چتر برای فرود در مریخ [28]

آزمون تونل باد دارای مزایای زیر می‌باشد:

۱. کنترل دقیق شرایط آزمون و تغییر سریع شرایط محیطی.
 ۲. اندازه‌گیری دقیق.
 ۳. سهولت در آشکارسازی و مطالعه جریان هوا.
 ۴. سهولت و سرعت در تکرار آزمون‌ها.
- آزمون تونل باد دارای معایب زیر می‌باشد:
۱. محدودیت‌هایی در اندازه و عدم مقیاس‌پذیری در چترها با احتساب اثرات دیواره تونل و ماهیت پارچه.
 ۲. هزینه‌بر بودن انجام آزمون در ابعاد واقعی.
 ۳. صلب بودن اتصال (اثر جرم بی‌نهایت).

سامانه، مسیر پرواز، سرعت نزول و غیره.

آزمون پرواز آزاد دارای معایب زیر است:

۱. دشوار بودن کنترل شرایط آزمون و بررسی دقیق پارامترهای طراحی.
۲. هزینه‌بر و دشوار بودن تهیه تجهیزات آزمون.



شکل ۱ آزمون پرواز آزاد چترهای خوشه‌ای [26]

آزمون کشش شکل (۲) با حرکت مهار شده (بکسل شده)

یک وسیله نقلیه آزمایشی در محیط آزاد صورت می‌گیرد.

روش‌های آزمون متصل عبارتند از:

۱. کشش به وسیله هواپیما.
۲. کشش به وسیله ارابه راکتی.
۳. کشش به وسیله کامیون (خودرو).
۴. کشش در آب.

آزمون کشش دارای مزایای زیر است:

۱. کنترل نسبتاً آسان شرایط آزمون.
۲. اندازه‌گیری دقیق عملکرد.

۳. بازیابی و استفاده مجدد وسایل نقلیه آزمایشی.

۴. سهولت در انجام آزمون به دفعات مکرر.

۵. هزینه کم و سهولت در تهیه تجهیزات مناسب.

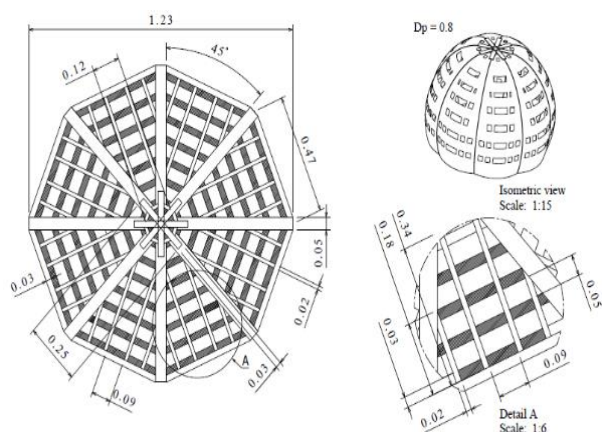
آزمون کشش دارای معایب زیر می‌باشد:

۱. عدم امکان آزمون برای سرعت‌های بالا.
۲. محدودیت افزایش فاصله از وسیله به علت محدودیت جانمایی طناب‌ها و غیره.

۳. ایجاد خطا در محاسبات به دلیل عواملی مانند اثرات زمین،

اثرات دنباله وسیله نقلیه روی چتر، تغییر جهت وزش باد و

غیره.



شکل ۴ نقشه چتر ریونی طراحی شده

شبیه‌سازی

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، هندسه کامل چتر توسط نرم‌افزار کتیا مطابق شکل (۴) ایجاد شده است. شبیه‌سازی‌ها شامل تحلیل دینامیک جریان و استخراج توزیع فشار روی سطوح بیرون و داخل چتر و محاسبه ضریب نیروی پسا می‌باشد.

با استفاده از نرم‌افزار تولید شبکه پوینت‌وایز (PointWise) شبکه اطراف چتر ترمزی مطابق شکل (۴) ایجاد شده است. ابتدا یک دامنه حل با ابعاد مناسب در اطراف چتر ایجاد شده و با مشخص کردن شرایط مرزی شبکه تولید شده برای تحلیل آماده می‌شود. در گام بعد، شبکه تولید شده در محیط نرم‌افزار فلونت وارد شده و شرایط مرزی متناسب با سرعت مشخص شده در ورودی اعمال می‌شود.

برای بررسی جریان حول چتر معادلات معادلات ناویر-استوکس در شرایط آشفتگی و تراکم‌ناپذیر تحلیل شده است. این معادلات در سه بعد همانند معادلات (۱) الی (۴) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + f_z \quad (4)$$

طراحی چتر ترمزی

در پژوهش حاضر ابعاد و نوع چتر ترمزی بر مبنای مأموریت زیر طراحی شده است.

۱. وزن محموله ۳۵۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.
۲. ارتفاع باز شدن چتر ترمزی ۷۰۰۰ متر از سطح دریا است. چگالی هوا در این ارتفاع در حدود ۰/۵۹ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.
۳. سرعتی که چتر ترمزی در آن باز می‌شود، ۱۲۰ متر بر ثانیه است.

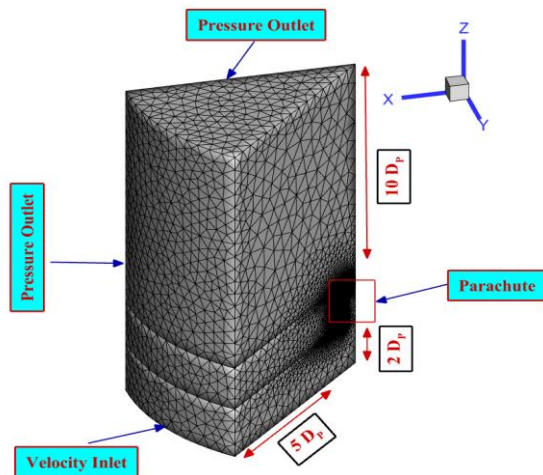
۴. سرعت حالت پایای چتر ترمزی ۸۰ متر بر ثانیه می‌باشد.
- بر اساس مأموریت فوق یک چتر ریونی مسطح با شرایط ارائه شده در جدول (۱) طراحی و هندسه آن با استفاده از نرم‌افزار کتیا مطابق شکل (۴) تولید شده است. اما با توجه به این موضوع که انجام آزمون کشش خودرو در این سرعت میسر نمی‌باشد، ضرایب آیرودینامیکی چتر طراحی شده در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه توسط شبیه‌سازی عددی و آزمون کشش خودرو اندازه‌گیری و مقایسه می‌شود.

جدول ۱ مشخصات چتر ترمزی طراحی شده

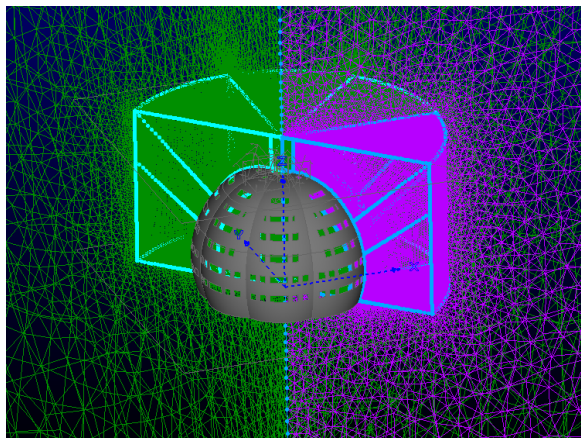
عنوان	مشخصات
نوع چتر	ریونی مسطح
تعداد گره‌های چتر	۸
قطر اسمی	۱/۲۳ متر
قطر کنوی پی پر شده	۰/۸۲ متر
قطر کنوی پی ساخته شده	۱/۲۳ متر
تعداد بندهای تعلیق	۸
تعداد بندهای راپزر	۴
طول بندهای تعلیق و راپزر	۱۷ متر
استحکام بندهای تعلیق	۳۰۰۰ پوند
سطح مؤثر پسا	۱/۱ متر مربع
نیروی بازشوندگی	۱/۳۱ تن نیرو
شتاب بازشوندگی	۳/۸ g
جرم	۳/۵ کیلوگرم

جدول ۲ استقلال حل از شبکه محاسباتی

ضریب پسا	ابعاد حدودی شبکه
۰/۶	۱۰۹۳۴۰۸
۰/۵۳	۱۸۲۲۰۷۰
۰/۵۱	۲۹۵۱۷۵۴



شکل ۵ شرایط مرزی دامنه محاسباتی



شکل ۶ نحوه تولید شبکه حول چتر ترمزی

نتایج و بحث

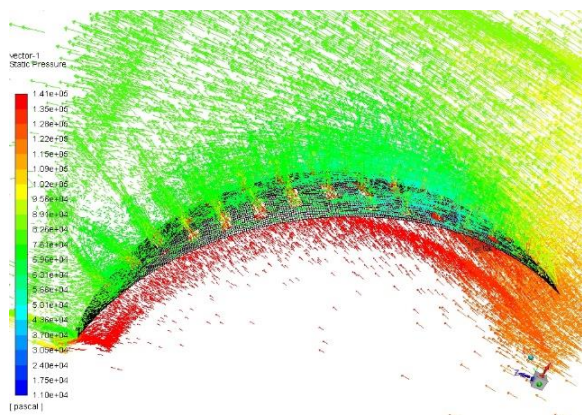
شبیه سازی ها در ۷ سرعت در محدوده ۱۰ تا ۱۲۰ متر بر ثانیه انجام گرفته است. اما همان طور که اشاره شد، داده های عددی و تجربی در دو سرعت ۲۰ و ۳۰ متر بر ثانیه مقایسه می شوند. دلیل این موضوع امکان ناپذیر بودن انجام آزمون کشش خودرو برای سرعت های بالاتر از ۳۰ متر بر ثانیه (حدود ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت) می باشد. برای اجرای آزمون کشش خودرو، همان طور که پیشتر اشاره شد، نمونه واقعی چتر ساخته شده است. قطر

در این روابط f و ν بیانگر نیروی خارجی و اثرات لزجت سیال (آرام و آشفته) می باشد. با صرف نظر از نیروی های خارجی، تنها جریان سیال عامل ایجاد نیرو به چترها می باشد. برای بررسی معادلات حاکم فرض می شود که سیال نیوتنی و جریان آشفته می باشد و عبارت پخش لزج به طور محلی با استفاده از مدل آشفته گی $k - \epsilon$ اصلاح می شود. خروجی شبیه سازی های سیالاتی، ضریب پسا کل در حالت پر باد شدگی برای چتر ترمزی می باشد. جهت ارزیابی ضریب پسا، شبیه سازی ها در چندین سرعت انجام گرفته و در دو سرعت ۲۰ و ۳۰ متر بر ثانیه با داده های تجربی مطابقت داده می شود. با توجه به محدوده سرعت صوت در ارتفاع مکان انجام آزمون کشش خودرو (۳۳۶،۴ الی ۳۱۲،۲ متر بر ثانیه) رژیم حاکم بر جریان تراکم ناپذیر می باشد. در این حالت رژیم جریان با توجه به عدد بدون بعد $Re = \rho u L / \mu$ و در نظر گرفتن قطر پر باد شده چتر به عنوان مقیاس طولی در محدوده 1×10^6 می باشد. بر این اساس جریان کاملاً آشفته در نظر گرفته شده است.

برای بررسی جریان بایستی استقلال حل از شبکه محاسباتی برر سی گردد (جدول ۲). همانند جدول (۲) ضریب پسا در ۳ شبکه مختلف محاسبه و گزارش شده است. همان طور که مشاهده می شود اختلاف نتایج شبکه های ۱۸۲۲،۰۷۰ و ۲۹۵۱،۷۵۴ سلول قابل چشم پوشی می باشد. بر این اساس و در راستای کاهش هزینه های محاسباتی، شبکه ۱۸۲۲،۰۷۰ به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

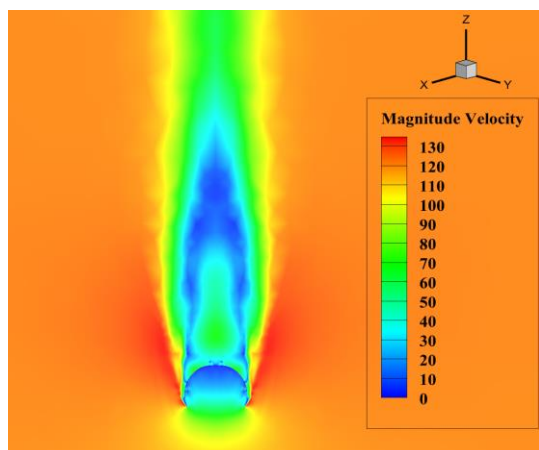
با توجه به عبور جریان سیال از روی پارچه چترها و ایجاد لایه مرزی، بایستی نقاط شبکه محاسباتی در نزدیکی پارچه چترها دارای تراکم بیشتری به نسبت سایر نقاط شبکه باشد. بنابراین، از شبکه لایه مرزی در مجاورت سطح چتر استفاده شده است.

جهت کمینه کردن آثار شرایط مرزی روی متغیرهای جریان داخل و پیرامون چتر ترمزی، فاصله چتر ترمزی از مرزهای بالادست $10D_p$ ، از مرز پایین دست $2D_p$ و از مرزهای اطراف به اندازه $5D_p$ در نظر گرفته می شود. شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی، همانند شکل (۵) می باشد. همان طور که مشاهده می شود سطح چتر دیواره صلب در نظر گرفته شده و برای مرزهای خروجی و ورودی دامنه محاسباتی، شرایط فشار خروجی و سرعت ورودی تعریف شده است.



شکل ۸. توزیع فشار بر روی و زیر چتر ترمزی ریبونی مسطح ۱/۲ متری

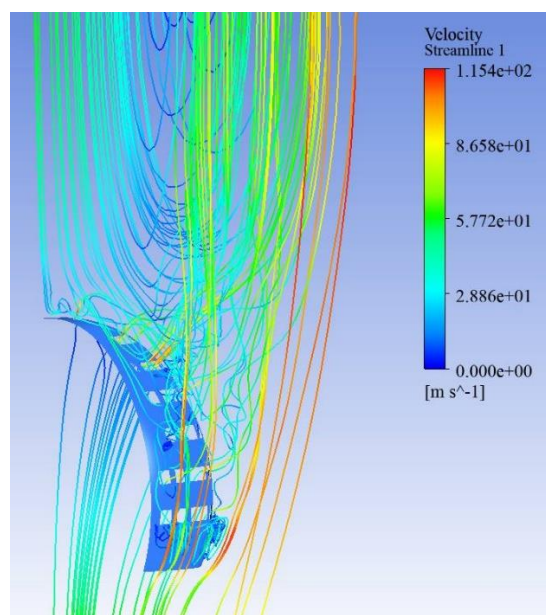
شکل (۹) میدان سرعت روی صفحه عبور کننده از مرکز چتر را در سرعت ۱۲۰ متر بر ثانیه نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود حفره ونت قوی‌ترین جت را تشکیل داده است. همچنین، مشاهده می‌شود که قدرت جت‌های خروجی از منافذ موجود در مجاورت رأس چتر بیشتر از منافذ موجود در ناحیه دامن چتر می‌باشد. به عبارت دیگر سرعت جریان خروجی از منافذ، با حرکت از سمت رأس به دامن چتر کاهش یافته است.



شکل ۹. توزیع سرعت چتر ترمزی ریبونی مسطح ۱/۲ متری

جهت استخراج ضریب پسا در محدوده عملکرد چتر، شبیه‌سازی‌ها علاوه بر سرعت ۲۰ و ۳۰ متر بر ثانیه، در ۵ سرعت ۱۰، ۴۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ متر بر ثانیه نیز تکرار و ضرایب پسا در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ضریب پسا در محدوده عملکرد چتر تقریباً مقدار ثابتی دارد. این موضوع نشان از عدم تغییر در ساختارهای جریان در محدوده

اسمی چتر ساخته شده برابر ۱،۲ متر بوده و تصویر آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شکل (۷) خطوط جریان عبور کننده از داخل و پیرامون یک قطاع از چتر را در سرعت ۱۲۰ متر بر ثانیه نمایش می‌دهد. رنگ خطوط جریان در این شکل بر اساس اندازه سرعت تنظیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بخش قابل توجهی از جریان از داخل منافذ چتر عبور می‌کنند. جریان عبوری از این منافذ منجر به شکست گردابه‌های ناحیه دنباله چتر شده و مانع از ریزش نامتقارن گردابه در ناحیه دنباله می‌گردند. این موضوع دامنه نوسانات چتر را کاهش داده و عامل اصلی پایداری چترهای ریبونی می‌باشد.



شکل ۷. خطوط جریان عبور کننده از داخل و پیرامون چتر

شکل (۸) بردارهای سرعت در مجاورت سطح چتر را در سرعت ۱۲۰ متر بر ثانیه نمایش می‌دهد. رنگ بردارها در این شکل بر اساس فشار تنظیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، فشار داخل کانوی چتر افزایش یافته و با عبور جریان از حفره‌ها فشار کاهش می‌یابد. در ناحیه دنباله نیز شاهد کمینه مقدار فشار هستیم. اگرچه وجود تخلخل در چترهای ریبونی سبب می‌شود تا اختلاف فشار بین داخل و خارج چتر نسبت به چترهای یکپارچه کمتر باشد، اما همین اختلاف فشار منجر به ضریب پسای معادل ۰/۵۳ شده که در سرعت‌های بالا نیروی پسای قابل توجهی ایجاد می‌کند.

۳. اندازه‌گیری نیروی وارده توسط چتر.

در دسترس بودن، کم هزینه‌تر بودن، قابلیت تغییر سریع سناریو آزمون از جمله مزایای این روش می‌باشد. اما تأثیر ناحیه دنباله خودرو روی عملکرد چتر و سرعت کم حرکت نیز از معایب این روش محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر ناحیه دنباله خودرو به طور جداگانه شبیه‌سازی شده و اثرات آن روی چتر به صورت ضریب تصحیح روی ضریب پسا اعمال شده است.



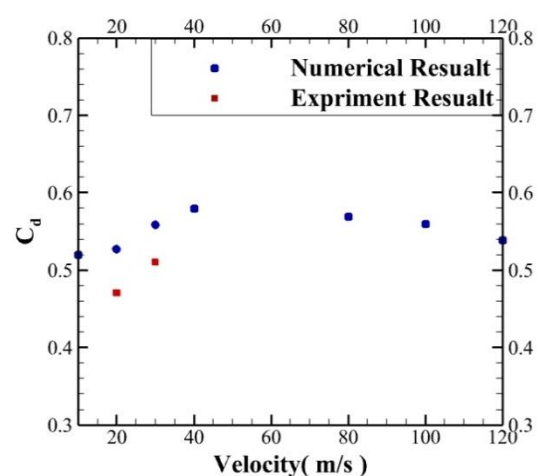
شکل ۱۱ چتر ترمزی ساخته شده

سازه فلزی که وظیفه اتصال چتر را به عهده دارد، با ضریب اطمینان ۳ قابلیت تحمل نیروی کششی تا چند تن را به راحتی فراهم می‌سازد. همان طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده، یک چارچوب فلزی به ارتفاعی ۱ متر ساخته شده است. دلیل این امر بالاتر بودن سازه از سقف خودرو است تا اثر جریان تولیدی خودرو روی چتر را کمتر کند.

برای جلوگیری از آسیب دیدن بدنه خودرو، تسمه پایه سازه با تسمه دیگری بدنه خودرو را در بر می‌گیرد تا نیروی وارده به بدنه خودرو مهار شود. همچنین جهت انتقال مستقیم نیرو به شاسی خودرو، یک میلگرد آجدار سایز ۲۰ از میان شاسی عبور داده شده و از طریق یک سیم بکسل به سازه متصل شده است.

لودسل مورد استفاده از نوع S شکل کششی-فشاری با ظرفیت ۳۵۰ کیلوگرم می‌باشد. خطای اندازه‌گیری لودسل کمتر از ۰/۱۸ درصد، جنس به کار رفته در آن استیل ضد زنگ بوده و محدوده دمای کاری آن ۳۰- تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دو بند ریزر کوچک ۵۰ سانتی‌متری از قطعات عمودی سازه فلزی به لودسل

سرعت بررسی شده می‌باشد. لازم به ذکر است که تغییرات جزئی در ضریب پسا در محدوده سرعت عملکردی چترهای ریون از خصوصیات آن‌ها به شمار می‌آید که با نتایج موجود مطابقت دارد [29]. همان طور که مشاهده می‌شود، برای مقایسه نتایج عددی و تجربی، ضرایب پسای محاسبه شده از آزمون کشش خودرو در سرعت‌های ۲۰ و ۳۰ متر بر ثانیه در این شکل نشان داده شده است. توضیحات مربوط به چگونگی استخراج نتایج تجربی و دلایل وجود اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در بخش بعد ارائه می‌شود.



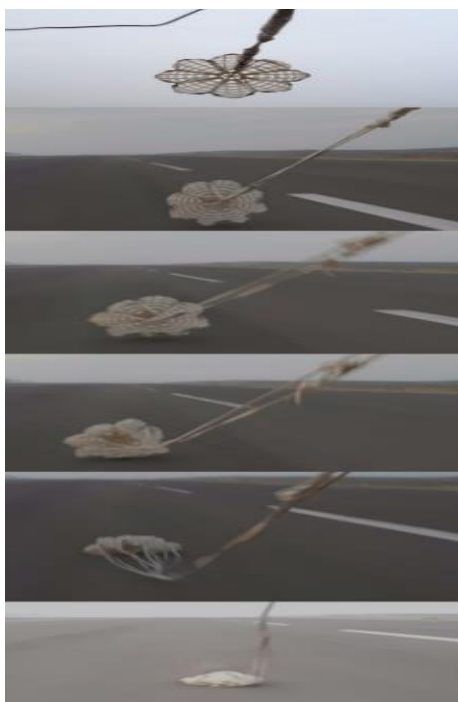
شکل ۱۰ مقایسه ضریب پسای محاسبه شده از دو روش عددی و تجربی

آزمون کشش چتر

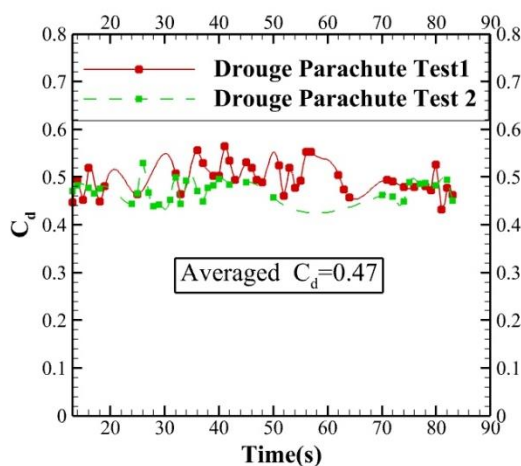
نظر به بررسی مزایا و معایب تمامی روش‌های آزمون چتر که در مقدمه بیان شد، به منظور آزمون چتر ترمزی ریونی طراحی شده، از روش کشش خودرو بهره برده شده است. در صورت عملکرد مناسب چتر در آزمون کشش خودرو، از آزمون پروازی برای بررسی عملکرد کل مجموعه بازبایی در شرایط واقعی پرواز بهره گرفته خواهد شد. به جهت افزایش ایمنی، دقت، تکرارپذیری آزمون، طول ۴/۵ کیلومتری باند پرواز و محدودیت‌های شهری از باند پرواز فرودگاه بین‌المللی پیام برای آزمون استفاده گردید. لوازم استفاده شده در آزمون شامل چتر ترمزی ریونی شکل (۱۲)، بندهای تعلیق ۲/۵ هزار پوندی، سازه فلزی، لودسل و نمایشگر، خودرو دودفرانسیل، چندین دوربین فیلم‌برداری و اتصالات می‌شوند. هدف از انجام این آزمون موارد زیر می‌باشد:

۱. بررسی عملکرد چتر در حالت کامل پرباد شده.
۲. بررسی پایداری چتر.

باشد که اختلاف آن نسبت به عدد اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی‌های عددی (0.53) در حدود ۱۰ درصد می‌باشد. برای رسیدن به یک ارزیابی دقیق‌تر اندازه‌گیری‌های ضریب پسا در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه تکرار و نتایج مربوط در نمودارهای شکل (۱۵) ارائه شده است. ضرایب پسای متوسط اندازه‌گیری شده در سرعت ۳۰ متر بر ثانیه همان طور که در نمودار شکل (۱۵) نشان داده شده معادل ۰.۵۱ می‌باشد. فاصله این عدد با ضریب پسای عددی اندازه‌گیری شده (0.56) حدود ۱۰ درصد می‌باشد.



شکل ۱۳ مراحل پر باد شدن چتر ترمزی



شکل ۱۴ ضریب پسا اندازه‌گیری شده توسط لودسل آزمون اول و دوم فاز در جهت وزش باد و سرعت ۲۰ متر بر ثانیه

متصل گردیده و از طرف دیگر لودسل به بند رایزر چتر متصل می‌شود. طول سیم اتصال لودسل به نمایشگر ۳ متر بوده و فردی برای ضبط اطلاعات نمایشگر داخل کابین خودرو مستقر می‌شود. نتایج ضبط شده توسط لودسل ضریب پسا را مشخص می‌کند.



شکل ۱۲ سازه فلزی متصل بر روی خودرو پیکاپ

آزمون کشش چتر ترمزی

در ابتدا برای آزمون چتر ترمزی، چتر بر روی زمین قرار گرفته و خودرو شروع به حرکت می‌کند، در این حالت به علت فراهم نشدن جریان مورد نیاز چتر از زمین بلند نشده و بر روی زمین کشیده می‌شود. برای رفع این مشکل فردی با مستقر شدن در پشت خودرو و رعایت موارد ایمنی، زمانی که وسیله به سرعت مناسب می‌رسد، اقدام به پرتاب کردن چتر ترمزی به بیرون خودرو می‌کند. چتر در کسری از ثانیه در معرض جریان قرار گرفته و باز می‌شود (شکل ۱۳). سرعت باد محلی بین ۲/۵ الی ۳/۷ متر بر ثانیه در جهت جنوب_غربی، شمال_شرقی می‌باشد. به منظور به دست آوردن بهترین نتیجه، آزمون به دفعات تکرار شده است. پس از به دست آوردن نیروهای کششی و ثبت آن‌ها با محاسبه فشار دینامیکی و با کمک سرعت و چگالی هوا حاکم بر باند پروازی مقدار ضریب پسا در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه (۷۲ کیلومتر بر ساعت) مطابق شکل (۱۴) محاسبه می‌شود که با مقدار شبیه‌سازی انجام شده نزدیک می‌باشد. آزمون کشش به دفعات روی باند تکرار شده و بیشترین اختلاف بین نتایج حاصل از لود سل در قالب آزمون ۱ و ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که ضریب پسای محاسبه شده از آزمون کشش خودرو بعد از اصلاح اثرات دنباله خودرو در شکل (۱۴) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقدار متوسط در این نمودارها معادل ۰/۴۷ می‌-

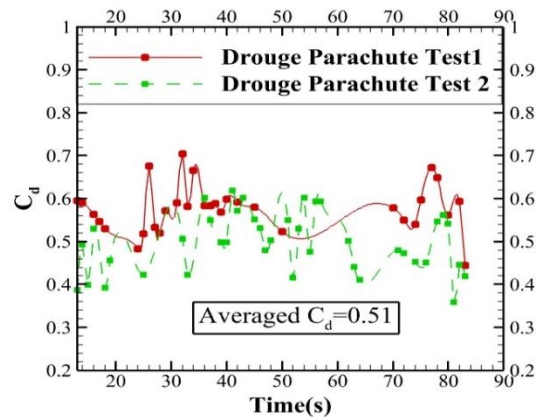
فهرست علائم

وزن محموله (kg)	W
فشار دینامیکی (N/m^2)	Q
سطح پسای اسمی چتر (m^2)	$(C_d S)_0$
مساحت چتر (m^2)	S_0
قطر اسمی چتر (m)	D_0
قطر کانوی ساخته شده (m)	D_C
قطر کانوی پر باد شده (m)	D_P
سطح پسای پر باد شده چتر (m^2)	$(C_d S)_P$
ضریب بدون بعد کاهش نیرو	X_1
نیروی باز شونده (N)	F_x
ضریب بدون بعد نیروی باز شونده در جرم بی نهایت	C_x
شتاب وارد به محموله (m/s^2)	a
نسبت سطح پسای ریف به سطح پسای اسمی	ϵ
قطر و طول بند ریف (m)	D_R, L_R
سطح پسای در حالت ریف (m^2)	$(C_d S)_R$
نیروی باز شونده در حالت ریف (N)	F_R
سطح پسای محموله (m^2)	$(C_d S)_{payload}$
استحکام بند تعلیق (N)	F_{SL}
استحکام مورد نیاز پارچه (N/m)	t_c
استحکام مورد نیاز برای نوارهای هواکش (N)	F_{VT}
تعداد بندهای تعلیق	N_{SL}
ضریب بدون بعد طراحی	DF
ضریب بدون بعد طراحی نهایی	DS
ضریب ایمنی بدون بعد	SF

واژه نامه

طراحی چتر ترمزی	Brake Parachute Design
شبیه سازی چتر	Parachute Simulation
بازیابی محموله فضایی	Space Payload Recovery
چتر ریبونی	Ribbon Parachute

تقدیر و تشکر



شکل ۱۵ ضریب پسای اندازه گیری شده توسط لودسل آزمون اول و دوم فاز مخاف جهت وزش باد و سرعت ۳۰ متر بر ثانیه

دلایل وجود اختلاف بین نتایج عددی و تجربی را می توان در موارد زیر برشمرد:

۱. خطاهای مرتبط با شبیه سازی عددی از جمله عملکرد مدل آشفتگی مورد استفاده، انجام حل در شرایط پایا و خطاهای ناشی از خطی سازی و گسسته سازی معادلات.
۲. خطاهای مربوط به اندازه گیری های تجربی از جمله عدم قطعیت های مربوط به اندازه گیری نیرو، سرعت و جهت وزش باد، دقت محاسبه سرعت حرکت خودرو، نوسانات حاصل از حرکت چتر و تأثیرات دنباله خودرو روی دینامیک و نیروهای وارد بر چتر از عوامل اصلی وجود اختلاف بین نتایج به شمار می آیند.

نتیجه گیری

در پژوهش انجام شده ضریب پسای چتر با استفاده از شبیه سازی عددی و تجربی محاسبه شد. در این بررسی مشاهده شد که مقدار نیروی وارد به چتر با روابط تئوری استخراج شده از مرجع [29] مطابقت دارد. شبیه سازی های عددی صورت گرفته نشان داد که چگونه منافذ موجود روی چتر ریبونی از طریق شکستن گردابه های ناحیه دنباله مانع از ریزش منظم گردابه ها شده و از این طریق پایداری این نوع چتر را بهبود می بخشد. همچنین، اندازه گیری های تجربی نشان داد که آزمون کشش خودرو با وجود محدودیت هایی که در سرعت حرکت و تأثیرات خودرو روی عملکرد چتر دارد، می تواند برای ارزیابی تقریبی ضریب پسای مؤثر باشد. مشاهدات انجام شده در آزمون کشش خودرو همچنین گویای پایداری بسیار مناسب چتر ریبونی طراحی و ساخته شده داشت. موضوعی که در مطابقت کامل با ماهیت این نوع چتر می باشد.

مراجع

- [1] A. Taylor, P., Sinclair, R., J., and Allamby, R., D., "Design and Testing of the Kistler Landing System Parachutes," *15th Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference*, vol. 1, pp. 1–9, (1999).
- [2] "Crew Systems Deployable Aerodynamic Decelerator (DAD)", *Specification Guide Handbook*, Department of Defense Joint Service Specification Guide, (1998).
- [3] R.E. Meyerson, and W. Kent, "Space Shuttle Orbiter Drag Parachute Design," 2001.
- [4] K. Takizawa and T. E. Tezduyar, "Computational Methods for Parachute Fluid-Structure Interactions," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 125–169, (2012), doi: 10.1007/s11831-012-9070-4.
- [5] D. Z. Huang, P. Avery, C. Farhat, J. Rabinovitch, A. Derkevorkian, and L. D. Peterson, "Modeling, Simulation and Validation of Supersonic Parachute Inflation Dynamics during Mars Landing," in *AIAA Scitech 2020 Forum*, Orlando, FL, 01062020, (2020).
- [6] X. Yang, L. Yu, S. Nie, and S. Zhang, "Aerodynamic performance of the supersonic parachute with material permeability," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 50, no. 6, pp. 812–829, (2021), doi: 10.1177/1528083719844605.
- [7] L. Jiang, H. Jia, X. Xu, W. Rong, W., Jiang, Q. Wang, Q., C. Gang, and X. Xue, "Numerical Study on Aerodynamic Performance of Mars Parachute Models with Geometric Porosities," *Space Sci Technol*, vol. 2022, (2022), doi: 34133/2022/9851982.
- [8] J. Fan, J. Hao, C.-Y. Wen, and X. Xue, "Numerical investigation of supersonic flow over a parachute-like configuration including turbulent flow effects," *Aerospace Science and Technology*, vol. 121, p. 107330, (2022), doi: 10.1016/j.ast.2022.107330.
- [9] M. Dawoodian, A. Dadvand, and A. Hassanzadeh, "A Numerical and Experimental Study of the Aerodynamics and Stability of a Horizontal Parachute," *ISRN Aerospace Engineering*, vol. 2013, pp. 1–8, (2013), doi: 10.1155/2013/320563.
- [10] I. Laraibi, F. R. Marz-abadi, and F. Eatemadi, "Experimental and numerical investigation of fabric permeability on drag of conventional parachute," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 49, no. 1, pp. 17–20, (2017). In Persian.
- [11] Z. Gao, Charles, R., D., and L. Xiaolin, "Numerical Modeling of Flow Through Porous Fabric Surface in Parachute Simulation," *AIAA Journal*, vol. 55, no. 2, pp. 686–690, (2017).
- [12] M. Pratap, A. K. Agrawal, S. C. Sati, and V. Kumar, "Forebody Wake Effects on Parachute Performance for Re-entry Space Application," *Defence Science Journal*, vol. 70, no. 3, pp. 223–230, (2020).
- [13] Salimi, MR., Farajollahi, A. H., Mohseni Kafshgar Kolahi, A. H., Rostami, M. Aerodynamic, "Analysis of Cargo Speed Reduction Parachutes using Numerical Simulation". *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1-17. (2022).
- [14] Salimi, MR. Farajollahi, AH, Mohsenikafshgarkolaei, AH, M. Ebrahimi, and M. Ayoobi, "Numerical Analysis of Loads and Stresses Exerting on a Ribbon Type Parachute," *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 271-282, (2023).
- [15] M. Mcquilling and J. Potvin, "Forebody Wake Effects on the Aerodynamics of an Annular Parachute," *42nd AIAA*

- Fluid Dynamics Conference and Exhibit.*, (2012).
- [16] Day, B. P., Field, M. N., & Gelito, J. P. (2006). An Experimental Investigation of Aerodynamic Drag on a Round Parachute Canopy. Worcester Polytechnic Institute, 117.
- [17] K. Joung-Dong, L. Yan, and L. Xiaolin, "Simulation of Parachute FSI Using the Front Tracking Method," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 37, pp. 100–119, (2013).
- [18] K.R. Stein, R.J. Benney, T.E. Tezduyar, J.W. Leonard, and M.L. Accorsi, "Fluid-Structure Interactions of a Round Parachute: Modeling and Simulation Techniques," *Journal of Aircraft*, vol. 38, no. 5, pp. 800–808, (2001).
- [19] E. Ortega, and R. Flores, "Aeroelastic Analysis of Parachute Deceleration Systems with Empirical Aerodynamics," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 234, no. 3, pp. 729–741, (2019).
- [20] M. Pruett, M. Accorsi, and M. Kandis, "Stress Analysis of the Parachute System for the Mars Science Laboratory Mission," *AIAA Journal*, pp. 1–19, (2009).
- [21] S. V. Leonov, V. I. Morozov, and A. T. Ponomarev, "Shape Modeling and Strength Analysis of Parachutes," *Mechanics of Solids*, vol. 46, no. 2, pp. 311–324, (2011).
- [22] Xing-long, G., Qing-bin, Z., Qian-gang, T., & Tao, Y. (2013). Fluid-Structure Interaction Simulation of Parachute in Low Speed. Hong Kong: IAENG.
- [23] X. Gao, Q. Zhang, and Q. Tang, "Fluid-Structure Interaction Analysis of Parachute Finite Mass Inflation," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2016, (2016).
- [24] G. Xinglong, Z. Qingbin, and T. Qiangang, "Parachute Dynamics and Perturbation Analysis of Precision Airdrop System," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 29, no. 3, pp. 596–607, (2016).
- [25] R. Jamison L., "A Method for Calculating Parachute Opening Forces for General Deployment Conditions," *NASA Office of Advanced Research and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 498–502, (1966).
- [26] NASA, "NASA Orion Parachute Test: The Mars Generation Reports," (2017). [Online]. Available: <https://themarsgeneration.org>.
- [27] B. Gupta, "Aerial delivery systems and technologies," *Defence Science Journal*, vol. 60, no. 2, pp. 124–136, (2010), doi: 10.14429/dsj.60.326.
- [28] "Experimental wind tunnel test for landing on Mars Report," NASA.
- [29] Knacke, T. W. "Parachute Recovery Systems: Design Manual", Para Pub, (1992),

Effect of Optimizing the Exterior Shell and Translucent Wall on Reducing the Energy Consumption of Educational Buildings in a Continental Climate with Hot Summers

Research Article

Amir Yarinezhad¹, Abbas Mahravan² 

DOI: [10.22067/jacsm.2023.81531.1175](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81531.1175)

1. Introduction

Increasing energy consumption in educational spaces, as one of the leading consumers of fossil fuels, is a critical issue in the contemporary era. Research shows that buildings that do not have optimal thermal comfort hurt mental health and well-being. One of the effective passive methods of energy-saving is using thermal energy storage and thermal inertia to maintain optimal thermal comfort inside the building and reduce the energy demand of the building.

According to previous studies, favorable internal environmental conditions have a direct impact on the architectural features and executive details, which include diverse parameters, such as plan, orientation, configuration, building thermal cover features, window-to-wall ratio, and external shading of buildings.

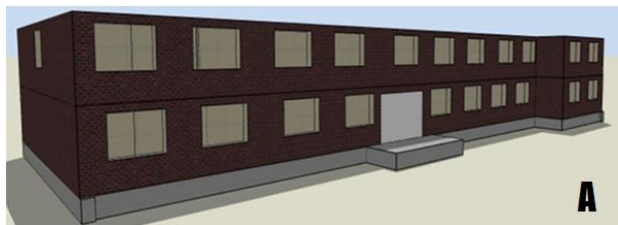


Fig. 1. A: The modeled view of the building in Design Builder software; B: The current state of the Ehsan School building

2. Methods

This study examined an existing primary school building as a reference building to investigate the influence of using passive solutions on boosting the building's energy efficiency. The reference building was in Kermanshah City, a region with moderate winters and very hot and dry summers. Kermanshah City is at 34 degrees 30 minutes north and 47 degrees 15 minutes east and has an altitude of 1305 meters from the sea level. This study investigated the thermal behavior and comfort condition in the reference building through simulation in the DesignBuilder software version 6.1 before and after using the proposed passive solutions (Fig. 1). The passive solutions consisted of adding insulation and using light-transmitting walls in various configurations. The main studied properties of the proposed insulation were their type, thickness, and position in layering. Moreover, the effect of using different types of light-transmitting walls on boosting the energy efficiency of the building was studied considering various thicknesses of the used glass, gases in air gap, types of glass, and number of walls.

3- Results

This study examined the energy efficiency of the reference building influenced by six different types of insulation: expanded polystyrene, extruded polystyrene, glass wool, stone wool, polyurethane, and natural materials (e.g., rice husk on the north and south sides of outer walls). The results indicated that the mentioned insulations had almost the same performance. Moreover, as shown in Fig2. , adding polyurethane insulation to the exterior wall of the north classroom reduced the building heating load and discomfort time by about 14.07% (176.5 kWh) and 1.5%, respectively.

In addition, our results indicated that using polyurethane insulations of 5, 7, 10, 12, and 15 cm in the southern classroom reduced the building heating load up to 16.51%, 17.36%, 18.16%, 18.27%, and 18.65%, respectively. Furthermore, this research investigated and compared the effect of installing polyurethane insulation

*Manuscript received: April 29, 2023. Revised, August 23, 2023, Accepted, November 12, 2023.

¹ Master's student, Department of Architectural Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. **Email:** amiryari4543@gmail.com

² Corresponding author, Assistant Professor, Department of Architecture, Technical and Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran. **Email:** a.mahravan@razi.ac.ir

in four different configurations on building energy consumption (Fig. 2). The results showed that mounting 10 cm thick polyurethane insulation in the layer behind the joinery plaster (Fig. 2, layer 1) had the most significant performance.

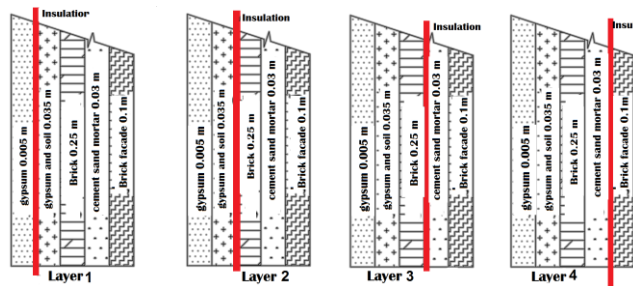


Figure 2. Insulation position in different layers of the outer wall of the studied spaces

Heat transfer and heat loss through the transmitting wall were more than the standard level. Therefore, this study investigated and compared the influences of installing nine transmitting wall configurations on mitigating the mentioned variables. The results showed that in the northern classroom, using $3 \times 13 \times 3$ cm double-glazed windows with low-emissivity glass and argon gas decreased heat transfer and heat loss through the windows by about 28.4%, compared to the reference building.

4- Conclusion:

This study concludes that the best solutions for optimizing the energy consumption of the studied building were using polyurethane insulation with a thickness of 10 cm in layering number 1 and installing window-type 5 in the northern classroom and window-type 7 in the southern classroom. As the findings indicated, using the proposed insulations increased the cooling load of the building, known as the anti-insulation phenomenon. Therefore, this study suggests conducting more extensive research to find solutions to overcome this shortcoming.



بررسی تأثیر بهینه‌سازی پوسته خارجی و جدار نورگذر بر کاهش مصرف انرژی و زمان بازگشت سرمایه ساختمان‌های آموزشی در اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم*

مقاله پژوهشی

عباس مهروان^(۱)امیر یاری نژاد^(۲)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81531.1175

چکیده محیط داخلی راحت برای سلامتی، عملکرد و بازدهی تحصیلی دانش‌آموزان در مدارس ضروری می‌باشد. میزان بالای مصرف انرژی جهت تأمین شرایط آسایش محیطی در ساختمان‌های آموزشی ایران، این ساختمان‌ها را با مصرف انرژی بیش از ۱۶۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در زمره بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان بخش انرژی قرار داده است و نیاز به کاهش مصرف انرژی در این بخش از طریق راهکارهای هم‌ساز با محیط زیست ضروری است. هدف این تحقیق کاهش مصرف انرژی و تأمین شرایط آسایش در ساختمان‌های آموزشی از طریق ایجاد تغییرات در لایه‌بندی عناصر پوسته ساختمان شامل دیوارها و جدارهای نورگذر به عنوان یک راهکار ترکیبی ایستا است. روش تحقیق در این مطالعه به صورت کمی و مدل سازی آن از طریق استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر می‌باشد؛ و به بررسی وضع موجود و بهینه‌سازی انرژی ساختمان با متغیرهایی از قبیل نوع عایق حرارتی، ضخامت عایق حرارتی دیوارها، لایه‌بندی عایق، نوع و ضخامت شیشه، گازهای مابین جدار، ضخامت جدارها پرداخته شد. نتایج نشان داد که در ساختمان مورد مطالعه استفاده از عایق پلی‌اورتان در داخلی‌ترین لایه (لایه‌بندی شماره یک) کلاس درس‌های جنوبی و شمالی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر بهینه‌ترین عملکرد را داشته است. در کلاس درس شمالی جدار نورگذر دو جداره با شیشه کم‌گسیل و با ضخامت شیشه ۳ میلی‌متر و جدار میانی ۱۳ میلی‌متری گاز آرگون (پنجره نوع ۵) با ۲۸/۴۰ درصد کاهش مصرف انرژی و همچنین در کلاس درس جنوبی با پنجره‌های با جدار نورگذر سه‌جداره و شیشه معمولی ۳ میلی‌متر و ۱۳ میلی‌متر هوا (پنجره نوع ۷) با ۲۳/۰۴ درصد کاهش مصرف انرژی مناسب‌ترین عملکرد را در بین سایر پیکربندی‌ها داشته است. همچنین در محاسبه زمان بازگشت سرمایه مشخص شد که عایق پشم شیشه با زمان بازگشت سرمایه ۲۷/۹۲ سال مناسب‌ترین گزینه عایق‌کاری از جنبه بازگشت سرمایه است.

واژه‌های کلیدی مصرف انرژی، بهینه‌سازی انرژی، عملکرد حرارتی مدارس، عایق‌کاری حرارتی.

Investigating the Effect of Optimizing External Skins and Translucent Walls on Reducing Energy Consumption and Investment Return Time of Educational Buildings in a Temperate Climate with Dry and Very Hot Summers

Amir Yarinezhad

Abbas Mahravan

Abstract A comfortable indoor environment is essential for the health, performance, and academic efficiency of students in schools. The high amount of energy consumption to provide environmental comfort in Iran's educational buildings has placed these buildings among the biggest consumers of the energy sector with energy consumption of more than 160 kilowatt hours per square meter, and the need to reduce energy consumption in this sector through solutions It is necessary to be compatible with the environment. The purpose of this research is to reduce energy consumption and provide comfortable conditions in educational buildings by making changes in the layering of building shell elements including walls and light-transmitting walls as a static combination solution. The research method in this study is quantitative and its modeling through the use of Design Builder software; to examine the existing situation and optimize the energy of the building with variables such as; The type of thermal insulation, the thickness of the thermal insulation of the walls, the layering of the insulation, the type and thickness of the glass, the gases between the walls, the thickness of the walls were discussed. The results showed that in the studied building, the use of polyurethane insulation in the innermost layer (behind the carpentry plaster) of the south and north classrooms with a thickness of 10 cm had the most optimal performance. In the northern classroom, a double-paned light-transmitting wall with low-emissivity glass with a thickness of 3 mm and a middle wall of 13 mm argon gas with a 28.40% reduction in energy consumption, and in the southern classroom with windows with a triple-paned light-transmitting wall and normal glass. 3mm and 13mm of air have the best performance among other configurations with a 23.04% reduction in energy consumption. Also, in the calculation of the investment return time, it was found that glass wool insulation with an investment return time of 27.92 years is the most appropriate insulation option in terms of investment return.

Key Words Energy consumption, Energy optimization, Thermal performance of schools, Thermal insulat.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۱۴ می‌باشد.

Email: a.mahravan@razi.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندس معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندس معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

مقدمه

بر اساس گزارش اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده، انرژی مصرف شده در ساختمان‌های عمومی ۲۰/۱ درصد از کل انرژی را در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۴۰ تشکیل می‌دهد که این نسبت در سطح جهانی ۱/۵ درصد و در کشورهای غیر عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OCDE) سالانه ۲/۱ درصد افزایش یابد [1].

مصرف انرژی پس از رشد صنعت و شهرنشینی شدت یافته است، شهرنشینی با تأثیر بر تولید قادر است تا بر مصرف انرژی تأثیر روزافزون بگذارد [2].

تغییرات اقلیمی آب و هوای ایران را گرم‌تر و خشک‌تر خواهد کرد. این افزایش در سختی شرایط مرزی حصول اطمینان از عملکرد مناسب ساختمان‌هایی با کارایی بالا که خواص ترموفیزیکی پوسته‌های آن‌ها برای سازگاری با آب و هوای فعلی بهینه شده است را در شرایط آب و هوایی آتی ضروری می‌نماید [3].

در ایران حدود ۷۰ درصد از مصرف انرژی مرتبط با بخش ساختمان در ساختمان‌های عمومی و دولتی به مصرف می‌رسد [4]. همچنین مصرف انرژی در فضاهای آموزشی به عنوان یکی از مصرف کنندگان اصلی سوخت‌های فسیلی، موضوعی چالش برانگیز در سال‌های اخیر بوده است [5]. علی‌رغم مصرف بالای انرژی که توسط یارانه‌های انرژی ترویج می‌شود، ارزیابی‌های پس از بهره‌برداری (POE) نارضایتی حرارتی را در کلاس‌های درس گزارش می‌کنند [6]. از آنجایی که بخش ساختمان‌های عمومی از جمله مدارس نقشی مثال‌زدنی در رابطه با صرفه‌جویی انرژی برای کل جامعه دارند، به عنوان یکی از نقاط آغازین پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی در ایران به شمار می‌روند [7].

آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) اعلام کرد که ساختمان‌ها مصرف کننده اصلی انرژی در جهان هستند، به طوری که پوشش ساختمان مسئول ۳۶ درصد مصرف نهایی انرژی و ۳۹ درصد انتشار دی اکسید کربن (CO₂) در سال ۲۰۱۸ بوده است [8]. همچنین یکی از استراتژی‌های غیر فعال اصلی صرفه‌جویی در انرژی، استفاده از ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و اینرسی حرارتی برای حفظ آسایش حرارتی مطلوب داخل ساختمان و کاهش تقاضای انرژی ساختمان است [9].

ساکنان اصلی مدارس کودکان و نوجوانانی هستند که میزان تنفس آن‌ها بیشتر از بزرگسالان است و اندام‌ها و سیستم ایمنی آن‌ها هنوز در حال رشد است، به این معنی که آن‌ها در برابر آلاینده‌های داخل ساختمان و محیط‌های حرارتی نامطلوب آسیب‌پذیرتر هستند [10]. همچنین فضای کلاس درس در طول فرایند یادگیری دانش‌آموزان، تمرکز بیشتری برای بازدهی بیشتر نیاز دارد [11]. در این راستا، معماری و کیفیت محیط داخل به‌طور مستقیم بر توانایی‌های یادگیری کودکان تأثیر می‌گذارد [12]. یک محیط حرارتی نامطلوب می‌تواند بر سلامت و ظرفیت یادگیری دانش‌آموز تأثیر منفی داشته باشد [13]. از این رو، طراحی و بهره‌برداری تخصصی مدرسه می‌تواند آسایش حرارتی، سلامت و عملکرد دانش‌آموزان را ضمن کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بهبود بخشد [14].

شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد ساختمان‌های سرد و مرطوب تأثیر منفی بر سلامت و رفاه روانی دارند [15]. دمای سرد داخل ساختمان، با مشکلات تنفسی و قلبی عروقی، از جمله افزایش فشار خون و علائم آسم و همچنین بهزیستی روانی ضعیف‌تر مرتبط است [16]. زایلر و باکسم [17] نشان دادند که دمای گرم باعث کاهش عملکرد ساکنان خواهد شد، در حالی که دمای سرد باعث کاهش انعطاف جسمی (ductility) و سرعت اجرای کار می‌شود. همچنین، رطوبت بالا ممکن است به دلیل افزایش اصطکاک بین پوست و لباس ناشی از افزایش تعرق، باعث ناراحتی حرارتی بیشتری شود. از سوی دیگر، رطوبت کم می‌تواند موجب تشدید علائم تنفسی مانند آسم و سوزش چشم، بینی و گلو گردد [17].

عملکرد ضعیف انرژی ساختمان‌های موجود در بسیاری از کشورها سهم عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد [18]. حدود ۷۵ درصد از ساختمان‌های موجود در اروپا مصرف انرژی بالایی دارند [19]. در کانادا، بیشتر از ۵۰ درصد از ساختمان‌های مسکونی این کشور بیش از ۳۰ سال و ۲۰ درصد از این ساختمان‌ها بیشتر از ۵۰ سال از ساختشان می‌گذرد [20]. در جهان ساختمان‌های موجود عمدتاً از انواع انرژی تجدیدناپذیر استفاده می‌کنند که در حال تخریب مواد و مصالح ساختمانی و اجزای آن هستند [21-23]. در ایران، با توجه به ویرانی‌های ناشی از جنگ هشت‌ساله ایران-عراق از یک سو و رشد سریع جمعیت در دهه ۱۹۸۰ از سوی دیگر، امکان ساخت مدارس را در سطح وسیع و

یزد متعلق به عناصر دیوارها و پس از آن سقف و پنجره به ترتیب برابر با ۴۲ درصد ۳۳ درصد و ۸ درصد بود. نتایج نهایی اجرای تمامی سناریوها شامل نسبت مساحت دیوار و پنجره، مصالح به کار رفته و سایه‌اندازی حاکی از کاهش معنادار مصرف گاز طبیعی به میزان ۷۹ درصد در ایلام، ۷۴ درصد در یزد و ۶۳ درصد در تبریز بود. جانگ و همکاران [24]، در مطالعه خود در کره جنوبی، نشان دادند که سه راهکار شامل اصلاح پوسته خارجی ساختمان، روش‌های مقرون به صرفه گرمایش و ابعاد واحدهای ساختمانی می‌تواند باعث کاهش ۷۰٫۹ درصدی مصرف انرژی در سال شود. کونگدو و همکاران [30]، از روش بهینه‌یابی شامل پیکربندی عایق‌کاری (نوع، ضخامت) و انواع پیکربندی پنجره (شیشه، فواصل جدارها، ضخامت‌ها، قاب‌ها) در دو ساختمان مهد کودک و پیش‌دستانی موجود که سن، مصالح و سیستم‌های متفاوتی دارند در منطقه مدیترانه ارائه دادند. نتایج نشان داد که ترکیب پانل‌های الیاف کفنی با ضخامت ۶ سانتی‌متر، قاب چوبی برای پنجره‌ها، پمپ حرارتی متمرکز با منبع حرارت هوا، فن کویل برای انتشار با تهویه مکانیکی کنترل شده و سیستم فتوولتائیک متشکل از ۱۸ پنل با حداکثر توان ۴/۵ کیلووات و بازدهی ۱۷ درصد، به میزان ۸۵ درصد مصرف انرژی اولیه و ۸۲ تا ۸۳ درصد انتشار گازها را در هر ساختمان کاهش می‌دهد.

گوپتا و دب نشان دادند که عایق‌کاری پوشش ساختمان بیشترین تأثیر را در صرفه‌جویی انرژی دارد. متغیرهای جهت ساختمان و جرم حرارتی مصالح ساختمانی کمترین تأثیر را بر مصرف کل انرژی دارند. همچنین با ترکیب همه متغیرها و تهویه مناسب، یک ساختمان می‌تواند ۳۵ درصد انرژی سالانه و در برخی موارد تا ۶۰ درصد صرفه‌جویی کند [31].

کاتافیکیتو و همکاران [32]، در تحقیقی، جزئیات اجرایی شیوه‌های معمول و مصرف انرژی به روش شبیه‌سازی را در ساختمان دبیرستان‌های سه منطقه آب و هوایی، ساحلی، داخلی و کوهستانی کشور قبرس را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها شش سناریوی بهینه‌سازی (افزودن پلی استایرن اکستروژ شده ۵ سانتی‌متری روی سقف، افزودن پلی استایرن اکستروژ شده ۵ سانتی‌متری بر روی دیوارهای پوسته خارجی و سقف، تعویض پنجره‌های تک‌جداره با دوجداره، کاهش تهویه مطبوع، افزایش راندمان سیستم گرمایش و سرمایش، نصب سلول‌های خورشیدی در پشت بام ساختمان) را تحلیل کردند و نتایج نشان داد، افزودن

با کمترین هزینه ممکن فراهم کرد، چنین ساخت و سازهایی بدون توجه به تغییرات آب و هوایی، معمولاً با مصالح و روش‌های ساخت و ساز با کیفیت پایین اجرا شده‌اند. در نتیجه، بیش از صد هزار مدرسه با مصرف انرژی بیش از ۱۶۰ کیلووات ساعت بر مترمربع پس از پایان جنگ مذکور ساخته شد که حدود ۲٫۵ برابر بیشتر از مصرف انرژی در کشورهای توسعه یافته (با نرخ متوسط ۶۵ کیلووات ساعت در مترمربع) برای مدارس معمولی است [7]. بنابراین، ساختمان‌های موجود انرژی بیشتری مصرف می‌کنند و در نتیجه گازهای گلخانه‌ای بیشتری را در مقایسه با ساخت و سازهای جدید انتشار می‌دهند [24,25]. مطالعات نشان داده‌اند که شرایط محیطی داخلی در زیرساخت‌های آموزشی به شدت به ویژگی‌های معماری و جزئیات اجرایی که شامل چیدمان، جهت‌گیری، پیکربندی (configuration)، ویژگی‌های پوشش حرارتی ساختمان، نسبت پنجره به دیوار و سایه‌بان خارجی ساختمان‌ها بستگی دارد [26]. همچنین سطح آسایش حرارتی داخل ساختمان نه تنها بر محیط حرارتی داخلی تأثیر می‌گذارد، بلکه بر مصرف انرژی ساختمان نیز تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، هر چه آسایش حرارتی ساختمان بیشتر باشد، مصرف انرژی آن نیز بیشتر است [27].

پیشینه تحقیق

ساداتی و همکاران [28]، عملکرد حرارتی یک ساختمان را با استفاده از روش شبیه‌سازی در سه منطقه مختلف اقلیمی ایران (اقلیم گرم کویر، نیمه‌خشک سرد و آب و هوای مدیترانه‌ای قاره‌ای) مورد بررسی قرار دادند. بر اساس یافته‌ها، انتخاب مصالح دیواری مناسب بر اساس شرایط آب و هوایی می‌تواند بارهای گرمایشی و سرمایشی سالانه و همچنین انتشار دی‌اکسید کربن را به ترتیب تا ۲۳/۲، ۲۶/۴ و ۱۸/۵ درصد کاهش دهد. بر اساس تحلیل‌های اقتصادی، زمان بازپرداخت بین ۱/۷ تا ۱۷ سال بسته به شرایط اقلیمی و نوع دیوارهای خارجی متغیر است [28]. یوسفی و همکاران [29]، عملکرد انرژی ساختمان ۹ مدرسه دولتی را با هدف ارزیابی پوسته آن‌ها در سناریوهای مختلف در سه شهر ایران شامل ایلام، تبریز و یزد را شبیه‌سازی کردند، نتایج نشان داد که مصرف گاز طبیعی برای گرمایش در همه سناریوهای از پیش تعیین شده به جز سناریوی اضافه کردن سایه‌اندازی پنجره، کاهش یافته است. بیشترین کاهش مصرف انرژی در شهر

ساختمان دانمارک مطابقت داشته باشد. همچنین از طریق نصب یک سیستم فتوولتائیک ۲۰ کیلوواتی بر روی پشت‌بام، ساختمان را در رده ساختمان کم انرژی با مصرف انرژی ۴۱/۳۹ کیلووات ساعت بر مترمربع قرارداد.

م. تحصیلدوست و همکاران [7]، در تحقیق سه مرحله‌ای شامل؛ ارزیابی اولیه عملکرد ساختمان و ارائه پیشنهادهای مقاوم‌سازی، بهینه‌سازی و اولویت‌بندی سناریوها بر اساس شبیه‌سازی انرژی و زمان بازگشت (PBT) و ارزیابی تکنیک‌های اجرا شده، به ارائه روش مقاوم‌سازی دو مدرسه معمولی ساخته شده قبل و بعد از سال ۲۰۰۰ در تهران- ایران پرداختند. آن‌ها نشان دادند که هوابندی، تعویض نوع پنجره و عایق‌کاری سقف از کارآمدترین سناریوها برای بازسازی هستند. علاوه بر کاهش مصرف انرژی ۲۹/۸۷ درصدی در ساختمان قدیمی و ۳۸/۲۹ درصدی در ساختمان جدید، پس از اجرای مقاوم‌سازی در بررسی‌های پرسشنامه‌ای نیز بهبود کیفیت محیط داخلی را تأیید کرد.

راجی و همکاران [36]، سعی کردند اندازه ابعاد بهینه پنجره را برای ساختمان‌های اداری در سه اقلیم مختلف معتدل، نیمه‌گرمسیری و گرمسیری پیدا کنند. آن‌ها دریافتند که نسبت پنجره به دیوار بهینه، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد برای آب و هوای معتدل، بین ۳۵ تا ۴۵ درصد برای آب و هوای نیمه‌گرمسیری و بین ۳۰ تا ۴۰ درصد در آب و هوای گرمسیری می‌باشد. در آب و هوای گرم و خشک که آسمان صاف و تشعشعات خورشیدی شدید است، جدارهای بزرگ می‌توانند نور روز را بیشتر کنند اما بار سرمایشی را افزایش می‌دهند. همچنین ال دیب [37]، اظهار داشت که نسبت پنجره به دیوار بهینه باید بین ۸ تا ۱۵ درصد در ساختمان‌های مسکونی مصر باشد.

م. طاهباز و همکاران [38]، در پژوهشی به بررسی هم‌زمان درصد سطوح شفاف نما و جهت‌گیری بنا بر میزان مصرف انرژی مدارس در اقلیم معتدل و مرطوب ایران پرداختند، نشان دادند که جهت‌گیری بهینه بنا سمت جنوب است و همچنین درصد بهینه سطوح شفاف بنا بسته به جهت‌گیری می‌تواند ۴۰ تا ۵۵ درصد متغیر باشد.

با توجه به مطالعات قبلی، عایق‌بندی تمامی پوشش‌ها و پوشش کم گسیل پنجره‌های موجود [39-44]، سیستم سایه‌بان متحرک خارجی، طراحی و نصب سیستم مدیریت انرژی از راه

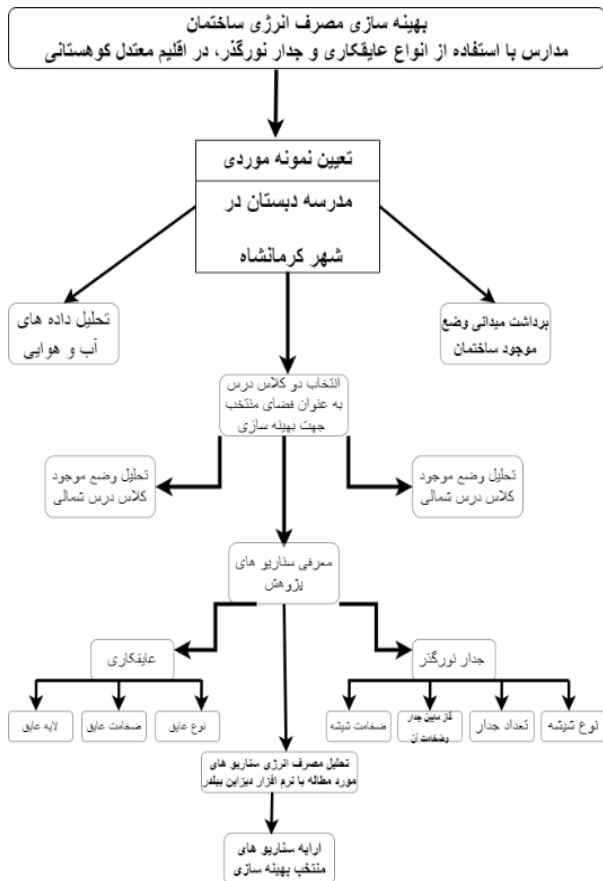
پلی استایرن اکستروژ شده ۵ سانتی‌متری روی سقف ۱۶/۵ درصد، هم‌زمان روی دیوارها و سقف ۳۱/۹ درصد، تعویض پنجره‌های تک‌جداره با دوجداره ۳/۶ درصد و افزایش راندمان سیستم گرمایش و سرمایش ۲۳/۵ درصد باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود.

الویتیشی و همکاران [33]، تأثیر عایق حرارتی، نسبت پنجره به دیوار و ترکیبی از این عوامل را بر ساختمان مدرسه‌ای در شهر طائف عربستان سعودی با آب و هوایی گرم، با استفاده از برداشت‌های میدانی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که ترکیبی از عایق حرارتی همراه با به حداقل رساندن نسبت پنجره به دیوار در ساختمان‌های موجود در مناطق گرم و خشک مورد نیاز است. عایق حرارتی باید در لایه بیرونی دیوارهای خارجی و به ویژه در کلاس‌های رو به جنوب و مرتبط با جنوب از جمله جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی اعمال شود. نماهای شمالی به دلیل به حداقل رساندن هزینه‌های اصلاح باقی می‌ماند علاوه بر این، توصیه شد که نسبت پنجره به دیوار نباید برای نمای ساختمان‌های شمال غربی، جنوب شرقی و جنوب غربی به ترتیب از ۳۵٪، ۲۵٪ و ۲۰٪ تجاوز کند.

جی هان پارک و همکاران [34]، در تحقیق خود به بررسی یک ساختمان آموزشی هنرستان چهار طبقه با مساحت ۳۸۸۳ مترمربع پرداختند، که با تبدیل سالن سخنرانی به سالن موسیقی و حذف پنجره‌های آن و همچنین سایه‌اندازی بر روی پوسته خارجی ساختمان و اعمال مواد تغییر فاز دهنده موجب کاهش ۴۴ درصدی مصرف انرژی و افزایش ۳۴ درصدی ساعات آسایش حرارتی شدند.

م. جرادی و همکاران [35]، بهینه‌سازی عمیق انرژی یک ساختمان اداری در دانمارک را بررسی کردند و نتایج تحقیق نشان داد که مصرف انرژی اولیه کلی ساختمان به اندازه ۱۷۶/۱۱ کیلووات ساعت بر مترمربع در بخش مصرف انرژی گرمایشی است که ۶۵ درصد آن برای گرمایش فضا و آب گرم خانگی است. بر این اساس، ۸ سناریوی پیشنهادی بهینه‌سازی عمیق انرژی شامل، مجموعه روشنایی کارآمد، حسگرهای نور روز در فضاهای باز و راهروها، عایق‌کاری سقف و دیوارهای بیرونی و کنترل نقطه تنظیم و شروع گرمایش تحلیل شد. این مجموعه بهینه‌سازی انرژی مصرف انرژی اولیه را به ۷۰/۴۴ کیلووات ساعت بر مترمربع کاهش داد تا ساختمان با مقررات انرژی

عنوان فضای منتخب، جهت بهینه‌سازی انرژی مصرفی به وسیله نرم‌افزار دیزاین بیلدر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی اعم از عایق‌کاری حرارتی در انواع پیکربندی‌ها شامل: نوع عایق، ضخامت عایق، موقعیت عایق در لایه‌بندی و همچنین پیکربندی جدار نور گذر در انواع ضخامت شیشه، گازهای مابین جداره، نوع شیشه، تعداد جدار پرداخته شده است.



شکل ۱ فرایند انجام پژوهش

اقلیم و مکان مورد مطالعه

طبق سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن (Köppen-Geiger)، اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم، از نوع Csa معمولاً میان عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه تا ۴۵ درجه دیده می‌شود که از ویژگی‌های آن میانگین دمای بیشتر از ۱۰ درجه سلسیوس در گرم‌ترین ماه سال است [46]. آب و هوای معتدل «Csa» با تابستان‌های خشک و بسیار گرم بر بخش وسیعی از مناطق کوهستانی البرز در شمال و زاگرس در غرب کشور را در بر گرفته

دور [42]، جایگزینی سیستم تهویه مکانیکی موجود با سیستم جدید تهویه طبیعی طراحی شده [45] به عنوان روش‌های مقاوم سازی انرژی مؤثر ذکر شده است از ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش تقاضای انرژی اولیه سالانه را در شرایط مختلف آب و هوایی ممکن کند. با توجه به پیشینه پژوهش، بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که سازمان‌های بین‌المللی، محققان و سیاستمداران کشورها درصدد بهینه‌سازی مصرف انرژی بخش ساختمان‌های موجود با سن زیاد بدون تخریب آن هستند. مطالعات انجام‌شده همگی نشان‌دهنده اهمیت این موضوع هستند و راهکارهای متنوعی نیز ارائه کرده‌اند. این تحقیق می‌تواند این سؤال را که «راهبردهای غیر فعال بهینه‌سازی پوسته خارجی ساختمان تا چه میزان می‌تواند در مصرف انرژی ساختمان مدارس موجود با عمر بیش از سی سال تأثیر مثبت و قابل توجهی داشته باشد؟» پاسخ دهد.

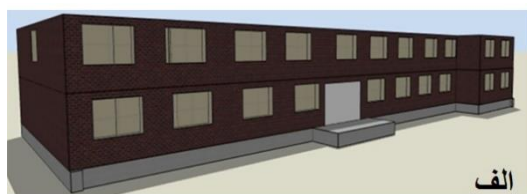
همچنین در مطالعات محدودی به پیکربندی انواع تنظیمات عایق‌کاری و جدار نور گذر با توجه به سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن پرداخته شده است. در این تحقیق به معیار بازگشت سرمایه بهینه‌سازی انرژی پرداخته شده است که مطالعه خاصی با این رویکرد در ایران و اقلیم‌های مرتبط با آن انجام نشده است. همچنین مطالعات بر روی عایق‌های پسماند کشاورزی بسیار محدود می‌باشد که در این تحقیق به بررسی رفتار حرارتی عایق پسماند کشاورزی نیز پرداخته شده است.

روش‌شناسی تحقیق

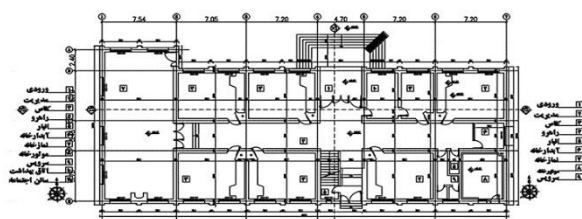
روش تحقیق در این پژوهش مدل‌سازی و شبیه‌سازی و استفاده از برداشت‌های میدانی است. هدف این پژوهش دستیابی به مصرف انرژی کارآمد با استفاده از بهینه‌سازی انرژی در ساختمان موجود یک دبستان در اقلیم شهر کرمانشاه است. در راستای رسیدن به هدف پژوهش به شناخت رفتار حرارتی و شرایط آسایش در ساختمان مرجع و سپس ارائه بهینه‌سازی انرژی با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر (Design Builder) نسخه ۶/۱ پرداخته شد. مراحل و فرایند انجام این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. در ابتدا نمونه موردی انتخاب شده و با بازدیدهای میدانی اطلاعات فنی ساختمان برداشت شد و سپس به تحلیل وضع موجود ساختمان پرداخته و دو کلاس درس به

است [47].

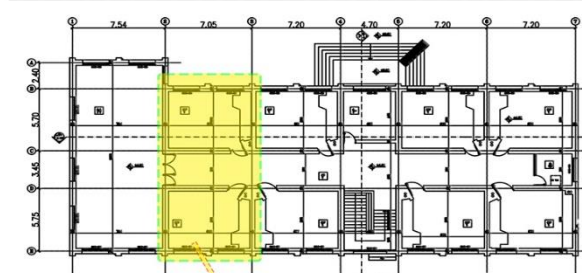
دیگر مورد بررسی قرار گرفتند، یکی از کلاس‌ها در جبهه جنوبی ساختمان و کلاس دیگر در جبهه شمالی ساختمان قرار دارد. همچنین فضاهای مجاور کلاس‌های درس به عنوان فضای کنترل نشده، جهت ارائه دقیق‌تر نتایج مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳ (الف) نمای مدل‌سازی شده ساختمان در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، (ب) وضع موجود ساختمان مدرسه احسان



طبقه همکف

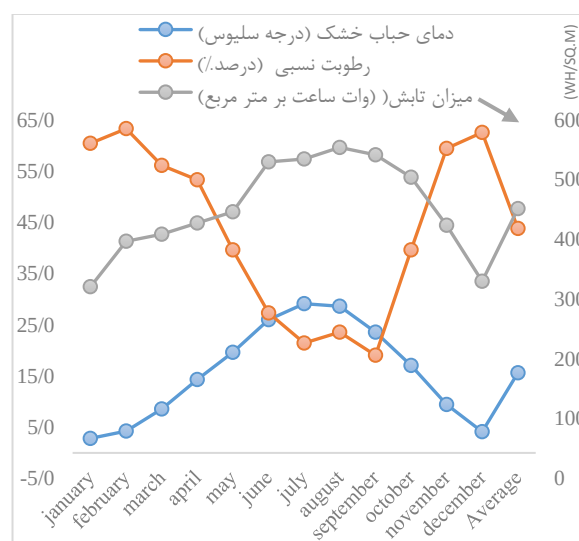


طبقه اول



شکل ۴ بالا: پلان طبقه هم‌کف و اول ساختمان مدرسه احسان / پایین: فضای منتخب در دو کلاس درس شمالی و جنوبی

با توجه به این طبقه‌بندی، مکان مورد مطالعه، شهر کرمانشاه - ایران، با معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم با موقعیت جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۰۵ متر از سطح دریا است. مطابق شکل (۲) که میانگین دمای هوای ماهانه، میزان تابش و رطوبت نسبی مکان مورد مطالعه را نشان می‌دهد، میانگین دمای هوای ماهانه ۱۵/۶۳ درجه سلسیوس، میانگین رطوبت نسبی ۴۳/۸ درصد و میانگین میزان تابش خورشیدی ۴۵۱/۵ وات ساعت بر مترمربع می‌باشد. همچنین میانگین سرعت باد در این اقلیم ۲/۴۸ متر بر ثانیه است.



شکل ۲ میانگین دمای هوای ماهانه، میزان تابش و رطوبت نسبی شهر کرمانشاه

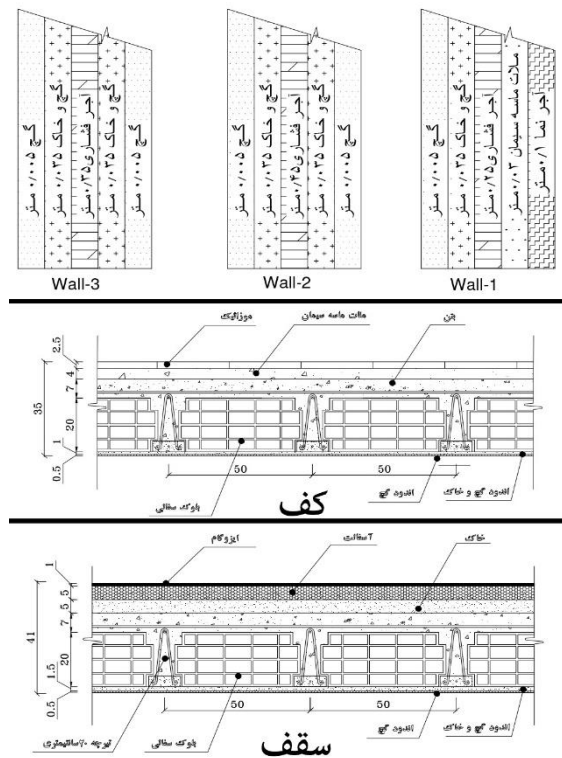
ساختمان مورد مطالعه

ساختمان مورد مطالعه در این پژوهش مدرسه‌ای دو طبقه ۱۴ کلاسه با نام احسان (شکل ۳)، واقع در شهر کرمانشاه- ایران به مساحت ۱۳۱۰ مترمربع زیربنا می‌باشد. پلان‌های این ساختمان در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس برداشت‌های میدانی و به عمل آمده از ساختمان و همچنین با استفاده از نقشه‌های ازبیلست تهیه شده از سازمان نوسازی مدارس استان کرمانشاه، مشخصات ترموفیزیکی مصالح استفاده شده در این ساختمان در جدول (۱) نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی ساختمان موجود دو کلاس درس مطابق شکل (۴) به ابعاد ۶/۶*۵/۲ متر به عنوان فضای نمونه و نماینده فضاهای

جدول ۱ مشخصات ترموفیزیکی مصالح استفاده شده در ساختمان

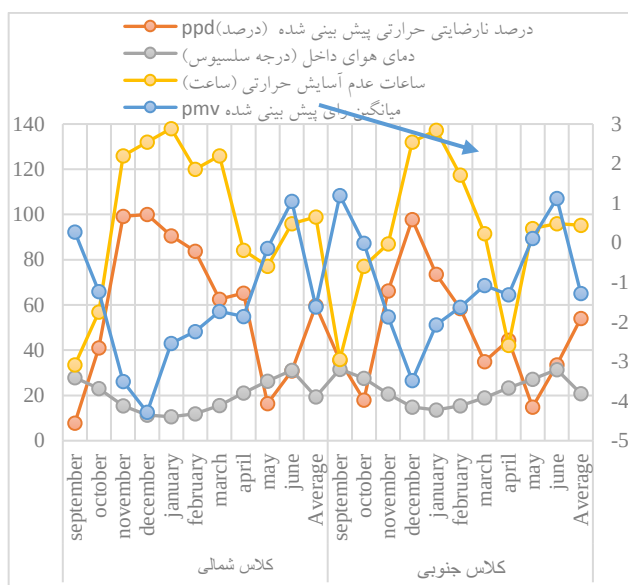
مشخصات مصالح ساختمان مرجع				
گرمای ویژه	چگالی	هدایت حرارتی	ضخامت	متریال
j/kg-k	kg/m ³	w/m.k	m	
800	1700	0.84	0.1	آجرنما
840	1860	0.72	0.03	ملات ماسه سیمان
840	1920	0.72	0.22	آجر فشاری
840	1680	1.1	0.035	ملات گچ و خاک
1000	1000	0.57	0.005	گچ نازک کاری
1000	1100	0.23	0.004	ایزوگام
1000	2100	0.7	0.05	آسفالت
180	2050	0.52	0.05	خاک بر پایه شن
840	500	0.16	0.07	بتن هوادهی
840	2200	1.4	0.2	کرسی چینی سنگی
880	1890	1.35	0.025	موزاییک کف
مشخصات بازشوهای ساختمان مرجع				
هدایت حرارتی	پروفیل قاب	ضخامت شیشه	تعداد جدار	نوع شیشه
۰/۹	فولادی	۳ میلی متر	۱	ساده



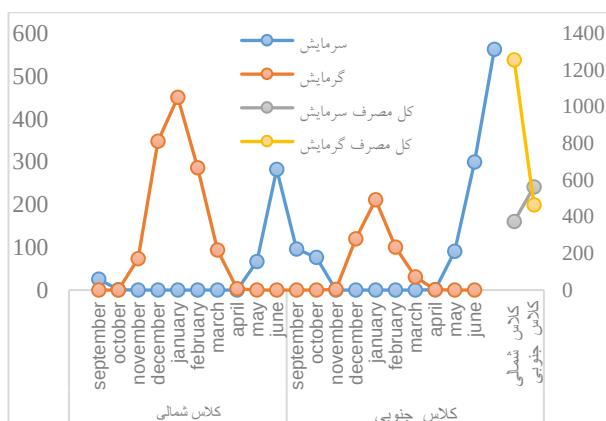
شکل ۵ جزئیات اجرایی انواع دیوار، کف و سقف ساختمان نمونه

رفتار حرارتی ساختمان موجود

در شبیه‌سازی کلاس‌های مورد مطالعه، به تحلیل شاخص‌های آسایش حرارتی ساختمان (شکل ۶) و میزان مصرف انرژی (شکل ۷) پرداخته شد.



شکل ۶ بررسی آسایش حرارتی در وضع موجود ساختمان



شکل ۷ میزان مصرف انرژی در فضاهای مورد مطالعه ساختمان

شکل (۶) آمار شاخص‌های آسایش حرارتی و دمای هوا در کلاس‌های شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد که شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده (pmv) در طول دوره بهره‌برداری (دهم شهریور ماه تا دهم تیر ماه)، در کلاس شمالی برابر ۱/۳۹- و در کلاس جنوبی ۰/۹۴- است. میانگین شاخص درصد نارضایتی حرارتی پیش‌بینی شده (ppd) در کلاس شمالی ۵۵/۷۷ درصد و

مطابق با شکل (۵) دیوار کلاس‌های مورد مطالعه از سه تیپ با نام wall1_3 تشکیل شده‌اند. wall1 دیوارهای خارجی، wall2 دیوارهای غربی و دیوارهای مجاور راهرو و wall3 دیوارهای شرقی که در جدول (۱) همراه با مشخصات ترموفیزیکی سقف و کف نشان داده شده است

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

در این مطالعه داده‌های آب و هوایی از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی و نرم‌افزار (Climate consultant) تهیه شد و شبیه‌سازی ساختمان با استفاده از نقشه‌های ازبیلت و استخراج از نرم‌افزار اتوکد در نرم‌افزار دیزاین بیلدر نسخه ۶/۱ با استفاده از فایل Epw وارد شد. مصالح و جزئیات استفاده شده در ساختمان از سازمان نوسازی مدارس استان کرمانشاه و بازدیدهای میدانی تهیه گردید.

در ساختمان مرجع، دوره فعالیت مدرسه از دهم شهریور ماه تا دهم تیر ماه و برنامه ساعتی فعالیت ساختمان از ساعت ۸ تا ۱۴ می‌باشد که دو روز تعطیلات در هر هفته نیز لحاظ شده است، همچنین نرخ متابولیک فعالیت افراد خردسال ۰/۷۵ و ضریب لباس ساکنان نیز در زمستان ۱/۰۰ و در تابستان ۰/۵۰ در نظر گرفته شده است. دمای نقطه شروع گرمایش ۲۰ درجه سلسیوس و دمای نقطه شروع سرمایش برابر ۲۸ درجه سلسیوس مطابق مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران است و همچنین دمای شروع تهویه طبیعی نیز ۲۴ درجه سلسیوس در نظر گرفته است که مطابق با کتابخانه انرژی پلاس است.

در کلاس‌های عمومی این ساختمان هیچ گونه کامپیوتر و تجهیزات اداری برقی وجود ندارد، بر همین مبنا در این مطالعه از چگالی و مصرف انرژی کامپیوتر و تجهیزات اداری در تمام فضا صرف نظر شده است. روشنایی مصنوعی در این ساختمان نیز با توجه به برنامه زمانی آن خاموش فرض شده است. سیستم سرمایش ساختمان با استفاده از کولر آبی با ضریب بازدهی (COP) ۰/۷۰ و گرمایش آن با استفاده از سیستم موتورخانه مرکزی و میزان ضریب بازدهی ۰/۸۵ می‌باشد. همچنین ضریب نشت و نفوذ هوا (infiltration)، برابر ۰/۵ تعویض هوا در ساعت (Ac/h) می‌باشد و از میزان انرژی برای آب گرم مصرفی در این مطالعه چشم‌پوشی شده است.

انرژی ساختمان در شکل (۷)، افزودن عایق پلی اورتان به جدار خارجی کلاس درس شمالی، منجر به کاهش ۱۴/۰۷ درصدی (۱۷۶،۵ کیلووات ساعت) مصرف انرژی گرمایشی در طول دوره و کاهش ۱/۵ درصدی ساعات عدم آسایش شده است. همچنین با توجه به پدیده آنتی اینزولیشن مصرف سرمایش ساختمان، ۷/۶۶ درصد (۲۸/۷ کیلووات ساعت) افزایش یافته است. لازم به ذکر است که در کلاس درس شمالی، عایق پلی اورتان مناسبترین عملکرد را در بخش مصرف انرژی گرمایش، مواد طبیعی با روکش الیافی گیاهان مناسبترین عملکرد را در بخش مصرف انرژی سرمایش داشته است. در کلاس درس جنوبی نیز عایق پلی اورتان با ۱۶/۵۱ درصد (۷۶/۷ کیلووات ساعت) مناسبترین عملکرد را در بخش مصرف انرژی گرمایش و مواد طبیعی - روکش الیاف گیاهی با ۵/۱۴ درصد (۲۸/۹ کیلووات ساعت) مناسبترین عملکرد در بخش مصرف انرژی سرمایشی را دارد. همچنین عایق پلی اورتان با ضخامت ۵ سانتی متر در کل دوره شبیه سازی در کلاس درس شمالی با احتساب پدیده آنتی اینزولیشن به میزان ۹ درصد (۱۴۷/۸ کیلووات ساعت) کاهش مصرف انرژی سرمایش و گرمایش داشته است. این میزان در کلاس درس جنوبی برابر با ۴ درصد (۴۰/۷ کیلووات ساعت) است. البته با توجه به اینکه کل مصرف انرژی سرمایش در مدل بدون عایق در کلاس شمالی ۳۷۵ کیلووات ساعت و در کلاس جنوبی ۵۶۲ کیلووات ساعت است می توان از افزایش مصرف انرژی به دلیل پدیده آنتی اینزولیشن چشم پوشی کرد. عملکرد عایق های دیگر، در شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات انواع عایق های مورد مطالعه

مشخصات ترموفیزیکی عایق ها			
نوع عایق	چگالی	گرمای ویژه	هدایت حرارتی
	kg/m ³	J/kg-k	w/m.k
پلی استایرن منبسط شده (eps)	15	1400	0.040
پلی استایرن اکستروژ شده (xps)	35	1400	0.034
پشم شیشه	20	840	0.036
پشم سنگ	40	840	0.038
پلی یورتان	30	1470	0.028
مواد طبیعی - پوسته برنج	120	1000	0.051

کلاس جنوبی ۴۸/۰۷ درصد می باشد. هر چند که میانگین دوره شاخص pmv در کلاس شمالی در ماه سپتامبر در محدوده آسایش قرار دارد اما مطابق با شکل و شاخص ساعات عدم آسایش حرارتی نشان می دهد که اکثر روزهایی که ساختمان در حال بهره برداری است، فضای مورد نظر در محدوده آسایش قرار ندارد و نشان دهنده هوای سرد فضا در کل دوره به خصوص سه ماه زمستان است. همچنین میزان ساعت عدم آسایش حرارتی در کلاس شمالی ۹۳۸ ساعت و در کلاس جنوبی ۸۳۸/۲ ساعت است.

با توجه به شکل (۷) میزان مصرف انرژی در فضاهای کلاس درس مورد نظر در جبهه شمالی و جنوبی در طول دوره بهره برداری بررسی شد و نشان داد که مصرف انرژی گرمایش کل دوره مذکور در کلاس درس شمالی ۱۲۵۴/۲ کیلووات ساعت و کل مصرف انرژی سرمایشی کلاس درس شمالی ۳۷۴/۲ کیلووات ساعت است. همچنین، در کلاس درس جنوبی، مصرف انرژی گرمایش کل دوره برابر با ۴۶۴/۳ کیلووات ساعت و مصرف انرژی سرمایش ۵۶۲/۴ کیلووات ساعت در کل دوره بهره برداری ساختمان در یکسال است.

یافته ها و نتیجه گیری

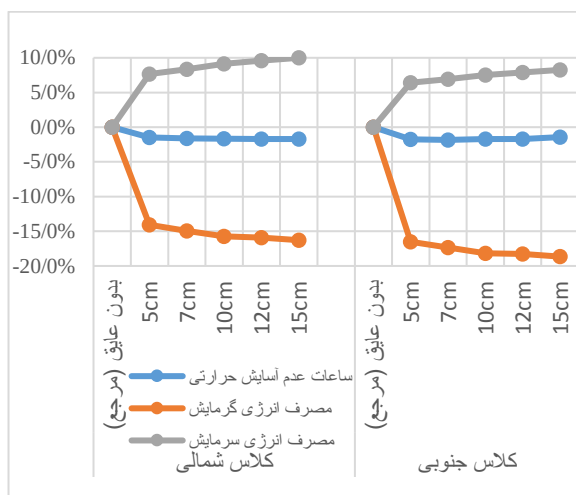
پیکربندی عایق کاری

در بهینه سازی دو کلاس درس مورد مطالعه در مرحله اول شبیه سازی، به انواع عایق بندی حرارتی دیوار خارجی با توجه به جدول (۲) با ضخامت پیش فرض ۵۰ میلی متر و در لایه بندی تیپ ۱ مطابق شکل (۱۰) پرداخته شد.

نوع عایق. جدار خارجی فضای مورد نظر با ۶ نوع عایق حرارتی مختلف شامل، پلی استایرن منبسط شده (eps)، پلی استایرن اکستروژ شده (xps)، پشم شیشه، پشم سنگ، پلی یورتان، مواد طبیعی - پوسته برنج در دو جبهه شمالی و جنوبی بررسی شد که مشخصات انواع عایق های مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۸)، بهینه یابی ۶ عایق حرارتی به ضخامت ۵ سانتی متر، در جدار خارجی کلاس های درس شمالی و جنوبی شبیه سازی شد و نتایج نشان می دهد که ۶ نوع عایق حرارتی تقریباً عملکرد یکسانی داشتند. با توجه به وضع موجود مصرف

کاهش مصرف انرژی گرمایش به ترتیب به میزان ۱۶,۵۱، ۱۷,۳۶، ۱۸,۱۶، ۱۸,۲۷، ۱۸,۶۵ درصد را نشان می‌دهد و در مصرف انرژی سرمایش با ایجاد پدید آنتی اینزولیشن به ترتیب به میزان ۶,۹۱، ۷,۵۳، ۷,۹۱، ۸,۲۵ درصد افزایش مصرف انرژی داشته است.

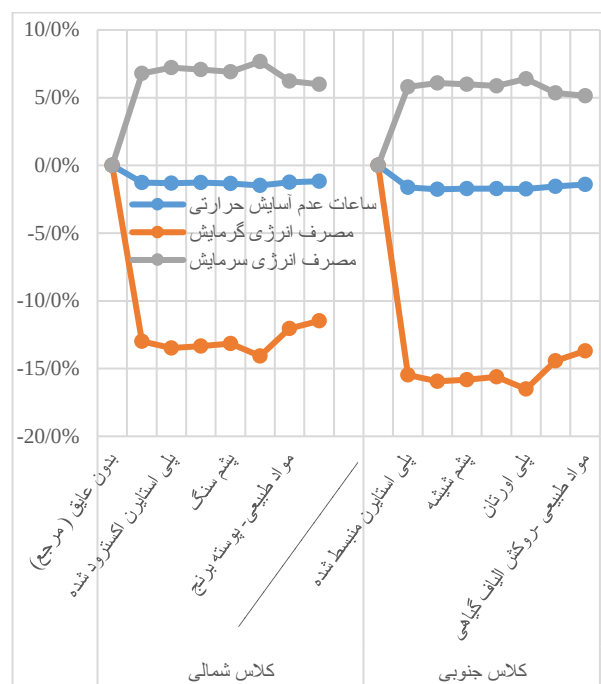


شکل ۹ تأثیر ضخامت عایق پلی اورتان بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی

با توجه به مطالب گفته شده در بخش ضخامت عایق و با توجه به اختلاف ناچیز مصرف انرژی و آسایش حرارتی مابین ضخامت ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری و اختلاف ۱/۵ برابری در هزینه افزایش ضخامت و همچنین اشغال کردن فضای معماری، می‌توان عایق پلی اورتان را به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر به عنوان ضخامت بهینه در نظر گرفت.

اثر موقعیت عایق در دیوار. موقعیت عایق در لایه‌های مختلف دیوار می‌تواند تأثیر به‌سزایی در عملکرد عایق‌کاری حرارتی داشته باشد، به همین دلیل در این تحقیق اثر موقعیت عایق پلی اورتان ۱۰ سانتی‌متری در راستای ادامه مباحث قبلی در ۴ الگوی لایه‌بندی عناصر بررسی شده است که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

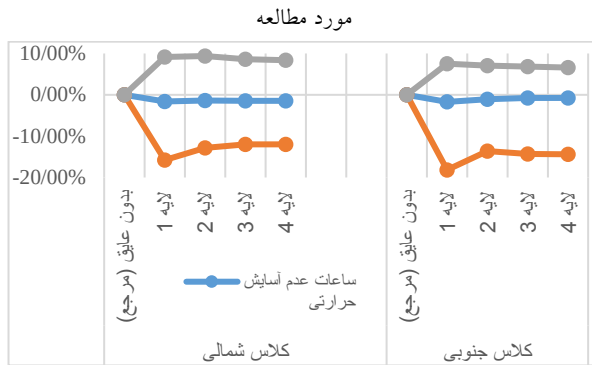
مطابق شکل (۱۱) نتایج شبیه‌سازی نشان داد که موقعیت عایق با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در لایه پشت گچ نازک‌کاری (لایه ۱) مناسب‌ترین عملکرد را داشته است به صورتی که مصرف انرژی سرمایش و گرمایش همان نتایج بخش قبلی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متری است. در بخش‌های قبلی عایق پلی اورتان نیز در



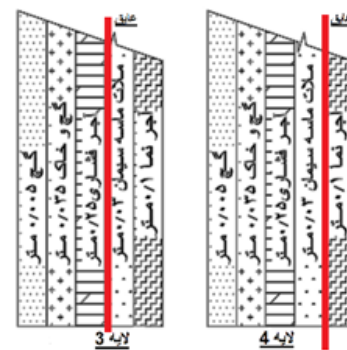
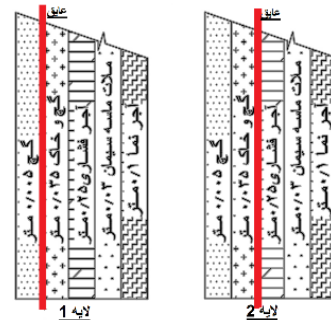
شکل ۸ تأثیر انواع عایق‌ها با ضخامت ۵ سانتی متر بر مصرف انرژی فضاهای مورد مطالعه

ضخامت عایق. عایق پلی اورتان موجود در بازار از نوع پاششی است و اجرا کننده می‌تواند در ضخامت‌های متغیری عملیات پاشش عایق را اجرا کند، و در این مطالعه ضخامت‌های ۵-۷-۱۵-۱۲-۱۰ سانتی‌متر شبیه‌سازی شد. از این رو عایق پلی اورتان که در بخش قبلی از انواع عایق به عنوان مناسب‌ترین عایق شناخته شد. با توجه به شکل (۹) نتایج نشان داد که عایق پلی اورتان با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر نسبت به ضخامت ۵ سانتی‌متری به میزان ۲/۵۷ درصد کاهش بیشتری در گرمایش کلاس درس داشته است و نسبت به مدل مرجع (بدون عایق)، در کلاس درس شمالی منجر به کاهش ۱۶/۲۸ درصد (۲۰۴/۱ کیلووات ساعت) مصرف انرژی شده است، همچنین در بخش سرمایش عایق پلی اورتان با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر ۱۰ درصد (۳۷/۴۱ کیلووات ساعت) نسبت به مدل مرجع افزایش مصرف انرژی داشته است، علاوه بر این عایق پلی اورتان در مجموع سرمایش و گرمایش کلاس درس شمالی موجب کاهش ۱۰/۲۴ درصدی (۱۶۶/۷۱ کیلووات ساعت) شده است. همچنین عایق پلی اورتان ۱۵ سانتی‌متری موجب کاهش ساعات عدم آسایش به میزان ۱/۷۲ درصد در کلاس درس شمالی شده است.

با توجه به شکل (۹)، در کلاس درس جنوبی نیز ضخامت‌های ۵-۷-۱۰-۱۲-۱۵ شبیه‌سازی شد که نتایج آن،



موقعیت پشت گچ داخلی (لایه ۱) قرار داشت و در ادامه در ۳
موقعیت دیگر سنجیده شد که شامل لایه ۲ و لایه ۳ و لایه ۴
است.



شکل ۱۰ موقعیت عایق در لایه‌بندی‌های مختلف دیوار خارجی فضاهای

شکل ۱۱ تأثیر موقعیت عایق پلی اورتان ۱۰ سانتی‌متری در مصرف انرژی و
آسایش حرارتی

پیکربندی جدار نور گذر

در راستای کاهش میزان انتقال حرارتی از جدار نور گذر و
همچنین کاهش اتلاف حرارتی آن که به نسبت بیشتر از حد
استاندارد معمول بوده است، ۹ نوع پیکربندی جداره نورگذر
مورد بررسی قرار گرفت. که در جدول (۳) نشان داده شده است
و ضخامت شیشه‌ها، تعداد جداره، گاز میانی جدارها، ضخامت
گاز مابین جدارها در این ۹ نوع پیکربندی متفاوت است.

جدول ۳ پیکربندی‌های مختلف جدار نور گذر

پیکربندی‌های مختلف جدار نور گذر							
ضخامت گاز جدار میانی (میلی‌متر)	گاز جدار میانی	ضخامت شیشه (میلی‌متر)	ضریب انتقال حرارت (u-value, W (M2.K))	ضریب (SHGC) شیشه	نوع شیشه	تعداد جدار	
*	*	3	5.894	0.861	معمولی	1	مرجع
6	هوا	3	3.159	0.762	معمولی	2	پنجره نوع 1
13	هوا	6	2.665	0.703	معمولی	2	پنجره نوع 2
13	آرگون	6	2.511	0.704	معمولی	2	پنجره نوع 3
13	هوا	3	1.786	0.598	کم گسیل در جداره داخلی	2	پنجره نوع 4
13	آرگون	3	1.512	0.597	کم گسیل در جداره داخلی	2	پنجره نوع 5
13	هوا	6	1.761	0.568	کم گسیل در جداره داخلی	2	پنجره نوع 6
13	هوا	3	1.757	0.684	معمولی	3	پنجره نوع 7
13	هوا	3	0.982	0.474	کم گسیل در جداره خارجی	3	پنجره نوع 8
6	هوا	3	2.178	0.682	معمولی	3	پنجره نوع 9

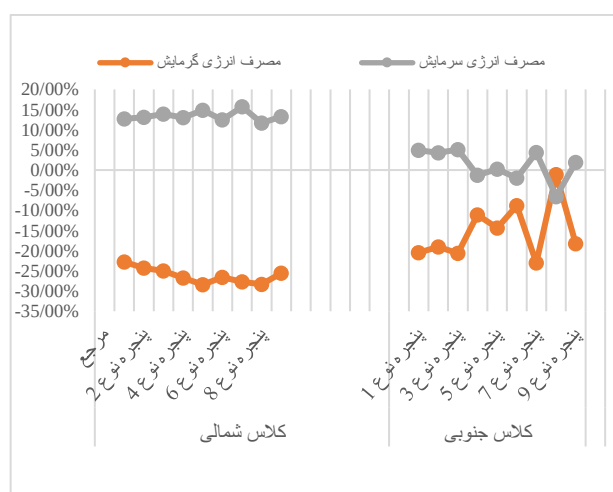
بهینه‌سازی انجام شده را با توجه به میزان کاهش مصرف انرژی در سال‌های بهره‌برداری ساختمان محاسبه کرد. معیار یاد شده نشان‌دهنده این است که تا چه مقدار و در چه مدت هزینه پروژه (سرمایه‌گذاری) به نسبت صرفه‌جویی در مصرف انرژی به بهره‌بردار باز می‌گردد. در محاسبه هزینه عایق‌کاری ساختمان در شهریور ماه سال ۱۴۰۲ استعلام عایق‌های مد نظر از شرکت‌های تولید کننده اخذ گردید. همچنین قیمت انرژی مصرفی بر پایه تعرفه انرژی وزارت نیرو در سال ۱۴۰۲ به ازای هر کیلووات ساعت ۱۷۷۰ ریال است. بر این مبنا تمام عایق‌ها با ضخامت ۵ سانتی‌متر در معیار مدت زمان بازگشت سرمایه محاسبه شد.

با توجه به جدول (۴) نتایج نشان داد که هر چند عایق پلی اورتان با اختلاف کم نسبت به عایق‌های دیگر عملکرد بهتری داشته است اما زمان بازگشت سرمایه آن با توجه به گران بودن عایق در بازار فروش به ۱۵۸/۱۴ سال می‌رسد. همچنین عایق پشم شیشه با توجه به اینکه نتایج عملکرد نزدیکی به عایق پلی اورتان دارد و نیز قیمت مناسب آن قیمت مناسب آن در بازار فروش، زمان بازگشت سرمایه آن ۲۷/۹۲ سال می‌باشد. عایق‌های پلی استایرن منبسط شده و پلی استایرن اکستروژنه شده و عایق پشم سنگ زمان بازگشت سرمایه به ترتیب ۷۲/۱۸ - ۶۷/۶۴ - ۶۰/۴۴ سال دارند. با توجه به نتایج استنباط می‌شود که بالا بودن مدت بازگشت سرمایه به دلیل یارانه‌های موجود انرژی در کشور ایران است. همچنین عایق‌های تولید شده از ساقه برنج و گیاهان به دلیل بومی‌سازی نشدن و عدم وجود بازار فروش در ایران از معیار مدت بازگشت سرمایه متسنی شدند.

در محاسبه بازگشت سرمایه بهینه‌سازی جدار نورگذر با توجه به اینکه بهینه‌سازی با استفاده از شیشه‌های هوشمند و با تکنولوژی جدید انجام شده است، این نوع شیشه‌ها در داخل کشور ایران تولید نشده و بازار فروش ندارند، به همین دلیل در محاسبه بازگشت سرمایه لحاظ نشده‌اند.

با توجه به شکل (۱۲) و با شبیه‌سازی ۹ نوع پیکربندی مختلف در جدار نور گذر نتایج نشان داد که در کلاس درس شمالی مصرف انرژی گرمایشی در کل دوره با پنجره نوع ۵ (۲ جداره با شیشه کم گسیل در جدار خارجی و ۱۳ میلی‌متر گاز آرگون و ۳ میلی‌متر ضخامت شیشه) به میزان ۲۸/۴ درصد کاهش نسبت به مدل مرجع داشته است همچنین پنجره نوع ۸ نیز ۲۸/۳۵ درصد و پنجره نوع ۷ به میزان ۲۷/۷۰ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایشی داشته است. همچنین میزان مصرف انرژی سرمایش به نسبت مدل مرجع افزایش داشته که نتیجه پدیده آنتی اینزولیشن می‌باشد.

در کلاس جنوبی نتایج نسبت به کلاس شمالی متفاوت هستند، به این صورت که پنجره نوع ۷ به میزان ۲۳/۰۴ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایشی داشته است و همچنین پنجره نوع ۳ به میزان ۲۰/۶۲ درصد و پنجره نوع ۱ به میزان ۲۰/۴۸ درصد و پنجره نوع ۲ به میزان ۱۹/۰۲ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایشی داشته است. میزان افزایش انرژی سرمایش ساختمان بسیار کمتر نسبت به کلاس شمالی بوده است.



شکل ۱۲ تأثیر پیکربندی مختلف جدار نور گذر بر مصرف انرژی ساختمان

تخمین زمان بازگشت سرمایه

دوره بازگشت سرمایه یک معیار مالی پرکاربرد برای اندازه‌گیری احتمال بازدهی از یک سرمایه‌گذاری است. هزینه و زمان بازگشت سرمایه را با استفاده از معیار بازگشت سرمایه در طرح‌های بهینه‌سازی انرژی می‌توان میزان هزینه پروژه‌های

جدول ۴ محاسبه هزینه و زمان بازگشت سرمایه عایق کاری پوسته ساختمان

نوع عایق	ضخامت بهینه	قیمت واحد (ریال/متر مکعب)	هزینه کل بهینه سازی (ریال)	میزان تأثیر در بهینه سازی گرمایش (گاز مصرفی) در دو کلاس درس در هر سال (کیلووات ساعت)	مقدار صرفه جویی سالانه (ریال)	بازگشت سرمایه (سال)
پلی اورتان با دانسیته (30kg/m ³)	۵	۷۵/۰۰۰/۰۰۰	۷۰/۸۷۵/۰۰۰	۲۵۳/۲	۴۴۸/۱۶۴	۱۵۸/۱۴
پشم سنگ	۵	۲۵/۴۰۰/۰۰۰	۲۴/۰۰۳/۰۰۰	۲۳۷/۴	۴۲۰/۱۹۸	۶۰/۴۴
پلی استایرن منبسط شده	۵	۳۰/۰۰۰/۰۰۰	۲۸/۳۵۰/۰۰۰	۲۳۴/۸	۴۱۵/۵۹۶	۷۲/۱۸
پلی استایرن اکستروژده شده	۵	۲۹/۰۰۰/۰۰۰	۲۷/۴۰۵/۰۰۰	۲۴۲/۲	۴۲۸/۶۹۴	۶۷/۶۴
پشم شیشه	۵	۱۲/۶۰۰/۰۰۰	۱۱/۹۰۷/۰۰۰	۲۴۰/۹	۴۲۶/۳۹۳	۲۷/۹۲
مواد طبیعی - پوسته برنج	۵	*	*	۲۱۸	*	*
مواد طبیعی - روکش الیاف گیاهی	۵	*	*	۲۰۷/۵	*	*
نرخ و تعرفه انرژی در اوج مصرف (کیلووات ساعت/ریال): ۱۷۷۰ مقدار مورد مصرف در بهینه ترین حالت در دو کلاس درس (مترمکعب): ۰/۹۴۵						

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف کاهش مصرف انرژی ساختمان مدارس موجود با استفاده از روش های بهینه سازی انرژی اعم از پیکربندی های عایق کاری و پیکربندی های جدار نور گذر در یک ساختمان آموزشی دو طبقه واقع در شهر کرمانشاه، با استفاده از نرم افزار دیزاین بیلدر به روش مدل سازی، شبیه سازی و برداشت های میدانی انجام شده است. همچنین بازگشت سرمایه بهینه سازی انرژی نیز محاسبه شده است. متغیرهای بررسی شده در این پژوهش شامل حالت های بهینه نوع عایق، ضخامت عایق، موقعیت عایق در لایه بندی، نوع شیشه، ضخامت شیشه، تعداد جدارهای شیشه، گازهای مابین جدارها و ضخامت آن ها است. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش، با توجه به تحلیل های انجام شده در هر مترمربع فضای کلاس درس در جبهه شمالی در حدود ۴۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در طول یک سال تحصیلی است. همچنین کلاس درس جنوبی نیز مصرف انرژی گرمایش و سرمایش معادل ۳۰ کیلووات ساعت در مترمربع در یک سال تحصیلی را دارد. در فرایند بهینه سازی مصرف انرژی دو کلاس درس مورد مطالعه با اعمال ۶ نوع عایق مختلف در ضخامت های ۵-۷-۱۰-۱۲-۱۵ سانتی متر و ۴ الگوی لایه بندی عناصر بررسی شد. نتایج نشان داد، عایق پلی اورتان با ضخامت ۱۰ سانتی متر در داخلی ترین لایه

(پشت گچ نازک کاری) مناسب ترین عملکرد را با میزان ۱۵،۷۴ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایش در کلاس شمالی و ۱۸،۱۶ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایش در کلاس جنوبی داشته است. در ادامه مطالعه همچنین ۹ نوع پیکربندی مختلف در جدارهای نور گذر کلاس درس شمالی شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که در کلاس درس شمالی، پنجره دوجداره با شیشه کم گسیل در لایه داخلی و با ۳ میلی متر ضخامت شیشه و ۱۳ میلی متر ضخامت گاز آرگون در جدار میانی (پنجره نوع ۵) منجر به کاهش ۲۸/۴ درصدی مصرف انرژی گرمایش شده است، همچنین پنجره سه جداره با شیشه معمولی و ضخامت ۳ میلی متر شیشه و ۱۳ میلی متر هوا در هر ۲ جداره میانی (پنجره نوع ۷)، عملکرد نزدیکی با سناریوی قبلی داشته است، به همین ترتیب در کلاس درس جنوبی نیز پنجره سه جداره با شیشه معمولی و ۳ میلی متر ضخامت شیشه، ۱۳ میلی متر ضخامت هوای مابین جدارها (پنجره نوع ۷) باعث کاهش ۲۳/۰۴ درصدی مصرف انرژی گرمایش شده است. در نتیجه بهترین راه حل ها برای بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان مورد مطالعه استفاده از عایق پلی اورتان با ضخامت ۱۰ سانتی متر در لایه بندی شماره ۱ می باشد و همچنین پنجره نوع ۵ در کلاس درس شمالی و پنجره نوع ۷ در کلاس درس جنوبی بهترین عملکرد را داشته است. با توجه به سامانه طبقه بندی اقلیمی کوپن اقلیم معتدل با

OCDE	کشورهای غیر عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی
IEA	آژانس بین‌المللی انرژی
ductility	کاهش انعطاف جسمی
configuration	پیکربندی
PBT	زمان بازگشت
Köppen- Geiger	سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن
Csa	آب و هوای معتدل
infiltration	نفوذ هوا
pmv	شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده
ppd	شاخص درصد نارضایتی حرارتی پیش‌بینی شده
eps	پلی استایرن منبسط شده
xps	پلی استایرن اکستروود شده

تقدیر و تشکر

واژه نامه

POE

ارزیابی‌های پس از بهره‌برداری

مراجع

- [1] E. Solgi, S. Memarian, and G. Nemati Moud, "Financial viability of PCMs in countries with low energy cost: A case study of different climates in Iran," *Energy and Buildings*, vol. 173, pp. 128-137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.028>
- [2] J. Han, J. Miao, Y. Shi, Z. Miao, "Can the semi-urbanization of population promote or inhibit the improvement of energy efficiency in China?" *Sustainable Production and Consumption*, vol. 26, pp. 921-932, (2021).
- [3] E. Rodrigues, N. Azimi Fereidani, M. S. Fernandes, and A. R. Gaspar, "Climate change and ideal thermal transmittance of residential buildings in Iran," *Journal of Building Engineering*, vol. 74, pp. 106919, (2023).
- [4] S. Saihi, M. Faizi, and F. M. Saradj, "Prioritization of Façade Retrofit Measures to Achieve Energy Efficiency in Existing Office Buildings in Tehran," *Manzar*, vol. 14, no. 59, pp. 30-39, (2022). (In Persian) <https://doi.org/10.22034/manzar.2021.312873.2163>
- [5] A. Khani, M. Khakzand, M. Faizi, "Multi-objective optimization for energy consumption, visual and thermal comfort performance of educational building (case study: Qeshm Island, Iran)," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 54, p. 102872, (2022).
- [6] S. Zahiri, H. Altan, "Improving energy efficiency of school buildings during winter season using passive design strategies," *Sust. Build*, vol. 5, p. 1, (2020).
- [7] M. Tahsildoost, Z.S. Zomorodian, "Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran," *Energy and Buildings*, vol. 104, p. 65-72, (2015).
- [8] Q. Al-Yasiri, M. Szabó, "Experimental study of PCM-enhanced building envelope towards energy-saving and

- decarbonisation in a severe hot climate,” *Energy and Buildings*, vol. 279, p. 112680, (2023).
- [9] F. Fazlikhani, H. Goudarzi, E. Solgi, “Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates,” *Energy Conversion and Management*, vol. 148, p. 78-89, (2017).
- [10] F. Babich, G. Torriani, J. Corona, I. Lara-Ibeas, “Comparison of indoor air quality and thermal comfort standards and variations in exceedance for school buildings,” *Journal of Building Engineering*, vol. 71, p. 106405, (2023).
- [11] M. K. Singh, R. O. Ooka, H. B. Rijal, S. Kumar, A. Kumar, S. Mahapatra, “Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward,” *Energy and Buildings*, vol. 188-189, p. 149-174, (2019).
- [12] A. Zhang, R. Bokel, A. V. Dobbeleelsteen, Y. Sun, Q. Hunang, Q. Zhang, “Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China,” *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 371-384, (2017).
- [13] M. K. Singh, S. Kumar, R. Ooka, H. B. Rijal, G. Gupta, A. Kumar, “Status of thermal comfort in naturally ventilated classrooms during the summer season in the composite climate of India,” *Building and Environment*, vol. 128, pp. 287-304, (2017).
- [14] <https://worldgbc.org/article/earth-day-why-the-quality-of-educational-environments-affects-the-quality-of-learning-inside-them/>
- [15] S. A. Churchill, R. Smyth, “Energy poverty and health: Panel data evidence from Australia. *Energy economics*,” *Energy Economics*, vol. 97, p. 105219, (2021).
- [16] R. Bentley, L. Daniel, Y. Li, E. Baker, A. Li, “The effect of energy poverty on mental health, cardiovascular disease and respiratory health: a longitudinal analysis,” *The Lancet Regional Health–Western Pacific*, vol. 35, (2023).
- [17] W. Zeiler, G. Boxem, “Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter,” *Building and Environment*, vol. 44, no. 11, pp. 2308-2317, (2009).
- [18] H. Zhang, K. Hewage, H. Karunathilake, H. Feng, R. Sadiq, “Research on policy strategies for implementing energy retrofits in the residential buildings,” *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 103161, (2021).
- [19] E. Parliament, “REPORT on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council amending directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings,” (2017).
- [20] G. O. Canada, “Energy, Greenhouse Gas Emissions, Natural resources Canada,” (2021).
- [21] A. Charles, W. Maref, C.M. Ouellet-Plamondon, “Case study of the upgrade of an existing office building for low energy consumption and low carbon emissions,” *Energy and Buildings*, vol. 183, pp. 151-160, (2019).
- [22] B. P. Munoz, B. Peuportier, L. Gracia-Villa “Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans: A new approach,” *Building and Environment*, vol. 160, p. 106203, (2019).
- [23] R. Ruparathna, K. Hewage, and R. Sadiq, “Rethinking investment planning and optimizing net zero emission buildings,” *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 19, no. 6, pp. 1711-1724, (2017).
- [24] H. Jang, L. Jones, J. Kang, “Prioritisation of old apartment buildings for energy-efficient refurbishment based on the effects of building features on energy consumption in South Korea,” *Energy and Buildings*, vol. 96, pp. 319-328, (2015).

- [25] P. Jie, F. Zhang, Z. Fang, H. Wang, Y. Zhao, "Optimizing the insulation thickness of walls and roofs of existing buildings based on primary energy consumption, global cost and pollutant emissions," *Energy*, vol. 159, pp. 1132-1147, (2018).
- [26] A. Tabadkani, S. Banihashemi, M. R. Hosseini, "Daylighting and visual comfort of oriental sun responsive skins: A parametric analysis," *Building Simulation*, vol. 11, no. 4, pp. 663-676, (2018).
- [27] S. Ni, N. Zhu, Y. Hou, Z. Zhang, "Research on indoor thermal comfort and energy consumption of zero energy wooden structure buildings in severe cold zone," *Journal of Building Engineering*, vol. 67, p. 105965, (2023).
- [28] S. E. Sadati, N. Rahbar, H. Kargarsharifabad, "Energy assessment, economic analysis, and environmental study of an Iranian building: The effect of wall materials and climatic conditions," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 103093, (2023).
- [29] Y. Yousefi, "Energy efficiency in educational buildings in Iran: Analysis and measures," in *Proceedings*, (2015).
- [30] Congedo, P.M.A.U.D.A.D.B.C.T.G.Z.I.E.S. and B. "Cost-Optimal Analysis for Existing School Energies," (2016). 9, DOI: 10.3390/en9100851.
- [31] V. Gupta, C. Deb, "Envelope design for low-energy buildings in the tropics: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 186, pp. 113650, (2023).
- [32] M. C. Katafygiotou, D. K. Serghides, "Analysis of structural elements and energy consumption of school building stock in Cyprus: Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school," *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 8-16, (2014).
- [33] M. Alwetaishi, A. Taki, "Investigation into energy performance of a school building in a hot climate: Optimum of window-to-wall ratio," *Indoor and Built Environment*, vol. 29, no.1, pp. 24-39 (2019).
- [34] J. H. Park, B. Y. Yun, S. J. Chang, S. Wi, J. Jeon, S. Kim "Impact of a passive retrofit shading system on educational building to improve thermal comfort and energy consumption," *Energy and Buildings*, vol. 216, p. 109930 (2020).
- [35] M. Jradi, C. Veje, B.N. Jørgensen, "Deep energy renovation of the Mærsk office building in Denmark using a holistic design approach," *Energy and Buildings*, vol. 151, pp. 306-319 (2017).
- [36] Raji, B., Martin J. Tenpierik, Andy Van den Dobbelsteen Early-Stage Design "Considerations for the Energy-Efficiency of High-Rise Office Buildings," *Sustainability*, DOI: 10.3390/su9040623, (2017).
- [37] K. EL-DEEB, "Combined Effect Of Window-To-Wall Ratio And Wall Composition On Energy Consumption," in *PLEA*, (2013).
- [38] Amiri Fard, R., M. Thaghafi, and M. Tahbaz, "Investigating the simultaneous effect of the percentage of transparent surfaces and orientation according to the energy consumption of schools in the temperate and humid climate of Iran. Soffeh", vol. 30, no. 4: pp. 49-65, (2021).
- [39] J. S. Carlos, H. Corvacho, "Retrofit measures in old elementary school buildings towards energy efficiency," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 16, no. 4, pp. 567-576, (2010).
- [40] B. Basarir, B.S. Diri, C. Diri, "Energy efficient retrofit methods at the building envelopes of the school buildings," *Retrieved*, vol. 10, no. 12, p. 2016, (2012).

- [41] L. de Santoli, L., F. Fraticelli, F. Fornari, C. Calice, "Energy performance assessment and a retrofit strategies in public school buildings in Rome," *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 196-202, (2014).
- [42] M. Zinzi, S. Agnoli, G. Battisini, G. Bernabini, "Retrofit of an Existing School in Italy with High Energy Standards," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1529-1538, (2014).
- [43] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, F. Rossi, G. P. Vanoli, "Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 172-183, (2015).
- [44] S. Ostojić, Z. Veršić, I. Muraj, "Energy analysis and refurbishment strategy for Zagreb University buildings: Former Faculty of Technology in Zagreb by Alfred Albini," *Energy and Buildings*, vol.115, pp. 47-54, (2016).
- [45] H. Erhorn-Kluttig, O. Mørck, "Energy-efficient renovation of educational buildings," (2005).
- [46] McKnight, T. and D. Hess, "Climate zones and types. physical geography: a landscape appreciation. NJ: Prentice Hall, " pp. 205-208, (2000):
- [47] T. Raziei, "Climate of Iran according to Köppen-Geiger, Feddema, and UNEP climate classification," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 148, no. 3, pp. 1395-1416, (2022).

Experimental and Theoretical Investigation of Young's Modulus of Breast Cancer Tissue (MCF-10) Using Different Cantilevers of Atomic Force Microscope

Research Article

Moein Taheri¹, Ali Jabbari², Zahrasadat Eghdami³, Hamed Faraji⁴, Nima Rahmani⁵

DOI:10.22067/jacsm.2023.83806.1196

1. Introduction

The uncontrolled growth of cells causes a cancerous mass in the body. Mechanical properties play an important role at different scales in biological issues. Identifying the mechanical properties of unknown cells, bacteria, and viruses is of high importance in finding a way to treat incurable diseases, including cancers. The MCF10 cancer tissue displacement and theoretical simulation of cancer tissue using the Hertz contact model have been studied using an atomic force microscope and three different types of cantilevers with rectangular, V-shaped, and dagger geometries. The current research is novel in terms of using three types of cantilevers with different geometries to achieve a more accurate modulus of elasticity and apply less force in order not to damage the tissue.

2. Results

In this section, Young's modulus of MCF-10 cancer tissue is estimated with the results obtained from the experimental test based on the atomic force microscope using three geometries of rectangular, V-shaped, and dagger-shaped cantilevers. Moreover, in order to ensure the obtained results, the findings of the experiments are compared, and theoretical simulations are discussed. According to Figure 1, the force-depth diagram of penetration resulting from breast cancer cell displacement is shown for all three cantilever geometries, including rectangular, V-shaped, and dagger, where the force is in nano-newtons and the depth of needle penetration is in nanometers. During the loadings, the tests were performed five times and the average results were plotted. In addition to achieving a more accurate Young's modulus, the reason for using three different cantilever geometries was to choose the right cantilever in order not to damage the tissue. As the loading force increases, the penetration depth rises. To prevent the destruction of cancer cells, appropriate loading should be selected based on the

biological particle and the allowed indentation depth should be taken into account.

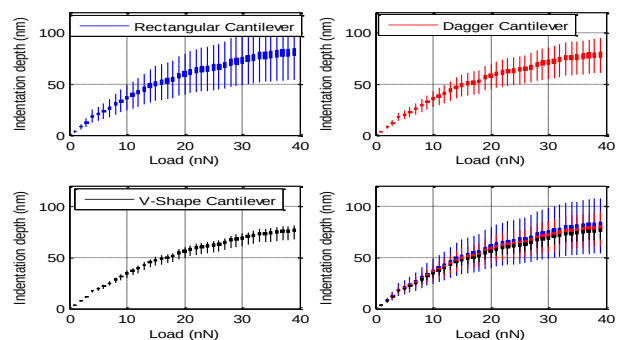
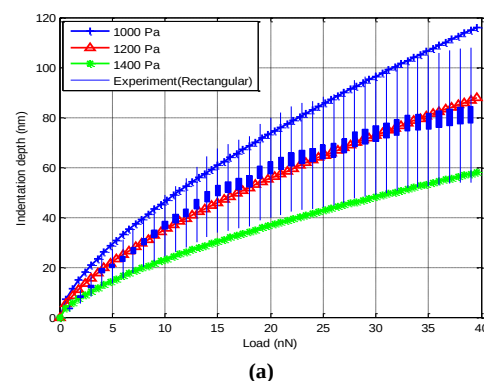


Figure 1. Force-penetration depth diagram for three columns with rectangular, V-shaped, and dagger geometries

Figure 2 shows the Young's modulus of breast cancer cells extracted using rectangular, dagger, and V-shaped cantilevers. In figures 2-a, 2-b, and 2-c, the ranges of Young's modulus were considered 1000-1400, 1120-1320, and 1200-1250 pascals, respectively.



*Manuscript received: August 7, 2023. Revised, August 30, 2023, Accepted, September 27, 2023.

¹ Corresponding author, Associate Professor of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Email: m-taheri@araku.ac.ir

² Associate Professor of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

³ M.Sc. Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

⁴ M.Sc. Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

⁵ M.Sc. Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

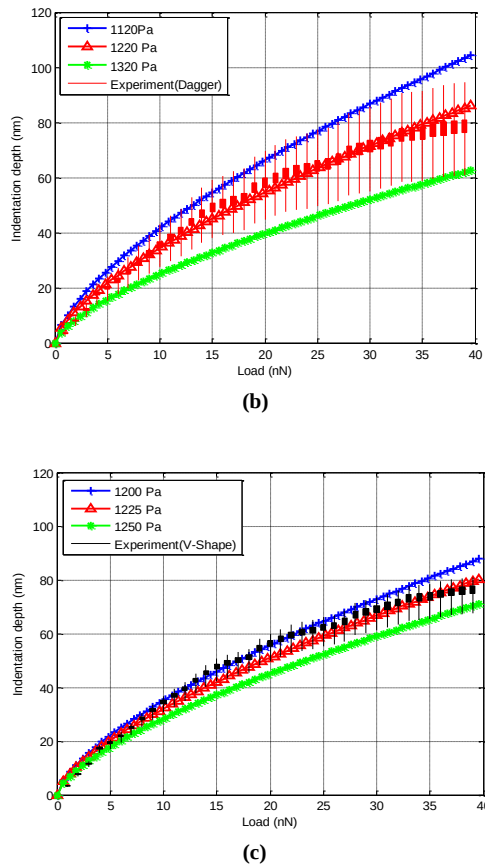


Figure 2. Experimental and theoretical comparison of Young's modulus of breast cancer tissue using (a) rectangular, (b) dagger, and (c) V-shaped cantilevers

3. Verification

The geometry of the V-shaped cantilever shows a more accurate Young's modulus than the other two geometries. Therefore, in this section, in order to check the available

data, the value of Young's modulus obtained in this research with the V-shaped beam has been compared with references [5] and [24]. An atomic force microscope was used in all the results. As could be seen from the obtained results, considering the V-shaped column in this article, the experimental results are more precise within the range of the theoretical findings and between the values of 1200-1250 pascals. Figure 3 compares the minimum and maximum values of Young's modulus of breast cancer tissue considering other studies.

5. Conclusion

In this research, using an atomic force microscope, three-dimensional images of MCF-10 breast cancer tissue were extracted to estimate the geometric shape of the tissue. In addition, graphs of the penetration depth of the atomic force microscope needle in the tissue according to the force applied to it using three geometries of rectangular, V-shaped, and dagger-shaped cantilevers were obtained to determine Young's modulus. The cell geometry is assumed to be spherical. Young's modulus of MCF-10 cancer tissue was extracted by examining the graphs obtained from the experimental results and comparing them with simulations. Simulations were performed for all three cantilever geometries using the Hertz contact model and the obtained results showed that since the V-shaped cantilever exerts less force on the tissue, this will result in a more accurate prediction of the Young's modulus of the breast cancer tissue. The range of Young's modulus for the V-shaped cantilever was more accurate than the other two geometries, which led to the accurate detection of cancerous tissues and the differentiation of healthy and cancerous tissues.



Figure 3. Validation charts



بررسی تجربی و تئوری مدول یانگ بافت سرطانی سینه (MCF-10) با استفاده از تیرک‌های مختلف میکروسکوپ نیروی اتمی*

مقاله پژوهشی

معین طاهری^(۱)  علی جباری^(۲) زهرا سادات اghdami^(۳) حامد فرجی^(۴) نیما رحمانی^(۵)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.83806.1196

چکیده امروزه میکروسکوپ نیروی اتمی کاربردهای مختلفی در ساخت قطعات ریز مقیاس و بررسی خواص مکانیکی آن‌ها دارد. مطالعه خواص مکانیکی بافت‌ها می‌تواند به عنوان عاملی مهم برای تشخیص زودهنگام سرطان و کمک به روش‌های جدید درمانی در نظر گرفته شود. روش‌های مختلفی برای تشخیص بافت‌های سرطانی وجود دارد که یکی از این راه‌ها بررسی مدول یانگ بافت است. یکی از جدیدترین روش‌ها برای استخراج مدول یانگ در بافت‌های بیولوژیکی استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی است. در این مطالعه، ابتدا از میکروسکوپ نیروی اتمی به منظور استخراج مدول یانگ بافت سرطانی سینه MCF-10 با استفاده از سه تیرک مختلف با هندسه‌های مستطیلی، وی-شکل و خنجر استفاده شده است. با توجه به تصاویر به دست آمده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، هندسه سلول کروی در نظر گرفته شد. نمودار نیرو-عمق نفوذ با میانگین‌گیری نتایج تجربی برای هر کدام از تیرک‌ها به طور مجزا رسم شد. در آخر مدول یانگ بافت سرطانی سینه برای سه تیرک با هندسه‌های مستطیلی، وی-شکل و خنجر با مدل تماسی هرتز استخراج شده است. با مقایسه نتایج تجربی و تئوری و با تغییر محدوده مدول یانگ فرضی برای هر سه هندسه تیرک‌ها، مشاهده شد که، استفاده از تیرک وی-شکل به دلیل اعمال نیروی کمتر به بافت، محدوده دقیق‌تری از مدول یانگ را پیش‌بینی می‌کند. مدول یانگ بافت سرطانی با استفاده از تیرک وی-شکل بین ۱۲۰۰ تا ۱۲۵۰ پاسکال در نظر گرفته شد.

واژه‌های کلیدی میکروسکوپ نیروی اتمی، بافت سرطانی MCF-10، تیرک مستطیلی، تیرک خنجر، تیرک وی-شکل.

Experimental and Theoretical Investigation of Young's Modulus of Breast Cancer Tissue (MCF-10) Using Different Cantilevers of Atomic Force Microscope

Moein Taheri Ali Jabbari Zahrasadat Eghdami Hamed Faraji Nima Rahmani

Abstract Today, the atomic force microscope has various applications in the manufacture of small-scale parts and the study of their mechanical properties. The study of mechanical properties of tissues can be considered as biomarkers for early detection of cancer and help in new treatments. There are different ways to detect cancerous tissues, and one of these ways is to check Young's modulus of the tissue. One of the most recent methods for extracting Young's modulus in biological tissues is the use of atomic force microscopy. In this study, atomic force microscope was first used to extract Young's modulus of MCF-10 breast cancer tissue using 3 different cantilevers with rectangular, V-shaped and dagger geometries. The geometry of the cell was also assumed to be spherical according to the images obtained by atomic force microscopy. The force-indentation depth diagram was plotted by averaging the experimental results for each of the cantilevers separately. Finally, Young's modulus of breast cancer tissue for 3 cantilevers with rectangular, V-shaped and dagger geometries is extracted with Hertz contact model. By comparing the experimental and theoretical results and by changing the assumed range of Young's modulus for all 3 geometries of the cantilevers, it was observed that the use of V-shaped cantilever predicts a more accurate range of Young's modulus due to applying less force to the tissue. Young's modulus of breast cancer was considered between 1200 and 1250 (Pa) using V-shaped cantilevers.

Key Words Atomic force microscope, MCF-10 cancer tissue, Rectangular cantilevers, Dagger cantilevers, V-shaped cantilevers

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۵/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۷/۵ می‌باشد.

Email: m-taheri@araku.ac.ir

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

(۲) دانشیار، مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک.

(۳) کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک.

(۴) کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک.

(۵) کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک.

مقدمه

رشد غیر قابل کنترل سلول‌ها موجب ایجاد توده سرطانی در بدن می‌شود. خواص مکانیکی نقش مهمی را در مقیاس‌های مختلف در مباحث زیست‌شناسی ایفا می‌کنند. شناسایی خواص مکانیکی سلول‌ها، باکتری‌ها، ویروس‌های ناشناخته نقش مهمی را در یافتن راهی برای درمان بیماری‌های غیر قابل درمان از جمله انواع سرطان‌ها دارد. به دلیل افزایش روزافزون بروز سرطان سینه و اهمیت تشخیص و درمان آن، شناخت کامل سلول سالم و سرطانی از اهمیت بالایی برخوردار است. ابزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف سلول بیولوژیکی وجود دارند، که یکی از آن‌ها ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد. بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا تصاویر نانوذرات را به دست آورند و خواص آن‌ها را شناسایی کنند.

طاهری و میرزالی [1] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic force microscopy) و با روش نانومنیپولیشن به مطالعه سلول MCF-10 پرداخته‌اند. مدل‌های تماسی چانگ، چن و بریک از مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی انجام شده می‌باشند. در نهایت با شبیه‌سازی‌های صورت گرفته مدول یانگ ۱۲۰۰ پاسکال برای این سلول در نظر گرفته شده است. همچنین با در نظر گرفتن مقایسه‌های صورت گرفته با کار تجربی، مدل تماسی چن به عنوان مدل مطلوب برای استخراج خواص سلولی معرفی شده است.

طاهری و میرزالی [2] به نانومنیپولیشن سلول سرطانی سینه ام‌سی‌اف-۷ با هدف یافتن مدول یانگ بافت، با میکروسکوپ نیروی اتمی به صورت تجربی پرداخته‌اند. پس از استخراج نتایج تجربی به مدل‌سازی و محاسبه نیرو و زمان بحرانی با در نظر گرفتن مدل‌های تماسی مختلف از جمله مدل تماسی هرتر، پیتی و سی‌اس، پرداخته شده است. با توجه به مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام شده، مدول یانگ سلول سرطانی سینه ام‌سی‌اف-۷ در محدوده‌ی ۸۰۰ پاسکال به دست آمده است. همچنین مدل تماسی سی‌اس تطابق بیشتری با نتایج تجربی داشته است.

گایدو و همکاران [3] به بررسی خواص مکانیکی دو سلول سالم و سرطانی سینه پرداخته‌اند. آن‌ها دو نوع سلول سالم و سرطانی را بین میکرو الکترودها از طریق اعمال نیروهای دی‌الکترودوریتیک کشیده‌اند. تجزیه و تحلیل دقیق سلول‌ها نشان داد که تفاوت در پاسخ کششی به دلیل خواص مکانیکی خاص سلول است. از طریق افزودن یک سم مخصوص اکتین و یک میکروتوبول به سلول‌ها، تفاوت در ساختار میکروتوبولی دو نوع

سلول به عنوان علت اصلی رفتار مشاهده شده شناسایی شده است.

طاهری و همکاران [4] به منظور بررسی خواص مکانیکی بافت سرطانی سینه از ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی در طی فرایند نانومنیپولیشن استفاده کرده‌اند. با بررسی تغییرات ناشی از نیرو-جابه‌جایی (Manipulation)، نمودارهای نیرو و عمق نفوذ برحسب زمان ترسیم شده‌اند. همچنین با توجه به اهمیت، تماس ذرات در ابعاد نانو و با در نظر گرفتن مدل تماسی تاتارا و هندسه بافت سرطانی سینه، شبیه‌سازی‌هایی در جهت استخراج مدول یانگ انجام شده است. همچنین به منظور بررسی میزان تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند جابه‌جایی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی، آزمایش‌های تجربی انجام شده و نمودار تجربی نیز ترسیم شده است. در نهایت با مقایسه‌های صورت گرفته و با در نظر گرفتن مدل تماسی تاتارا، محدوده ۲ تا ۲/۵ کیلو پاسکال برای مقدار بافت سرطانی سینه محاسبه شده است.

وانگ و همکاران [5] از میکروسکوپ نیروی اتمی و با در نظر گرفتن مدل تماسی هرتر برای توصیف و مقایسه نانو ساختار سطحی و ویسکوالاستیسیته رده‌های مختلف سلولی سینه استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که سلول‌های سرطانی سینه MCF-7 ساختار اسکلت سلولی رشته‌ای نامنظم‌تری را با افزایش زبری غشا در مقایسه با سلول‌های خوش‌خیم سینه MCF-10A نشان می‌دهند. یافته‌های حاصل از این پژوهش بینش‌های جدیدی را در مورد تغییرات بیوفیزیکی سلول‌ها در طول تبدیل تومور ارائه کرده است، همچنین پیشنهاد شده که می‌توان از آن برای تشخیص زودهنگام سرطان در سطح تک‌سلولی استفاده کرد.

لی و همکاران [6] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی ابتدا، خواص الاستیک و ویسکوالاستیک سلول‌های سالم سینه و سلول‌های سرطانی سینه را اندازه‌گیری کرده، در این پژوهش تفاوت قابل توجهی در مدول یانگ و زمان‌های بحرانی بین سلول‌های سالم و سرطانی سینه نشان داده شده است. سپس تفاوت‌های قابل توجهی در توپوگرافی سلولی بین سلول‌های سالم و سرطانی سینه نیز با تصویربرداری میکروسکوپ نیروی اتمی آشکار شد. نتایج پتانسیل، خواص ویسکوالاستیک سلولی را در جهت تکمیل مدول یانگ سلولی برای تشخیص حالات مختلف سلول‌ها نشان داد. این تحقیق روش جدیدی را برای تعیین کمیت خواص مکانیکی سلول‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه داده، که امکان بررسی رفتارهای بیومکانیکی

سلول‌های منفرد را از جنبه‌های مختلف فراهم کرده است.

ایتوری و همکاران [7] با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی همراه با میکروسکوپ فلورسانس، بر اساس تغییرات زمانی به تعیین تغییرات سلول سرطانی سینه پرداخته‌اند. از روش تورفتگی سلولی برای تعیین تغییرات هم‌زمان مدول یانگ، حداکثر نیروی چسبندگی استفاده شده است. در نتیجه تحرک و چسبندگی سلول نیز تعیین شده است. اثرات درمان در چند نقطه زمانی (۶-۰ ساعت، ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت) اندازه‌گیری شد. در نهایت نتایج نشان داد که میکروسکوپ نیروی اتمی می‌تواند به طور مؤثر به عنوان یک ابزار تشخیصی برای نظارت بر تغییرات مورفو/نانو مکانیکی برگشت‌ناپذیر در سلول‌های سرطانی در طی مراحل اولیه درمان دارویی مورد استفاده قرار گیرد.

طاهری و فرجی [8] به استخراج نیرو و زمان بحرانی که هدف اصلی فاز اول جابه‌جایی نانو ذرات مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد، پرداخته‌اند. بررسی‌های صورت گرفته در فاز اول جابه‌جایی نانو ذرات و به صورت سه بعدی انجام شده است. نیرو و زمان بحرانی با مقایسه نیروهای اعمالی در هر سه جهت حرکت و نیروی برآیند، برای هر سه مدل اصطکاکی پرسون محاسبه شده. نتایج حاکی از کم‌ترین مقدار در مدل اصطکاکی سوم پرسون، با مقادیر ۹۳ نانو نیوتن برای نیروی بحرانی و ۷۸ میلی‌ثانیه برای زمان بحرانی بوده است.

میرزالی و همکاران [9] مدول یانگ بافت سرطان سینه MCF-7 را با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و با اندازه‌گیری نیروی برهم‌کنش نمونه و انجام شبیه‌سازی استخراج کرده‌اند. نمودار عمق نیرو- فرورفتگی با میانگین‌گیری نتایج تجربی رسم شده است. مدول الاستیسیته بافت سرطان سینه با مدل‌های پیچیده‌ای مانند DMT، MD، BCP و SUN استخراج شده است. هندسه سلول نیز کروی در نظر گرفته شده است. با مقایسه نتایج تجربی و نظری و با تغییر مقدار مدول یانگ فرضی در مدل‌های تماس کروی، مدول یانگ بافت سرطانی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ پاسکال به دست آمده است.

به دلیل تغییرات ساختاری در سلول‌های سرطانی، از جمله بازسازی اسکلت سلولی و تغییرات در خواص چسبندگی راتر و همکاران [10] کیفیت ظاهری مکانیکی سلول‌های سرطانی را با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت، با استفاده از آزمایش‌های میکروبیولوژیکی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی، خواص مکانیکی سلول‌های زنده در حوزه بدخیمی را تغذیه کردند. سلول‌های مورد مطالعه شامل سرطان سینه MCF-10A و سلول‌های سرطانی MDA-MB 231

بودند.

لی و همکاران [11] مکانیک تومور را در چندین سطح مورد مطالعه قرار داده‌اند تا به طور جامع اثرات مکانیک بر پیشرفت تومور را درک کنند. با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، آن‌ها به طور هم‌زمان ساختارها و خواص مکانیکی سیستم‌های بیولوژیکی زنده را از مولکول‌ها و سلول‌ها تا نمونه‌های بافتی با وضوح فضایی بی‌سابقه توصیف کردند، و امکانات جدیدی برای درک فیزیک تومور فراهم کردند و به مطالعات سرطان کمک زیادی کردند. آن‌ها همچنین چالش‌ها و تحولات آینده را مورد بحث و بررسی قرار دادند.

کولکارنی و همکاران [12] از فرورفتگی میکروسکوپ نیروی اتمی با یک تیرک کروی برای مشخص کردن ویژگی‌های الاستیک و ویسکوالاستیک سلول‌های سرطان سینه مهاجم (MDA-MB-231) و غیر تهاجمی (MCF-7) که با فاکتور رشد تبدیل‌کننده بتا ($TGF-\beta$) درمان شده‌اند، استفاده کرده‌اند. همچنین از تصویربرداری کانفوکال برای بررسی ساختار اسکلت سلولی زیر غشایی سلول‌ها استفاده شده است. نتایج تغییرات قابل توجهی در مدول‌های هر دو نوع سلول پس از درمان ۲۴ ساعته با فاکتور رشد تبدیل‌کننده بتا را نشان داد. مدول برای MDA-MB-231 کاهش یافت در حالی که MCF-7 پاسخ سفت شدن را نشان داد.

حبیب نژاد کورایم و همکاران [13] بر روی یافتن خواص مکانیکی سلول سرطان پستان (MCF-7)، الاستیک و ویسکوالاستیک با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی تمرکز کرده‌اند. آن‌ها توپوگرافی و خواص ظاهری سلول MCF-7 را مورد مطالعه قرار داده، سپس نتایج آنالیز را با نتایج دیگر پژوهش‌ها مقایسه کرده‌اند تا از اعتبار اطمینان حاصل کنند. پس از تشخیص دقیق سلول‌های MCF-7، منحنی‌های نیرو- عمق نفوذ برای سی و یک سلول، هر کدام در سه نقطه مختلف، به دست آمد، مازول الاستیسیته هر نقطه با استفاده از تئوری‌های هرتز و دیمیتریادیس محاسبه شده است. در مرحله بعد، ویسکوزیته و در نتیجه سختی و ویسکوزیته در اعماق فرورفتگی‌های مختلف اندازه‌گیری شده و در نهایت تابع خزش مناسب برای رفتار ویسکوالاستیک MCF-7 با استفاده از مدل کلین-وویگت استخراج شد.

از آنجایی که سرطان یک بیماری آنتروپیک است، سلول‌های سرطانی نسبت به سلول‌های طبیعی در سطحشان غشای بزرگ‌تری دارند، کورایم و همکاران [14] به بررسی تأثیر ضریب چین‌خوردگی سطح سلول خوش خیم سرطان سینه (MCF10A)

طاهری [18] به بررسی مدل‌های اصطکاکی جدید در منیپولیشن دو بعدی بافت سرطانی معده پرداخته است. وی به منظور یافتن مطلوب‌ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی در نانومنپولیشن بافت سرطانی، با هدف کاوش سطح و به دست آوردن اطلاعات مربوط به بافت سرطانی معده با کمترین آسیب، شبیه‌سازی دو بعدی نانومنپولیشن را انجام داده است. همچنین طاهری [19] هندسه‌های مختلف نانوذره طلا در جابه‌جایی فاز دوم منیپولیشن سه بعدی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی را مورد مطالعه قرار داده است.

کورایم و رستگار [20] به توسعه منیپولیشن سه بعدی سلول‌های بیولوژیکی ویسکوالاستیک توسط میکروسکوپ نیروی اتمی بر اساس مدل‌های تماسی و کشش نوسانی پرداخته‌اند. کورایم و همکارانش [21] به توسعه و کاربرد مدل‌های تماس ویسکوالاستیک زیر در فاز اول منیپولیشن سه بعدی برای میکرو/نانو ذرات بیولوژیکی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند.

با توجه به مطالعات انجام شده، مشاهده می‌شود که روش‌های متفاوتی برای محاسبه مدول یانگ سلول‌های مختلف وجود دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی و با استفاده از سه نوع تیرک مختلف با هندسه‌های مستطیلی (Rectangular)، وی-شکل (V-shape) و خنجری (Dagger) به جابه‌جایی بافت سرطانی MCF10 پرداخته شده است. علاوه بر کار تجربی، به شبیه‌سازی نظری بافت سرطانی با استفاده از مدل تماسی هرترز پرداخته شده است.

نمودارهای ترسیمی حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده، در نرم‌افزار متلب انجام شده است. همچنین به منظور محاسبه دقیق‌تر مدول الاستیسیته (یانگ)، به مقایسه نتایج حاصل از کار تجربی و تئوری پرداخته شده است. نوآوری این پژوهش صورت گرفته نسبت به دیگر پژوهش‌ها استفاده از سه نوع تیرک با هندسه‌های مختلف به منظور دستیابی به مدول الاستیسیته دقیق‌تر و اعمال نیروی کمتر به جهت عدم آسیب‌رسانی به بافت می‌باشد. تمامی داده‌ها در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است.

مدل‌سازی

یکی از محدودیت‌های استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، ناکارآمدی آن در داخل بدن است؛ اما با توجه به استفاده از تیرک و سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی در مطالعات و اندازه مناسب

پرداخته‌اند. برای تعیین توپوگرافی سلول‌های MCF10 از ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شده است. سپس از تصاویر و نتایج به دست آمده برای استخراج آزمایشی ضریب چین‌خوردگی سلول‌ها استفاده شد. با اعمال این ضریب در مدل‌های تماس هرترز، دی‌ام‌تی و جی‌ک‌آر در حالت‌های الاستیک و ویسکوالاستیک، این مدل‌ها اصلاح شده‌اند و شبیه‌سازی سه مدل نشان داد که نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن چین‌خوردگی در محاسبات به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. علاوه بر این، شبیه‌سازی جابه‌جایی سه بعدی در هر دو حالت الاستیک و ویسکوالاستیک با و بدون در نظر گرفتن چین‌خوردگی انجام شده است. در نهایت، نتایج برای بررسی اثرات چین‌خوردگی سطح سلول به نیروی بحرانی و زمان بحرانی لغزش و غلتش در تماس با بستر و نوک میکروسکوپ نیروی اتمی در مدل جابه‌جایی سه بعدی مقایسه شد.

کورایم و همکاران [15] به صورت مجزا به بررسی دو نوع متداول تیرک‌ها یعنی تیرک‌های وی-شکل و خنجری پرداخته‌اند. برای مدل‌سازی سختی تیرک وی-شکل، این تیرک به دو قسمت تقسیم شده است؛ قسمت اول مثلثی و قسمت دوم شامل دو تیر مورب مستطیلی است. سپس سختی هر قسمت به‌طور مجزا مدل شده و سختی نهایی محاسبه شده است. برای مدل‌سازی سختی تیرک خنجری نیز از همین روش استفاده شده و تیرک به دو قسمت مثلثی و مستطیلی تقسیم شده و سختی نهایی به دست آورده شده است. همچنین با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای-فست به انتخاب مناسب نوع تیرک و پارامترهای آن پرداخته شده است. در انتها نشان داده شده است که تیرک خنجری برای جابه‌جایی ذرات بیولوژیکی مناسب‌تر است.

دنگ و همکاران [16] مزایا و معایب روش‌های مختلف مطالعه سلولی را با پیشرفت در استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در تحقیقات سرطان مقایسه کرده‌اند. دلایل توجه آن‌ها به میکروسکوپ نیروی اتمی شامل توانایی تصویربرداری و مشاهده فراساختار سلول‌های زنده با وضوح اتمی در شرایط فیزیولوژیکی نزدیک، جمع‌آوری اطلاعات طیف‌سنجی نیرو و مطالعه خواص مکانیکی سلول‌ها است.

نورثکات و همکاران [17] تغییرات فیزیکی که باعث پیشرفت تومورها می‌شود را توضیح داده‌اند. آن‌ها همچنین در مورد روابط متقابل و درمان‌های نوظهور برای کاهش تنش‌های مکانیکی‌ای که سرطان را به بدخیمی می‌رسانند، بحث کردند.

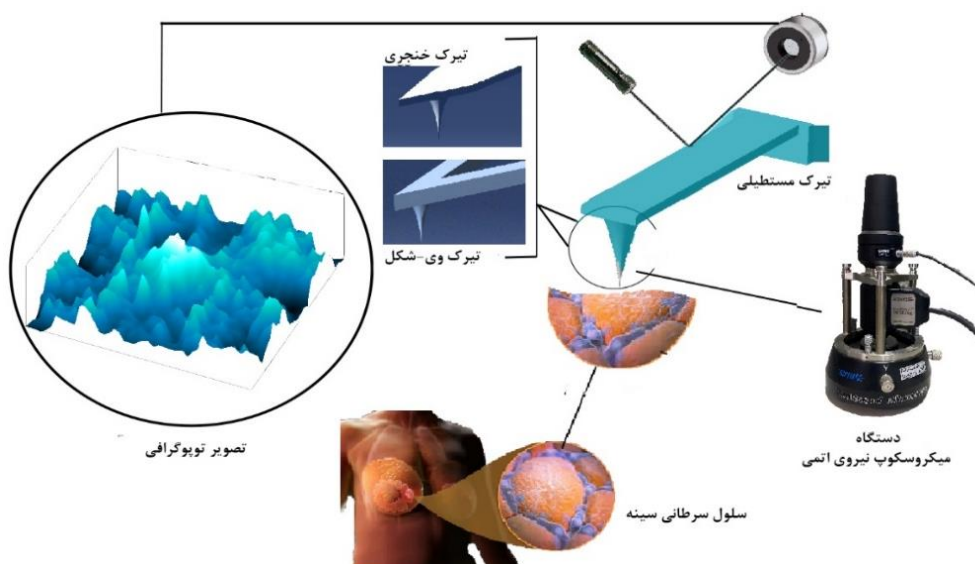
۱. مرحله اول آماده سازی نمونه های بیولوژیکی: در این مرحله پس از جداسازی بافت از نمونه، ابتدا بافت شسته می شود. سپس نیم درصد از ماده تثبیت کننده (Glutaraldehyde) به مدت یک دقیقه بر روی سلول ها قرار می گیرد، سپس بافت مورد نظر سه بار و هر بار به مدت ۴ دقیقه با نمک شستشو داده می شود و پس از خشک شدن، ظرف حاوی بافت داخل دستگاه قرار می گیرد.

۲. مرحله دوم تصویربرداری از نمونه های بیولوژیکی: پس از قرار دادن لام در زیر میکروسکوپ نیروی اتمی، ارتفاع میکروسکوپ تنظیم شده و سپس تصویربرداری انجام می شود. تصویربرداری با بزرگنمایی های مختلف به منظور تشخیص محل دقیق بافت و هندسه تقریبی آن انجام می شود. در این تحقیق از میکروسکوپ نیروی اتمی با تیرک هایی با هندسه های مستطیلی، وی-شکل و خنجر استفاده شده است. سوزن تیرک میکروسکوپ از سیلیکون تک کریستال ساخته شده است.

آن ها برای استفاده در بدن، امکان استفاده از این شبیه سازی ها در میکرو ربات های ساخته شده در آینده وجود دارد که موجب تشخیص و بهبود سریع برای انواع سرطان ها می شود. فرایند مورد استفاده در این مطالعه جابه جایی سلول سرطانی سینه با بهره گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از سه نوع تیرک با هندسه های مستطیلی، وی-شکل و خنجر به منظور بررسی و تخمین محدوده مدول یا ننگ بافت سرطانی MCF10 می باشد. شکل (۱) روند فرایند جابه جایی را نشان می دهد. با توجه به تعریف مسئله، در این بخش ابتدا به بررسی کار تجربی و روند آماده سازی بافت سرطانی پرداخته شده، سپس به تفسیر انواع تیرک ها و روابط حاکم بر آن ها پرداخته شده است. در بخش نتایج، تصاویر و نمودارهای به دست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی و همچنین شبیه سازی نظری آورده شده است. در نهایت با مقایسه این نتایج، مقدار مدول یا ننگ بافت سرطان سینه محاسبه می شود.

کار تجربی و مراحل آماده سازی بافت

به منظور بررسی بافت سرطان سینه و تصویربرداری از آن با میکروسکوپ نیروی اتمی مراحل زیر انجام شده است:



شکل ۱ فرایند جابه جایی با میکروسکوپ نیروی اتمی

میکروسکوپ نیروی اتمی متصل است منتقل می‌شود. تصاویر با استفاده از نرم‌افزار DME ذخیره و ضبط می‌شوند. حرکت سوزن بر روی نمونه موجب محاسبه نیروی وارد بر سلول و عمق نفوذ می‌شود. از نتایج مهم میکروسکوپ نیروی اتمی تصاویر توپوگرافی است، که شکل سلول را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می‌شود، تصویر سه بعدی توپوگرافی ثبت شده توسط میکروسکوپ برای سلول سرطانی MCF10 سینه آورده شده است.

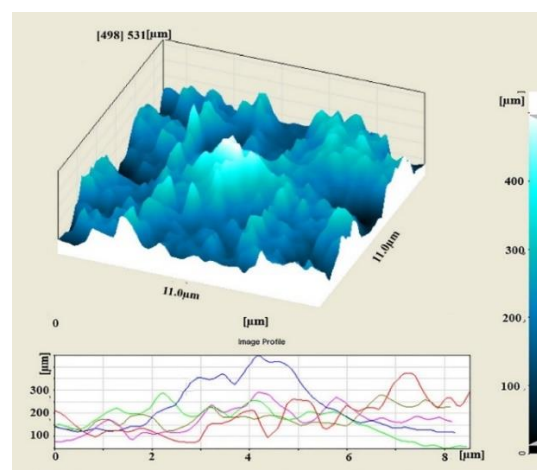
با توجه به تصاویر ارائه شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل (۲)، می‌توان مشاهده کرد که هندسه سلول بسیار پیچیده است؛ اما از آنجایی که در شبیه‌سازی‌ها به هندسه سلول نیاز است. از این جهت به منظور دستیابی به هندسه دقیق سلول می‌توان در نرم‌افزار DME به منظور میانگین‌گیری از ارتفاع سلول، خطوط یا محدوده‌هایی تعریف کرد؛ بنابراین مطابق شکل (۲-ب)، در این پژوهش به منظور ساده‌سازی شبیه‌سازی‌ها، هندسه بافت سرطانی سینه تقریباً برابر با شکل کروی در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌سازی سختی انواع مختلف تیرک‌ها

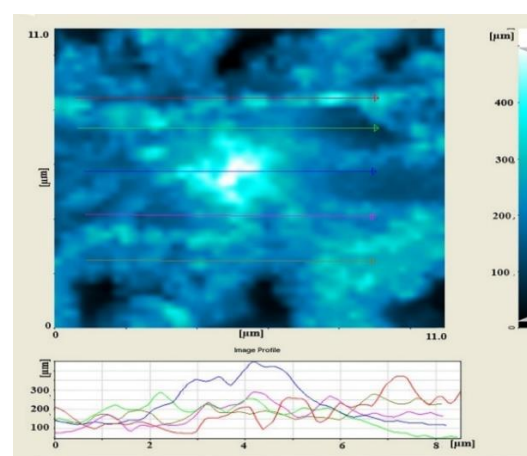
تیرک‌های مورد استفاده در فرایند جابه‌جایی از سه هندسه مستطیلی، وی-شکل و خنجری تشکیل شده‌اند. سختی هر یک از آن‌ها در فضای دو بعدی و سه بعدی قابل محاسبه می‌باشد. در این بخش به منظور استفاده از سه هندسه مختلف تیرک برای تخمین مدول یانگ بافت سرطانی سینه، به بررسی سختی پیش‌بینی و طولی در فضای دو بعد برای هر یک از تیرک‌های مستطیلی، وی-شکل و خنجری پرداخته شده است. همچنین مشخصات هندسی تیرک‌های مستطیلی، وی-شکل و خنجری در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات هندسی تیرک‌ها

مشخصات هندسی					شکل تیرک
طول (میکرومتر)	ضخامت (میکرومتر)	عرض (میکرومتر)	فاصله انتهای تیرک و نوک آن (میکرومتر)	نصف زاویه بین دو بازو (درجه)	
۲۲۵	۱	۴۸	۴	-	مستطیلی
۲۲۵	۱	۲۷	۴	۲۷	وی-شکل
۲۲۵	۱	۵۲	۴	۳۵	خنجری



(الف)



(ب)

شکل ۲ تصاویر توپوگرافی از بافت سینه: الف) تصویر سه بعدی بافت سینه، ب) تخمین هندسه بافت

انجام آزمایش‌ها با میکروسکوپ نیروی اتمی

پس از قرار دادن بافت مورد نظر در موقعیت خاص خود، یک کاوشگر برای شناسایی ویژگی‌های سطح پردازش می‌کند. سپس توسط سوزن دستگاه تصویری از سلول استخراج خواهد شد. سپس، تصاویر پردازش شده به کامپیوتری که به

$$Z_1 = \frac{6F_Z L_1}{Ew't^3} \left[\frac{(L_1 - d)^2}{2} + d(L_1 - d) \left(\ln \frac{d}{L_1} - 1 \right) + L_1 \ln \frac{L_1}{d} \right] \quad (۸)$$

$$Z_2 = \frac{F_Z L_2^2}{Ew't^3 \cos^2 \alpha} \left[\frac{2L_2}{\cos \alpha} + 3(w' \cot \alpha - d \cos \alpha - r \sin \alpha) \right] \quad (۹)$$

$$\theta_2 = \frac{3F_Z L_2 (1 - \nu)}{Ew't^3 \cos^2 \alpha} \left[\frac{w'}{\sin \alpha} - d - r \cot \alpha \right] \quad (۱۰)$$

$$K_Z = F_Z [Z_1 + Z_2 + q_2 \left(\frac{w'}{\sin \alpha} - d \right)]^{-1} \quad (۱۱)$$

در معادلات فوق، d فاصله بین انتهای تیرک و نوک تیرک، ν نسبت پواسون، E مدول الاستیسیته، F_Z نیروی عمودی اعمال شده به تیرک، t ضخامت تیرک و α نشان‌دهنده نیمی از زاویه بین دو بازو است. همچنین w عرض بازوها به موازات لبه سطح مبنا (عمود بر لبه بازو نیست) و L طول تیرک است که مستقیماً از لبه مبنا به سمت رأس اندازه‌گیری می‌شود و موازی با بازو نیست. هازل و همکاران [22] معادله‌ای برای سختی پیچشی تیرک ارائه کرده‌اند که در گشتاور به‌جای نیرو و به نوک تیرک اعمال می‌شود. همچنین تغییر زاویه به‌جای تغییر طول اندازه‌گیری می‌شود. معادله (۱۲) بیانگر سختی پیچشی است [15].

$$K_\theta = \frac{Et^3}{3(1 + \nu)} \left[\frac{1}{\tan \alpha} \log \frac{w'}{d \sin \alpha} + \frac{L_2 \cos \alpha}{w'} - \frac{3 \sin 2\alpha}{8} \right]^{-1} \quad (۱۲)$$

همچنین برای بیان سختی جانبی تیرک معادله (۱۳) با استفاده از روش تحلیلی تیموشنکو برای یک تیرک مثلثی ارائه شده است:

$$K_y = Et(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \left[\ln \left(\frac{L}{d} \right) \right]^{-1} \quad (۱۳)$$

که در آن $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{w}{L_1} \right)$ می‌باشد.

بررسی سختی تیرک خنجری

به‌منظور محاسبه ضریب سختی عمودی این نوع تیرک‌ها، تیرک خنجری به دو بخش مثلثی و مستطیلی تقسیم شده و برای محاسبه خیز در راستای عمودی از معادلات مربوط به تیر مستطیلی استفاده شده است. در قسمت مثلثی مطابق رابطه (۱۵)، معادلات خیز و به دنبال آن شیب را می‌توان از رابطه (۱۶) استخراج نمود [15].

بررسی سختی تیرک مستطیلی

ساده‌ترین نوع تیرک‌ها، تیرک مستطیلی می‌باشد. معادلات سختی این مدل تیرک ساده می‌باشند. برای محاسبه سختی تیرک مستطیلی از روابط خیز تیر مستطیلی یک سر درگیر استفاده شده است. معادلات (۱) تا (۳) به ترتیب بیانگر سختی عمودی، پیچشی و جانبی تیرک مستطیلی می‌باشند [15].

$$K_Z = \frac{Ewt^3}{4(L - d)^3} \quad (۱)$$

$$K_\theta = \frac{Gwt^3}{3(L - d)} \quad (۲)$$

$$K_y = \frac{Ew^3t}{4(L - d)^3} \quad (۳)$$

در معادلات سختی، w عرض تیرک، L طول تیرک، t ضخامت تیرک، d فاصله نقطه وارد شدن نیروها و گشتاورها از سر تیرک و E مدول الاستیسیته می‌باشد.

بررسی سختی تیرک وی-شکل

تیرک وی-شکل به دو بخش مستطیلی و مثلثی و سختی هر قسمت محاسبه شده است. سختی نهایی با استفاده از اصل بر هم نهی نهایی محاسبه شده است. برای تعیین سختی تیرک‌های وی-شکل، کارهای تحقیقاتی نظری و تجربی زیادی انجام شده است، که می‌توان آن‌ها را در سه گروه مدل‌های نظری یا ابعادی، اندازه‌گیری انحراف استاتیک و اندازه‌گیری انحراف دینامیکی طبقه‌بندی کرد [22]. مدلی که اغلب برای تعیین ضریب سختی عمودی کنسول‌های وی-شکل استفاده می‌شود. توسط ساب‌به دست آمده است [23]. در معادلات (۴) تا (۱۱) ابتدا خیز مستطیلی و سپس مثلثی حساب شده و بعد از آن برآیندگیری انجام شده است. معادله (۱۱) سختی عمودی تیرک وی شکل را نشان می‌دهد [15].

$$L_1 = \frac{w}{\tan \alpha} \quad (۴)$$

$$L_2 = (L \tan \alpha - w) \cot \alpha \quad (۵)$$

$$w' = w \cos \alpha \quad (۶)$$

$$r = \frac{L_2 \tan \alpha + (w' - d \sin \alpha)(1 - \nu) \cos \alpha}{2 - (1 - \nu) \cos^2 \alpha} \quad (۷)$$

استخراج تجربی مدول یانگ

در این بخش به تخمین مدول یانگ بافت سرطانی MCF-10 با نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی با بهره‌گیری از سه هندسه تیرک مستطیلی، وی-شکل و خنجری پرداخته شده است همچنین به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده به مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های تئوری پرداخته شده است.

به منظور ارائه نمودار مربوط به نیرو-عمق نفوذ و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی از نظریه مکانیک تماس هرترز استفاده شده است. محاسبه مدول یانگ به دو روش امکان‌پذیر است:

۱. با بهره‌گیری از نمودار نیرو-عمق نفوذ، نرم‌افزار MATLAB شیب خط برازش شده بیانگر مدول یانگ می‌باشد.

۲. به دست آوردن مدول یانگ در هر عمق نفوذ با بهره‌گیری از یک تابع برحسب عمق نفوذ و استفاده از فاکتورهای مدول یانگ میکروسکوپ نیروی اتمی، عمق نفوذ، شعاع تماس، زاویه سوزن، ضریب پواسون و شعاع کندشدگی سوزن.

مطابق شکل (۳)، نمودار نیرو-عمق نفوذ حاصل از جابه‌جایی سلول سرطان سینه برای هر سه هندسه تیرک شامل مستطیلی، وی-شکل و خنجری که در آن نیرو برحسب نانو نیوتن و عمق نفوذ سوزن برحسب نانومتر می‌باشد، نشان داده شده است. در طول بارگذاری‌ها، آزمایش‌ها پنج بار انجام شده و میانگین نتایج رسم شده است. علاوه بر رسیدن به مدول یانگ دقیق‌تر، دلیل استفاده از سه هندسه مختلف تیرک، انتخاب تیرک مناسب به جهت عدم تخریب بافت بوده است. با افزایش نیروی بارگذاری، عمق نفوذ افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از تخریب بافت سلول سرطانی، باید متناسب با ذره بیولوژیکی و با در نظر گرفتن عمق فرورفتگی مجاز، بارگذاری مناسب انتخاب شود.

$$Z_1 = \frac{6F_Z L_1}{Ew't^3} \left[\frac{(L_1 - d)^2}{2} + d(L_1 - d) \left(\ln \frac{d}{L_1} - 1 \right) + L_1 \ln \frac{L_1}{d} \right] \quad (14)$$

$$Z_2 = \frac{4F_Z L_2^3}{Ewt^3} + \frac{6F_Z(L_1 - d)L_2}{Ewt^3} \quad (15)$$

$$\theta_2 = \frac{6F_Z L_2^2}{Ewt^3} + \frac{12F_Z(L_1 - d)L_2}{Ewt^3} \quad (16)$$

در معادلات (۱۴) تا (۱۶)، با توجه به مشخصات هندسی تیرک‌ها روابط (۱۷) تا (۱۹) را داریم:

$$L_1 = \frac{w}{\tan \alpha} \quad (17)$$

$$L_2 = (L \tan \alpha - w) \cot \alpha \quad (18)$$

$$w' = w \cos \alpha \quad (19)$$

بنابراین معادله (۲۰) بیانگر سختی عمودی تیرک خنجری می‌باشد:

$$K_Z = F_Z [Z_1 + Z_2 + \theta_2(L_1 - d)]^{-1} \quad (20)$$

سختی پیچشی و جانبی تیرک خنجری نیز همانند سختی عمودی محاسبه می‌شود؛ که روابط آن به ترتیب در معادلات (۲۱) تا (۲۹) آورده شده است. معادلات (۲۳) و (۲۹) به ترتیب سختی پیچشی و جانبی را نشان می‌دهند [15].

$$\phi_1 = \frac{3T(1 + \nu)}{Et^3 \tan \alpha} \log \frac{L_1}{d} \quad (21)$$

$$\phi_2 = \frac{6L_2 T(1 + \nu)}{Ewt^3} \quad (22)$$

$$K_\theta = \frac{T}{\phi_1 + \phi_2} \quad (23)$$

$$y_2 = \frac{4F_y L_2^3}{Ew^3 t} + \frac{6F_y(L_1 - d)L_2}{Ew^3 t} \quad (24)$$

$$\beta_2 = \frac{F_y L_2^2}{2EI} + \frac{F_y(L_1 - d)L_2}{EI} \quad (25)$$

$$y_1 = \frac{3F_y}{2tE \tan^3 \alpha} \left(-\ln d - \frac{d}{2d} \right) + c_1 d + c_2 \quad (26)$$

$$c_1 = \frac{-3F_y}{2tE \tan^3 \alpha} \left(-\frac{1}{L_1} - \frac{d}{2L_1^2} \right) \quad (27)$$

$$c_2 = \frac{-3F_y}{2tE \tan^3 \alpha} \left(-\ln L_1 - \frac{d}{2L_1} \right) + \frac{3F_y L_1}{2tE \tan^3 \alpha} \left(-\frac{1}{L_1} + \frac{d}{2L_1^2} \right) \quad (28)$$

$$K_Z = F_y [y_1 + y_2 + \beta_2(L_1 - d)]^{-1} \quad (29)$$

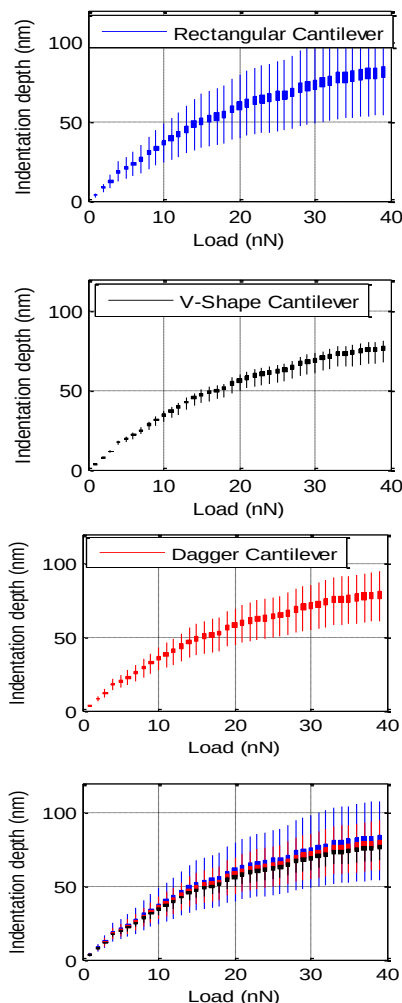
در نظر داشت که نتایج حاصل از کارهای تجربی به صورت میانگین و ثابت ترسیم می‌شوند. با در نظر گرفتن مدول‌های یانگ مختلف نتایج تئوری حاصل از هندسه‌های مختلف تیرک‌ها تغییر می‌کنند. در شکل (۴-الف)، محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ پاسکال برای مدول یانگ بافت سرطانی سینه در تمامی معادلات تئوری در نظر گرفته شده است. نمودار به دست آمده از نتایج تجربی در تعداد زیادی از نقاط با نمودارهای به دست آمده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی با تیرک مستطیلی مطابقت دارد. توضیح این نکته ضروری است که تیرک مستطیلی نسبت به تیرک وی-شکل و خنجری نیروی بیشتری به بافت وارد می‌کند و محدوده گسترده و با دقت کمتری از مدول را می‌تواند پیش‌بینی کند.

شبیه‌سازی حاصل از تیرک خنجری

شبیه‌سازی‌های نظری و تجربی برای تیرک خنجری در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. در شکل (۴-ب)، محدوده مدول یانگ برابر با ۱۱۲۰ تا ۱۳۲۰ پاسکال می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار تجربی ما بین نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی با تیرک خنجری در محدوده مدول یانگ فرض شده قرار گرفته است. تیرک خنجری نیروی کمتری نسبت به تیرک مستطیلی، در عین حال نیرویی بیشتر از تیرک وی-شکل به بافت وارد می‌کند؛ بنابراین مدول یانگ پیش‌بینی شده حاصل از شبیه‌سازی با تیرک خنجری دقت بیشتری نسبت به تیرک مستطیلی و دقت کمتری نسبت به تیرک وی-شکل خواهد داشت؛ که این موضوع با توجه به نمودارهای موجود در شکل (۴) قابل مشاهده است.

شبیه‌سازی حاصل از تیرک وی-شکل

تیرک وی-شکل در شکل (۴-ج) برای استخراج مدول یانگ استفاده شده است. در شکل (۴-ج)، محدوده مدول یانگ برابر با ۱۲۰۰ تا ۱۲۵۰ پاسکال در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۴-ج) مشاهده می‌شود، با تغییر مقدار محدوده مدول یانگ و استفاده از تیرک وی-شکل مشاهده می‌شود که نمودار تجربی در محدوده کمتری از مدول یانگ، مابین نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی قرار گرفته است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که چون تیرک وی-شکل نیروی کمتری به بافت وارد می‌کند بنابراین محدوده کمتری برای مدول یانگ به ما می‌دهد و نتایج دقیق‌تری را می‌تواند برای مدول یانگ پیش‌بینی کند.



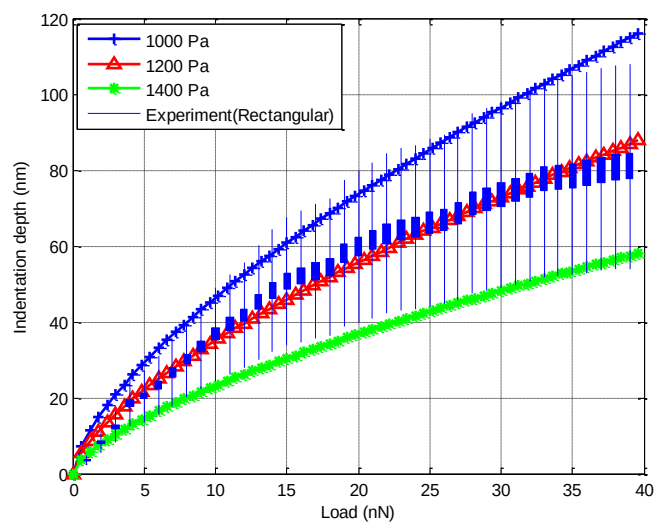
شکل ۳ نمودار نیرو-عمق نفوذ برای ۳ تیرک با هندسه‌های مستطیلی، وی-شکل و خنجری

برآورد مدول یانگ با شبیه‌سازی تیرک‌های مختلف

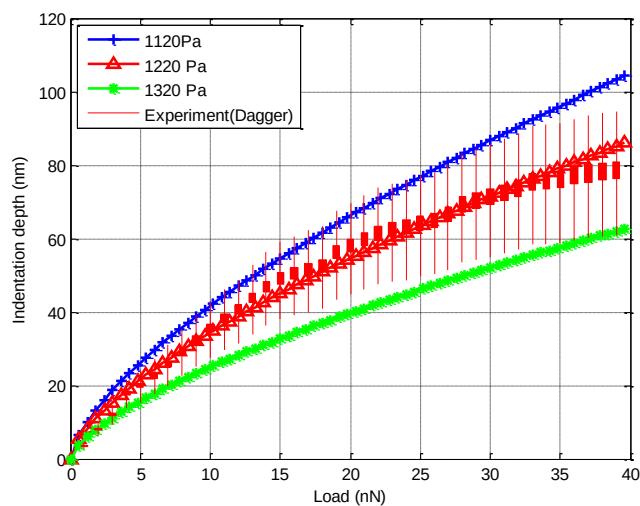
مدل تماسی هرتز ساده‌ترین نظریه مکانیک تماس می‌باشد، که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این بخش، داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی فرایند جابه‌جایی بافت سرطانی سینه با استفاده از تیرک‌های مستطیلی، وی-شکل و خنجری به منظور استخراج مدول یانگ سلول سرطانی MCF-10 مورد بحث قرار گرفته است.

شبیه‌سازی حاصل از تیرک مستطیلی

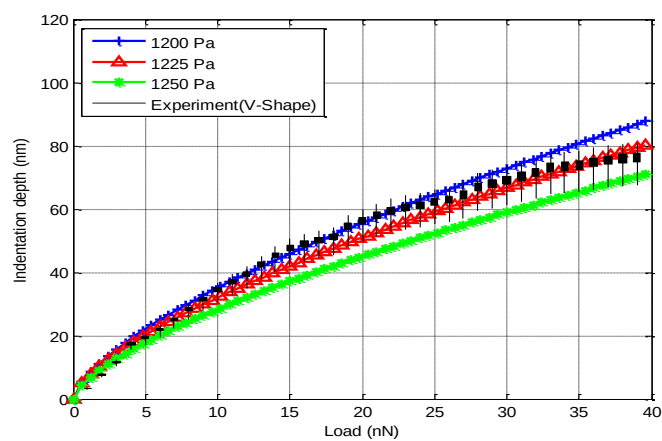
شکل (۴-الف) مدول یانگ سلول‌های سرطان سینه را با استفاده از تیرک مستطیلی استخراج می‌کند. محدوده انتخابی برای مدول یانگ بر اساس تحقیقات قبلی که با روش‌های دیگر انجام شده‌اند، انتخاب شده که در قسمت صحت‌سنجی به منظور اطمینان از صحت نتایج از این مراجع استفاده شده است. در این فرایند باید



(الف)



(ب)



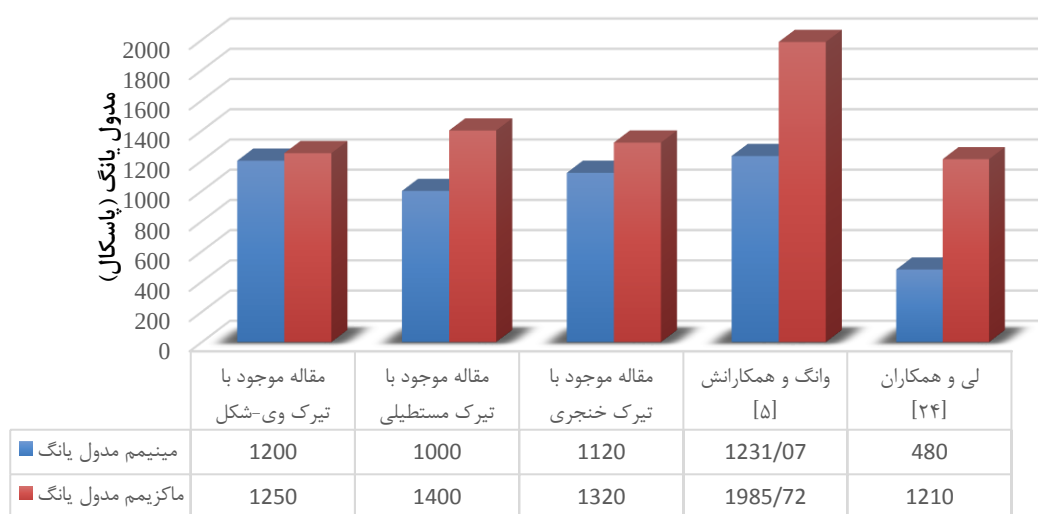
(ج)

شکل ۴ مقایسه تجربی و تئوری مدول یانگ بافت سرطانی سینه با استفاده از تیرک‌های مختلف: (الف) مستطیلی، (ب) خنجری و (ج) وی-شکل

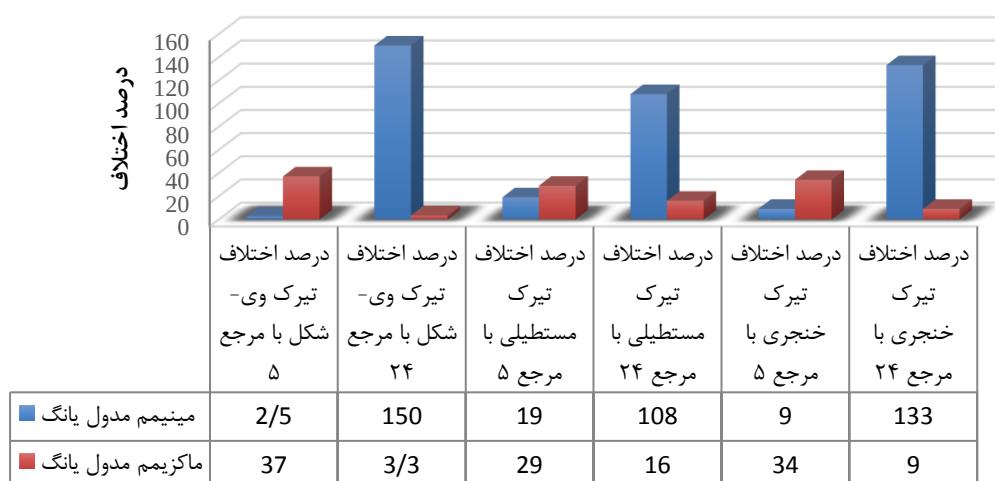
صحت سنجی پژوهش

هندسه تیرک وی-شکل نشان دهنده مدول یانگ دقیق تری نسبت به دو هندسه دیگر می باشد؛ بنابراین در این بخش به منظور بررسی داده های موجود، مقدار مدول یانگ به دست آمده در این تحقیق با تیرک وی-شکل با مراجع [5] و [24] مقایسه شده است. در تمامی نتایج از میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شده است. همان طور که از نتایج به دست آمده مشاهده شد با در نظر گرفتن تیرک وی-شکل در این مقاله نتایج تجربی به شکل دقیق تری در محدوده نتایج تئوری و بین مقادیر ۱۲۰۰ الی ۱۲۵۰ پاسکال قرار

گرفته است. شکل های (۵) و (۶) به ترتیب به مقایسه مقادیر مینیمم و ماکزیمم مقدار و درصد اختلاف مدول یانگ بافت سرطانی سینه با در نظر گرفتن سایر پژوهش ها پرداخته است. همان طور که مشاهده می شود مقادیر مدول یانگ به دست آمده در این پژوهش در محدوده پژوهش های گذشته قرار دارد. یکی از دلایل تفاوت در مقادیر مدول یانگ، تفاوت در نوع تیرک استفاده شده در میکروسکوپ نیروی اتمی است. کاربرد تیرک وی-شکل به دلیل عدم آسیب رسانی به ذرات بیولوژیکی بسیار مهم است.



شکل ۵ نمودارهای صحت سنجی



شکل ۶ درصد اختلاف نتایج

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

امروزه سرطان سینه یک بیماری شایع در زنان است که معمولاً در مراحل اولیه هیچ علامتی ایجاد نمی‌کند، اما اگر به سرعت و به موقع تشخیص داده شود، شانس درمان موفقیت‌آمیز بیماران بسیار افزایش می‌یابد. روش‌های مختلفی برای تشخیص بافت‌های سرطانی وجود دارد که یکی از این راه‌ها بررسی مدول یانگ بافت است. برای استخراج مدول یانگ در بافت‌های بیولوژیکی روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از جدیدترین آن‌ها استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی است. در این تحقیق با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، تصاویر سه بعدی از بافت سرطان سینه MCF-10 برای تخمین شکل هندسی بافت استخراج شده است. علاوه بر این، نمودارهایی از عمق نفوذ سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی در بافت با توجه به نیروی اعمال شده به آن با استفاده از سه هندسه تیرک مستطیلی، وی-شکل و خنجری به‌منظور تعیین مدول یانگ به دست آمده است. هندسه بافت سلولی کروی فرض شده است. مدول یانگ بافت سرطانی MCF-10 با استفاده از بررسی نمودارهای حاصل از نتایج تجربی و مقایسه آن‌ها با شبیه‌سازی‌ها استخراج شده است. شبیه‌سازی‌ها برای هر سه هندسه تیرک و با استفاده از مدل تماسی هرتر انجام شده و نتایج به دست آمده نشان داده است، از آن جایی که تیرک وی-شکل نیروی کمتری به بافت وارد می‌کند، این امر باعث پیش‌بینی دقیق‌تری برای مدول یانگ بافت سرطانی سینه خواهد شد. محدوده مدول یانگ برای تیرک وی-شکل نسبت به دو هندسه دیگر دقیق‌تر به دست آمده است که منجر به تشخیص دقیق بافت‌های سرطانی و جداسازی بافت‌های سالم و سرطانی شود.

فهرست علائم

d فاصله سوزن از سر تیرک

مراجع

- [1] M. Taheri and m. mirzalu, "Theoretical and Experimental Simulation of Young Modulus Extraction of Breast MCF-10 Cells Using Atomic Force Microscope," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 37-45, (2021). (in Persian)
- [2] M. Taheri and M. Mirzalu, "Experimental Extraction of Young's Modulus of MCF-7 Breast Cancer Cell Using Spherical Contact Models," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 12, pp. 5769-5784, (2022). (in Persian)

E مدول الاستیسیته (یانگ)

F_z نیروی عمودی اعمالی به تیرک

h طول سوزن

K_y سختی جانبی

K_z سختی عمودی

K_θ سختی پیچشی

L طول تیرک

L_1 طول قسمت مثلثی تیرک

L_2 طول قسمت مستطیلی تیرک

t ضخامت تیرک

w عرض تیرک

علائم یونانی

α زاویه سر تیرک

ν ضریب پواسون

واژه نامه

Atomic force microscopy	میکروسکوپ نیروی اتمی
Dagger Cantilever	تیرک خنجری
Rectangular Cantilever	تیرک مستطیلی
V-shape	تیرک وی-شکل

تقدیر و تشکر

- [3] I. Guido, M. S. Jaeger, and C. Duschl, "Dielectrophoretic stretching of cells allows for characterization of their mechanical properties," *European Biophysics Journal*, vol. 40, no. 3, pp. 281-288, (2011).
- [4] 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*, pp. -, (2023). (in Persian)
- [5] Y. Wang et al., "Quantitative analysis of the cell-surface roughness and viscoelasticity for breast cancer cells discrimination using atomic force microscopy," *Scanning*, vol. 38, no. 6, pp. 558-563, (2016).
- [6] M. Li, L. Liu, N. Xi, and Y. Wang, "Atomic force microscopy studies on cellular elastic and viscoelastic properties," *Science China Life Sciences*, vol. 61, no. 1, pp. 57-67, (2018).
- [7] J. Iturri, A. Weber, A. Moreno-Cencerrado, M. D. Vivanco, R. Benítez, S. Leporatti, J. L. Toca-Herrera, "Resveratrol-induced temporal variation in the mechanical properties of MCF-7 breast cancer cells investigated by atomic force microscopy, " *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 13, 3275, (2019).
<https://doi.org/10.3390/ijms20133275>
- [8] M. Taheri and H. Faraji, "Extraction of force and critical time of three-dimensional manipulation of colon cancer tissue with different models of Persson friction," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 12, no. 6, pp. 113-123, 2023. (in Persian)
- [9] M. Mirzalu, F. Fereiduni, M. Taheri, and M. Modabberifar, "Experimental extraction of Young's modulus of MCF-7 tissue using atomic force microscopy and the spherical contact models," *European Biophysics Journal*, vol. 52, no. 1, pp. 81-90, 2023.
- [10] J. Rother, H. Nöding, I. Mey, and A. Janshoff, "Atomic force microscopy-based microrheology reveals significant differences in the viscoelastic response between malign and benign cell lines," *Open Biol*, vol. 4, no. 5, p. 140046, 2014.
- [11] M. Li, N. Xi, Y.-c. Wang, and L.-q. Liu, "Atomic force microscopy for revealing micro/nanoscale mechanics in tumor metastasis: from single cells to microenvironmental cues," *Acta Pharmacologica Sinica*, vol. 42, no. 3, pp. 323-339, 2021.
- [12] A. H. Kulkarni, A. Chatterjee, P. Kondaiah, and N. Gundiah, "TGF- β induces changes in breast cancer cell deformability," *Phys Biol*, vol. 15, no. 6, p. 065005, 2018.
- [13] M. H. Korayem, Y. H. Sooha, and Z. Rastegar, "MCF-7 cancer cell apparent properties and viscoelastic characteristics measurement using AFM," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no. 6, p. 297, 2018.
- [14] M. H. Korayem, S. Shahali, and Z. Rastegar, "Experimental determination of folding factor of benign breast cancer cell (MCF10A) and its effect on contact models and 3D manipulation of biological particles," *Biomech Model Mechanobiol*, vol. 17, no. 3, pp. 745-761, 2018.
- [15] M. Habibnejad Korayem, S. Dehghani Ghahnaviyeh, M. Ghasemi, and M. Taheri, "Effect of different geometrical parameters of atomic force microscope cantilevers in critical force and time based on manipulation with applying EFAST sensitivity analyses," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 310-316, 2015. (in Persian)

- [16] X. Deng, F. Xiong, X. Li, B. Xiang, Z. Li, X. Wu, C. Guo, X. Li, Y. Li, G. Li, W. Xiong, and Z. Zeng, "Application of atomic force microscopy in cancer research," *Journal of Nanobiotechnology*, vol. 16, pp. 1-15, 2018. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0428-0>
- [17] J. M. Northcott, I. S. Dean, J. K. Mouw, and V. M. Weaver, "Feeling Stress: The Mechanics of Cancer Progression and Aggression," *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, Review vol. 6, (2018).
- [18] 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. (in Persian)
- [19] M. Taheri, "Investigation of different geometry of gold nanoparticles in the displacement of the second phase of three-dimensional manipulation using an AFM," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 9, no. 8, pp. 1-11, 2022. (in Persian)
- [20] M. Habibnejad Korayem and Z. Rastegar, "Development of 3D manipulation of viscoelastic biological cells by AFM based on contact models and oscillatory drag," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 28, no. 24, pp. 2572-2584, 2021.
- [21] M. H. Korayem, M. Mozafari, Y. H. Sooha, and 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.
- [22] M. H. Korayem and M. Zakeri, "The effect of off-end tip distance on the nanomanipulation based on rectangular and V-shape cantilevered AFMs," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, no. 5, pp. 579-589, 2010.
- [23] J. E. Sader and C. P. Green, "In-plane deformation of cantilever plates with applications to lateral force microscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 75, no. 4, pp. 878-883, 2004.
- [24] Q. Li, G. Y. Lee, C. N. Ong, and C. T. Lim, "AFM indentation study of breast cancer cells," *Biochemical and Biophysical Research Communications*, vol. 374, no. 4, pp. 609-613, 2008.

Implementation of Gibbs-Appell method in the Dynamic Analysis of a Novel Serial-Parallel Hybrid Robot PP-(3RSS-PS)

Research Article

Seyed Nader Nabavi¹, Javad Enferadi²

DOI: [10.22067/JACSM.2023.83429.1193](https://doi.org/10.22067/JACSM.2023.83429.1193)

1- Introduction

Parallel robots can achieve higher accuracy and structural stiffness compared to serial robots. A new branch of robots, known as hybrid robots, has emerged that takes advantage of both serial and parallel robots. These robots can be utilized in various applications, including minimally invasive surgical procedures, machining operations, and simulation industries.

In 2020, Enferadi [12] introduced the 3RSS-S spherical parallel robot, which has suitable features for motion simulation. By modifying the introduced robot and combining it with an XY gantry serial robot, he introduced a full DOF hybrid motion platform. The main attribute of the robot is the hollow shaft design and consequently, unlimited yaw motion of the robot. On the other hand, the compact design of the robot and its suitable workspace volume index have made it suitable for simulator applications. Therefore, analyzing the kinematics and dynamics of the introduced robot is of special importance.

There are certain simple methods to obtain kinematic equations and Jacobian analysis of robots. Obtaining a dynamic model of a robot is a prerequisite for control and simulation purposes. To obtain the dynamic equation of the PP-(3RSS-PS) hybrid robot, the Gibbs-Appell method is considered a simple energy-based method in which less computational burden is required. To ensure the accuracy of the dynamic model, the robot is modeled in MSC-ADAMS software. For this purpose, six independent trajectories according to each DOF of the robot were defined and results were verified. The presented robot has the potential to be used as a new platform for the simulation industry.

2- Structural model of the PP-(3RSS-PS) robot

The PP-(3RSS-PS) robot is a 6-DOF hybrid robot constituting a 4-DOF parallel robot mounted on a conventional serial XY table. In Figure 1, a hybrid robot is shown in which the parallel part of the robot is mounted on the XY table. The parallel robot part has a 3RSS-PS structure which consists of a base platform connected by four kinematic chains to the moving platform. Three of

these kinematic chains are identical RSS legs responsible for the robot's orientation and the fourth kinematic chain is a PS leg.

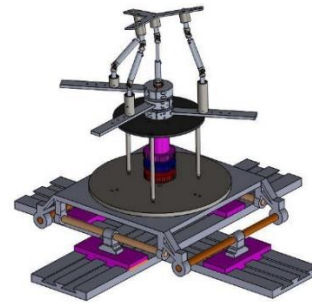


Figure 1: The 3D Model of the PP-(3RSS-PS) hybrid robot

3- Governing kinematics equations of the robot

Kinematics is the study of relationships between the end-effector motion and robot actuators. Figure 2 shows the kinematics chain of the robot. By solving the inverse kinematics of the hybrid robot, eight solutions for the robot actuators are obtained.

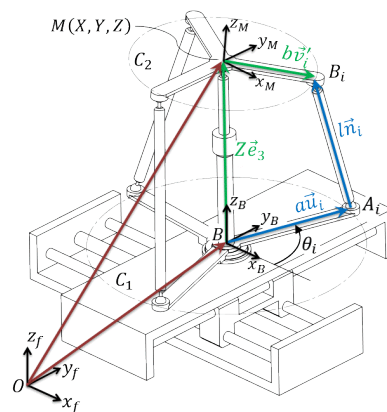


Figure 2: The i^{th} closed kinematic chain of the PP-(3RSS-PS) robot

The matrices $\dot{q} = [\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z} \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$ and $\dot{X} = [\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z} \ \Omega_x \ \Omega_y \ \Omega_z]^T$ are defined as the joint

*Manuscript received: July 14, 2023. Revised, July 30, 2023, Accepted, August 20, 2023.

¹ Corresponding author: Assistant Professor Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran. Email: s.nader.nabavi@ub.ac.ir

² Mechanical Engineering Department, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

velocities and EE velocities of the robot, respectively. As a result, the Jacobian matrix of the $\underline{PP}$ -(3 $\underline{RSS}$ - $\underline{PS}$) robot is obtained as:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}}; \quad \mathbf{J} = \mathbf{J}_2^{-1}\mathbf{J}_1 \quad (1)$$

in which $\mathbf{J}$ is the Jacobian matrix.

3. Governing dynamics equations of the robot

The general form of the Gibbs-Appell equation is as follows:

$$\begin{aligned} S = \frac{1}{2}m(\ddot{\mathbf{a}}_A \cdot \ddot{\mathbf{a}}_A) + \frac{1}{2}\left(\ddot{\mathbf{a}} \cdot \frac{\partial \vec{H}_A}{\partial t}\right) + \ddot{\mathbf{a}} \cdot (\vec{\omega} \times \vec{H}_A) \\ + m\ddot{\mathbf{a}}_A \cdot (\ddot{\mathbf{a}} \times \vec{r}_{G/A}) \\ + m\ddot{\mathbf{a}}_A \cdot [\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{G/A})] \end{aligned} \quad (2)$$

As can be seen, the terms of the Gibbs-Appell equation are similar to those of kinetic energy function. To specify the motion of the robot, a set of generalized coordinates should be selected. In the case of $\underline{PP}$ -(3 $\underline{RSS}$ - $\underline{PS}$) hybrid robot, the generalized coordinates are defined as the vector form $\mathbf{q} = [X \ Y \ Z \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$. In order to find generalized forces governing the robot motion corresponding to each generalized coordinate, first, the Gibbs-Appell equation is constructed for each of the moving components of the robot. Next, the derivative of these equations concerning the acceleration of the desired generalized coordinates is calculated. By the superposition of the obtained partial derivatives, the equation of generalized forces is written as follows:

$$\begin{aligned} Q_i = \frac{\partial S_{P_1}}{\partial \ddot{q}_i} + \frac{\partial S_{P_2}}{\partial \ddot{q}_i} + \frac{\partial S_{P_3}}{\partial \ddot{q}_i} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial S_a^j}{\partial \ddot{q}_i} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial S_l^j}{\partial \ddot{q}_i} \\ + \frac{\partial S_P}{\partial \ddot{q}_i} \end{aligned} \quad (3)$$

In Eq. 3, the acceleration energy function of X , Y , and Z actuators are represented by S_{P_1} , S_{P_2} , and S_{P_3} , respectively. Moreover, the acceleration energy function for the j^{th} rotary actuators, j^{th} middle link, and moving platform are indicated by S_a^j , S_l^j , and S_P , respectively. Also, Q_i refers to the generalized force corresponding to the i^{th} generalized coordinate that is equal to:

$$\mathbf{Q} = [F_{e_1} \ F_{e_2} \ F_{e_3} \ \tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T \quad (4)$$

where F_{e_i} is the applied force, and $\vec{e}_i$ and τ_i represent the applied torque to each rotary link.

4- Simulation and results validation

To ensure that the dynamic equations of the robot have been solved properly, the results of the theoretical model are compared with MSC-ADAMS commercial dynamics modeling software. In order to create a suitable simulation for the desired hybrid robot, six trajectories are defined in the Cartesian workspace. Figure 3 shows the diagram of the forces and torques of the robot actuators for the Surge trajectory, which shows a good agreement between the analytical solution and the simulation.

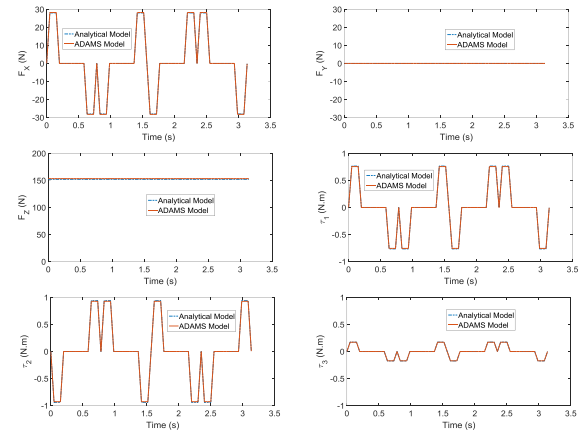


Figure 3: Required actuators force of the $\underline{PP}$ -(3 $\underline{RSS}$ - $\underline{PS}$) robot applied in the surge trajectory

5- Conclusion

Simulation results using MSC-ADAMS outputs in six particularly defined trajectories proved the correctness of the obtained dynamic model for global consideration. As a result, analytical and simulation models can be used interchangeably. The straightforwardness of Gibbs-Appell method made equation derivation and programming code generation easy since a fixed function is used to calculate the dynamic of each part separately. What distinguished this robot from other robots is its independent modular X and Y workspace and unlimited yaw movement with a compact footprint design. Independent movement in the X and Y directions, despite the need to use larger actuators in these two directions, will make the path design and control of the robot much simpler in these directions. The proposed $\underline{PP}$ -(3 $\underline{RSS}$ - $\underline{PS}$) hybrid robot could be used as a case study for optimization and comparison with other conventional simulators considering different performance indices.



پایاده سازی روش گیبس - اپل در تجزیه و تحلیل دینامیکی یک ربات جدید هیبریدی سریال - موازی (PP-(3RSS-PS)*

مقاله پژوهشی

سید نادر نبوی^(۱) جواد انفرادی^(۲)

DOI: 10.22067/JACSM.2023.83429.1193

چکیده این مقاله یک طراحی مفهومی از یک ربات هیبریدی جدید به نام PP-(3RSS-PS) را معرفی می‌کند که به طور خاص برای شبیه سازی حرکت در نظر گرفته شده است. ربات ارائه شده چندین مزیت قابل توجه را ارائه می‌دهد، از جمله طراحی ساختاری ساده و فشرده که باعث ایجاد فضای کاری بزرگ برای ربات می‌شود. محوره های X و Y برای تسهیل فازهای شتاب طولانی طراحی شده اند، در حالی که طراحی شفت توخالی سیستم انتقال قدرت، حرکت یابو نامحدود را امکان پذیر می‌کند. در کاربردهای خاصی مانند مانورهای هوایی مانند حرکت هلیکوپتر، توانایی دست یابی به حرکت در جهت یابو نامحدود برای ارائه شبیه سازی های دقیق و معلق در هوا اهمیت زیادی دارد. برای برقراری ارتباط بین فضای مفصلی و فضای کارتریزین، تحلیل های جامع سینماتیک، ژاکوبین و دینامیکی ربات انجام می‌شود. این روابط مقدماتی، پایه و اساس تحقیقات بعدی مانند مطالعات بهینه سازی را میسر می‌کند. فرمول گیبس-اپل برای استخراج معادلات دینامیکی استفاده می‌شود که نسبت به روش لاگرانژ از کارایی محاسباتی برخوردار است. برای اعتبارسنجی مدل تحلیلی، شبیه سازی با استفاده از نرم افزار MSC-ADAMS انجام شده است. این شبیه سازی شامل شش مسیر از پیش تعریف شده است که از یک شبیه ساز حرکت صنعتی اتخاذ شده است. اعتبارسنجی موفقیت آمیز نتایج نه تنها صحت مدل تحلیلی را تأیید می‌کند، بلکه انگیزه های برای تحقیقات بیشتر در جستجوی یک شبیه ساز حرکت جایگزین استثنایی می‌کند.

واژه های کلیدی ربات هیبریدی، سنتز ربات ها، دینامیک، گیبس - اپل، شبیه ساز حرکتی.

Implementation of Gibbs-Appell Method in Dynamic Analysis of a Novel Serial-Parallel Hybrid Robot PP-(3RSS-PS)

Seyed Nader Nabavi

Javad Enferadi

Abstract This paper introduces a conceptual design of a new hybrid robot, named PP-(3RSS-PS), specifically intended for motion simulation. The presented robot offers several notable advantages, including a simple and compact structural design that optimizes its large workspace. The modular X and Y axes are engineered to facilitate extended acceleration phases, while the power transmission system's hollow shaft design enables unlimited yaw motion. In certain applications like aerial maneuvers, dogfights, and helicopter operations, the ability to achieve unlimited yaw motion holds significant importance for delivering precise and immersive simulations. To establish the relationship between joint space and Cartesian space parameters, comprehensive kinematic, Jacobian, and dynamic analyses of the robot are performed. These preliminary relations lay the foundation for subsequent investigations, such as optimization studies. The Gibbs-Appell formulation is employed to derive the dynamic equations, leveraging its computational efficiency over the Lagrange method. To validate the analytical model, a simulation using MSC-ADAMS software is conducted. This simulation incorporates six predefined trajectories adopted from an industrial motion simulator. Successful validation of the results would not only confirm the accuracy of the analytical model but also motivate further research in search of an exceptional alternative motion simulator.

Key Words Hybrid robot, Robot synthesis, Dynamic, Gibbs-Appell, Motion simulator.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۵/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۲۳ می‌باشد.

Email: s.nader.nabavi@ub.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد، بجنورد،

(۲) استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد.

مقدمه

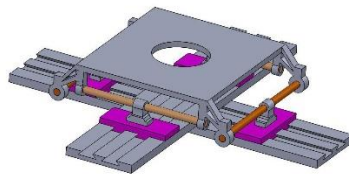
ربات‌های سری به طور گسترده‌ای در کاربردهایی که به فضای کاری بزرگ و ماهرانه نیاز دارند، استفاده می‌شوند. از طرفی توانایی ربات‌های موازی در دستیابی به دقت بالاتر و همچنین سفتی ساختاری بالاتر، بیشتر از ربات‌های سری است. شاخه جدیدی از ربات‌ها که از مزایای هر دو نوع ربات سری و موازی بهره می‌برند در اوایل دهه ۹۰ معرفی شدند که به عنوان ربات هیبریدی شناخته می‌شوند [1-3].

محققان ربات‌های هیبریدی مختلفی با ویژگی‌های منحصر به فرد طراحی کرده‌اند. بسته به ترتیب زنجیره سینماتیک، یک ساختار ترکیبی را می‌توان به نوع موازی-موازی، نوع سریال-موازی و نوع موازی-سریال طبقه‌بندی کرد [4,5]. در عمل‌های جراحی کم‌تهاجمی که هر دو دقت و مهارت از اهمیت یکسانی برخوردارند، معمولاً ربات‌های هیبریدی موازی-سریال انتخاب می‌شوند. برای این کاربرد، به طور کلی، یک ربات سریال به عنوان یک ماژول ماکرو عمل می‌کند و یک ربات موازی وظیفه موقعیت‌دهی میکرو را انجام می‌دهد [6,7]. در صنعت شبیه‌سازی، ربات‌های هیبریدی می‌توانند برای وسایل نقلیه خاص طراحی شوند. ربات جدیدی به نام Dim که توسط سازندگان خودرو طراحی و آزمایش شده است، یک ربات هیبریدی موازی-موازی با زنجیره سینماتیک (6-UPS)-(3-UPS) است [8]. با استفاده از این ربات تولید حرکت واقعی برای شبیه‌سازی خودرو امکان‌پذیر شده است. پیش از این، ربات‌های استوارت بر روی یک یا دو ریل خطی عمود بر یکدیگر برای کاربردهای شبیه‌سازی خودرو نصب می‌شدند. در [9] یک ربات هیبریدی برای جراحی ایمپلنت دندان معرفی شده است که از ربات استوارت برای عمل جراحی با دقت بالا استفاده می‌کند. دونگ و همکاران نیز در [10] مدل‌سازی دینامیکی یک ربات هیبریدی ۵ درجه آزادی برای کاربردهای ماشین‌کاری را انجام داده‌اند. همچنین آن‌ها به طراحی بهینه این ربات بر اساس شاخص‌های عملکردی ربات پرداخته‌اند و تأثیر متغیرهای طراحی را بر روی این شاخص‌ها بررسی کرده‌اند. در [11] نیز یک ربات هیبریدی نرم-سخت با چندین ماژول معرفی شده است. هر یک از ماژول‌ها می‌تواند برای محدوده‌های حرکتی مختلف و نیازهای نیرویی متفاوت به کار گرفته شود و یک ربات ماژولار با انواع ساختارهای سینماتیک داشت.

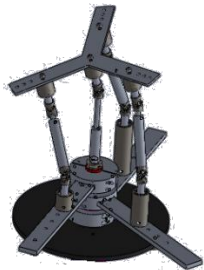
اکثر ربات‌های شبیه‌ساز حرکت هیبریدی بیش از ۶ درجه آزادی دارند. در این مقاله، ترکیبی از ربات XY و 3RSS-PS برای ساخت یک سکوی متحرک هیبریدی کامل استفاده شده است. ربات 3RSS-PS معرفی شده در این مقاله نسخه اصلاح شده ربات موازی کروی 3RSS-S است که توسط انفرادی [12] ارائه شده است که از ویژگی‌های مناسب برای کاربرد شبیه‌سازی حرکت بهره می‌برد. ویژگی اصلی ربات، طراحی شفت توخالی و در نتیجه آن حرکت در جهت یابو نامحدود است. ترکیب ربات 3RSS-PS با میز متحرک XY، یک ربات ترکیبی با شاخص حجم فضای کاری بزرگ و مناسب برای کاربردهای شبیه‌ساز ایجاد می‌کند [13-16]. استفاده از شاخص‌هایی برای بهینه‌سازی ساختار ربات‌های هیبریدی مختلف رایج است [17,18]. طیف گسترده‌ای از شاخص‌های عملکرد با استفاده از معادلات سینماتیکی، ماتریس ژاکوبین یا معادلات دینامیکی وجود دارد.

به دست آوردن مدل دینامیکی یک ربات مقدماتی برای اهداف کنترل و شبیه‌سازی است. به طور کلی دینامیک کلاسیک، حرکت ربات‌ها را با دو رویکرد دینامیک برداری و دینامیک تحلیلی توصیف می‌کند. دینامیک برداری بر اساس استفاده مستقیم از قانون حرکت نیوتن است، در حالی که دینامیک تحلیلی از روش‌های متداول انرژی و توابع اسکالر مانند انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل استفاده می‌کند. روش‌های دینامیکی برداری متفاوتی مانند روش نیوتن اوایلر [19,20] و نظریه پیچ (Screw theory) [21] و همچنین روش‌های مبتنی بر انرژی مانند روش لاگرانژی [22]، روش کین [23] و اصل کار مجازی [24] استفاده می‌شود. برای به دست آوردن معادله دینامیکی حرکت ربات‌های مختلف هر یک از این روش‌ها نسبت به روش‌های دیگر بسته به مطالعه موردی مزایای خاصی دارند. اساساً برای به دست آوردن معادلات دینامیکی با استفاده از روش مبتنی بر انرژی، بار محاسباتی کمتری مورد نیاز است. برای به دست آوردن معادله دینامیکی ربات هیبریدی (3RSS-PS)-PP، روش گیبس-آپل (Gibbs-Appell) به عنوان یک روش ساده مبتنی بر انرژی در نظر گرفته شده است.

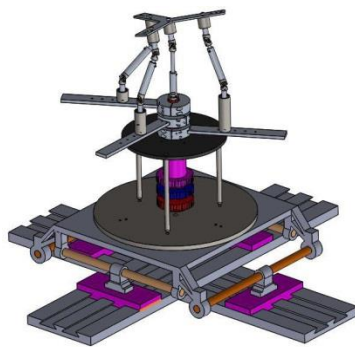
در این مقاله ضمن ارائه یک ربات جدید هیبرید (سریال-موازی)، مدل دینامیکی این ربات نیز استخراج و صحت‌گذاری شده است. در مقایسه با سایر ربات‌های مورد استفاده برای



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱ الف) بخش سریال، ب) بخش موازی، پ) ربات هیبریدی

سینماتیک ربات

علم سینماتیک مطالعه رابطه بین حرکت مجری نهایی ربات و محرک‌های ربات است. مسئله سینماتیک معکوس موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی ربات را با حرکت محرک‌ها مرتبط می‌کند. در شکل (۲) نمای شماتیک ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS) آورده شده است. لازم به ذکر است که برای ساده‌سازی معادلات، ضخامت اجزا نادیده گرفته شده است. در شکل (۲)، C_1 یک صفحه دایره‌ای با ضخامت صفر است که به جای صفحه پایه استفاده می‌شود و از مرکز اتصالات کروی پایینی عبور می‌کند. به طور مشابه، C_2 جایگزینی برای صفحه متحرک است که مرکز اتصالات کروی بالایی در قسمت محیطی آن قرار دارد. سیستم مختصات پایه $\{x_B y_B z_B\}$ و سیستم مختصات متحرک $\{x_M y_M z_M\}$ در مرکز صفحات C_1 و C_2 یعنی نقاط B و M قرار دارند. هر کدام از این سیستم‌های مختصات بر حسب سیستم

شبیه‌سازی حرکت، مکانیزم پیشنهادی از مزیت امکان ایجاد حرکت نامحدود یا بهره‌می‌برد که در بسیاری از کاربردها مفید می‌باشد. مستقل بودن حرکت در جهت‌های X و Y علی‌رغم ایجاد نیاز به استفاده از عملگرهای بزرگ‌تر در این دو راستا، طراحی مسیر و کنترل ربات در این راستاها را بسیار ساده‌تر خواهد کرد. با ویژگی‌های ذکر شده ربات پیشنهادی از شاخص فضای کاری مناسبی برخوردار است و همچنین دقت و سفتی ربات به واسطه ساختار موازی بالاتر می‌باشد.

هندسه ربات

ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS) با شش درجه آزادی از یک ربات موازی چهار درجه آزادی تشکیل شده است که بر روی یک میز سریال XY معمولی نصب شده است. در شکل (۱) بخش ربات سریال و موازی ربات هیبریدی به طور جداگانه نشان داده شده است. بخش سریال از دو ماژول خطی عمود بر هم ساخته شده است. این ماژول‌ها در طول‌ها و مشخصات مختلف به راحتی در دسترس هستند و می‌توان آن‌ها را با توجه به نیازهای کاربردی انتخاب کرد. بخش ربات موازی با ساختار 3RSS-PS از یک صفحه پایه تشکیل شده است که توسط چهار زنجیره سینماتیکی به صفحه متحرک متصل شده است. سه تا از این زنجیره‌های سینماتیکی پایه‌های RSS یکسانی هستند که برای جهت‌گیری ربات مورد استفاده قرار می‌گیرند و چهارمین زنجیره سینماتیکی یک پایه PS است. لازم به ذکر است هنگامی که صفحه متحرک ربات نسبت به صفحه ثابت ربات دارای جهت‌گیری باشد، حرکت در امتداد محور Z نیز می‌تواند به تنهایی بر جهت‌گیری مجری نهایی ربات تأثیر بگذارد. هر پایه RSS شامل یک مفصل چرخشی و یک جفت مفصل کروی متوالی است، در حالی که پایه PS از یک مفصل کشویی متصل به یک مفصل کروی ساخته شده است.

ساختار هیبریدی این ربات مزایای متعددی را به همراه دارد. طول محورهای X و Y را می‌توان به طور مستقل و به اندازه دلخواه برای ایجاد حرکت انتقالی خالص انتخاب کرد. آرایش منحصر به فرد لینک‌های دورانی نیز به ربات اجازه می‌دهد تا چرخش نامحدود حول محور Z داشته باشد.

$$\overrightarrow{OB} + a\vec{u}_i + l\vec{n}_i = \overrightarrow{OM} + Rb\vec{v}'_i \quad (3)$$

که در آن a و b به ترتیب اندازه بردارهای $\overrightarrow{BA_i}$ و $\overrightarrow{MB_i}$ هستند. بردارهای تعریف شده در سیستم مختصات متحرک با نماد $'''$ متمایز می شوند. با ضرب نقطه‌ای معادله (۳) در بردار $\vec{n}_i$ و جای گذاری $\vec{u}_i$ با $[\cos \theta_i \quad \sin \theta_i \quad 0]^T$ خواهیم داشت:

$$E_1 \sin \theta_i + E_2 \cos \theta_i = E_3 \quad (4)$$

که در آن،

$$E_1 = 2a(Rb\vec{v}'_i)_y \quad (5)$$

$$E_2 = 2a(Rb\vec{v}'_i)_x \quad (6)$$

$$E_3 = (Rb\vec{v}'_i)_x^2 + (Rb\vec{v}'_i)_y^2 + ((Rb\vec{v}'_i)_z + Z)^2 + a^2 - l^2 \quad (7)$$

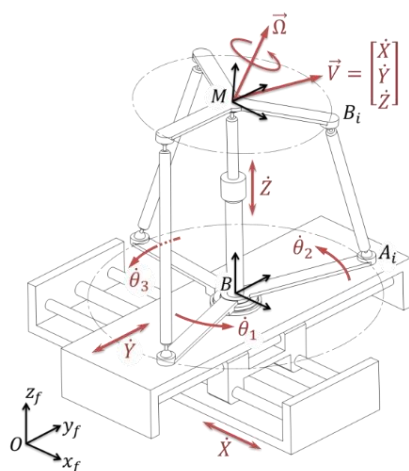
زیر نویس k که برابر x یا y یا z است، مؤلفه بردار را نشان می دهد. با استفاده از معادلات مثلثاتی مقدار θ_i از معادله (۴) استخراج خواهد شد و برابر است با:

$$\theta_i = \tan^{-1}(E_1/E_2) \pm \tan^{-1}\left(\sqrt{E_1^2 + E_2^2 - E_3}/E_3\right) \quad (8)$$

دو راه حل ممکن برای هر θ_i وجود دارد. لذا با توجه به سه محرک دورانی موجود ۸ جواب برای سینماتیک معکوس ربات هیبریدی وجود دارد.

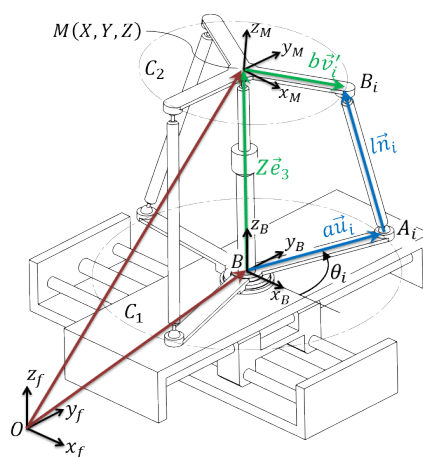
تحلیل سرعت و شتاب ربات

ماتریس ژاکوبین سرعت‌ها را از فضای مفصل به مجری نهایی ربات نگاشت می کند. در شکل (۳) بردارهای سرعت برای ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS) آورده شده است.



شکل ۳ پارامترهای سرعت ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS)

مختصات جهانی $\{x_f y_f z_f\}$ بیان می شوند. بردارهای واحد $\vec{v}_i$ و $\vec{u}_i$ نیز به ترتیب راستای یک بردارهای $\overrightarrow{BA_i}$ و $\overrightarrow{MB_i}$ را نشان می دهند. طول لینک‌های میانی که نقاط A_i را به نقاط B_i متصل می کنند برابر l است. بردار $\vec{n}_i$ نیز راستای هر لینک میانی را مشخص می کند. نقطه M نشان داده شده در شکل با مختصات (X, Y, Z) نیز به عنوان مجری نهایی ربات عمل می کند.



شکل ۲ زنجیره سینماتیکی i ام ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS)

ماتریس تبدیل بین سیستم مختصات جهانی و پایه فقط شامل انتقال است در حالی که سیستم مختصات متحرک جهت گیری‌های متفاوتی را می تواند نسبت به سیستم مختصات پایه داشته باشد. بردارهای واحد در سیستم مختصات ثابت و پایه به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\vec{e}_1 = [1 \quad 0 \quad 0]^T, \quad \vec{e}_2 = [0 \quad 1 \quad 0]^T, \quad \vec{e}_3 = [0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (1)$$

برای به دست آوردن ماتریس دوران سیستم مختصات متحرک نسبت به سیستم مختصات پایه یا همان ماتریس R از زوایای اوایلر استفاده می شود که دارای سه دوران متوالی θ ، ϕ و ψ به ترتیب حول محورهای X ، Y و Z است. فرم توسعه یافته ماتریس R به صورت معادله (۲) بیان می شود.

$$R = R_Z R_Y R_X = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\phi s\theta - c\phi s\psi & s\phi s\psi + c\phi c\psi s\theta \\ c\theta s\psi & c\psi c\phi + s\theta s\phi s\psi & c\phi s\psi s\theta - c\psi s\phi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

مطابق شکل (۲)، معادله شکل بسته زنجیره سینماتیکی i ام به صورت زیر نوشته شده است:

زاویه‌ای i امین لینک میانی و $\vec{\Omega}$ شتاب زاویه‌ای صفحه متحرک ربات است.

تحلیل دینامیک ربات

هدف از مسئله دینامیک معکوس ربات یافتن نیروهای مورد نیاز محرک‌ها برای پیمایش یک مسیر معین است. روش‌های مختلفی برای به دست آوردن معادلات دینامیکی یک ربات وجود دارد. در سال ۱۸۷۹ [25] گیبس روشی مبتنی بر روش‌های انرژی ارائه کرد که توسط Appell در سال ۱۸۹۹ توسعه یافت [26]. فرمول گیبس-آپل در سیستم‌های غیرهولونومیک در مقایسه با روش لاگرانژ برتری دارد، زیرا سرعت مختصات تعمیم یافته را به همراه مشتقات آن‌ها جایگزین می‌کند. شکل کلی معادله گیبس-آپل به صورت زیر است:

$$S = \frac{1}{2} m(\vec{a}_A \cdot \vec{a}_A) + \frac{1}{2} \left(\vec{\alpha} \cdot \frac{\partial \vec{H}_A}{\partial t} \right) + \vec{\alpha} \cdot (\vec{\omega} \times \vec{H}_A) + m \vec{a}_A \cdot (\vec{\alpha} \times \vec{r}_{G/A}) + m \vec{a}_A \cdot [\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{G/A})] \quad (15)$$

همان طور که مشاهده می‌شود، بخش‌های مختلف معادله گیبس-آپل مشابه تابع انرژی جنبشی است. به همین دلیل به عنوان تابع انرژی شتاب نیز شناخته می‌شود که در معادله فوق A یک نقطه دلخواه از جسم صلب، m جرم جسم صلب، $\vec{a}_A$ بردار شتاب خطی نقطه A و $\vec{\alpha}$ بردار شتاب زاویه‌ای جسم صلب است. $\vec{H}_A$ تکانه زاویه‌ای جسم صلب حول نقطه A ، $\vec{\omega}$ بردار سرعت زاویه‌ای جسم صلب و $\vec{r}_{G/A}$ بردار موقعیت مرکز جرم جسم صلب نسبت به نقطه A است.

برای مشخص کردن حرکت ربات باید مجموعه‌ای از مختصات تعمیم یافته انتخاب شود. در مورد ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS)، مختصات تعمیم یافته به صورت بردار $q = [X \ Y \ Z \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ تعریف می‌شوند. برای یافتن نیروهای تعمیم یافته حاکم بر حرکت ربات مربوط به هر مختصات تعمیم یافته، ابتدا معادله گیبس-آپل برای هر یک از اجزای متحرک ربات تشکیل می‌شود. سپس مشتق این معادلات با توجه به شتاب مختصات تعمیم یافته مورد نظر محاسبه می‌شود. با مجموع مشتقات جزئی به دست آمده، معادله نیروهای تعمیم یافته به صورت زیر محاسبه می‌شود:

با مشتق‌گیری از معادله (۳) و با در نظر گرفتن بردارهای $\dot{X} = [\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z} \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$ و $\dot{q} = [\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z} \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$ به عنوان بردار سرعت مفاصل محرک و بردار سرعت مجری نهایی، ماتریس ژاکوبین ربات PP-(3RSS-PS) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{X} = J\dot{q}; \quad J = J_2^{-1}J_1 \quad (9)$$

که ماتریس‌های J_1 و J_2 به صورت زیر هستند:

$$J_1 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & a\vec{n}_1^T(\vec{e}_3 \times \vec{u}_1) & 0 & 0 \\ \phi_{3 \times 2} & -n_1^T \vec{k} & 0 & 0 \\ -n_2^T \vec{k} & 0 & a\vec{n}_2^T(\vec{e}_3 \times \vec{u}_2) & 0 \\ -n_3^T \vec{k} & 0 & 0 & a\vec{n}_3^T(\vec{e}_3 \times \vec{u}_3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \phi_{3 \times 3} \\ \phi_{3 \times 3} & b(\mathcal{R}b\vec{v}'_1 \times \vec{n}_1)^T \\ b(\mathcal{R}b\vec{v}'_2 \times \vec{n}_2)^T \\ b(\mathcal{R}b\vec{v}'_3 \times \vec{n}_3)^T \end{bmatrix} \quad (11)$$

در معادلات (۱۰) و (۱۱)، ماتریس‌های I و ϕ به ترتیب نشان دهنده ماتریس‌های صفر و همانی هستند. سرعت زاویه‌ای لینک‌های میانی یا همان $\vec{\omega}_i$ نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\vec{\omega}_i = \frac{1}{i} [\dot{Z}\vec{n}_i \times \vec{e}_3 + b\vec{n}_i \times (\vec{\Omega} \times \mathcal{R}\vec{v}'_i) - a\dot{\theta}_i \vec{n}_i \times (\vec{e}_3 \times \vec{u}_i)] \quad (12)$$

برای به دست آوردن معادلات دینامیکی، می‌بایست مشتق دوم موقعیت و جهت‌گیری تمامی قطعات متحرک محاسبه گردد. پس از ساده‌سازی، معادله شتاب بین اجزای ربات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\ddot{\theta}_i = \frac{1}{a\vec{n}_i \cdot (\vec{e}_3 \times \vec{u}_i)} \left\{ a\dot{\theta}_i^2 (\vec{n}_i \cdot \vec{u}_i) - i\vec{n}_i \cdot (\vec{\omega}_i \times (\vec{\omega}_i \times \vec{n}_i)) + \ddot{Z}(\vec{n}_i \cdot \vec{e}_3) + b\vec{n}_i \cdot (\ddot{\vec{\Omega}} \times \mathcal{R}\vec{v}'_i) + b\vec{n}_i \cdot (\ddot{\vec{\Omega}} \times (\vec{\Omega} \times \mathcal{R}\vec{v}'_i)) \right\} \quad (13)$$

$$\ddot{\alpha}_i = \frac{1}{i} \left\{ \ddot{Z}(\vec{n}_i \times \vec{e}_3) + b\vec{n}_i \times (\ddot{\vec{\Omega}} \times \mathcal{R}\vec{v}'_i) + b\vec{n}_i \times (\ddot{\vec{\Omega}} \times (\vec{\Omega} \times \mathcal{R}\vec{v}'_i)) + a\dot{\theta}_i^2 (\vec{n}_i \times \vec{u}_i) - i\vec{n}_i \times (\vec{\omega}_i \times (\vec{\omega}_i \times \vec{n}_i)) - a\ddot{\theta}_i \vec{n}_i \times (\vec{e}_3 \times \vec{u}_i) \right\} \quad (14)$$

که در آن $\ddot{\theta}_i$ شتاب زاویه‌ای i امین محرک دورانی، $\ddot{\alpha}_i$ شتاب

$$S_P = \frac{1}{2} m_P (\vec{a}_M \cdot \vec{a}_M) + \frac{1}{2} \dot{\vec{\Omega}} \cdot \frac{\partial(\vec{H}_M)}{\partial t} + \dot{\vec{\Omega}} \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{H}_M) \quad (18)$$

که در آن m_P جرم صفحه متحرک و بردار شتاب نقطه M برابر $\vec{a}_M = [\ddot{X} \quad \ddot{Y} \quad \ddot{Z}]^T$ است. مشتق تکانه زاویه‌ای نسبت به زمان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\vec{H}_M)}{\partial t} = \frac{\partial({}^{B_{IP}}\vec{\Omega})}{\partial t} = {}^{B_{IP}}\dot{\vec{\Omega}} + \vec{\Omega} \times {}^{B_{IP}}\vec{\Omega} \quad (19)$$

که در آن ${}^{B_{IP}}$ تانسور اینرسی صفحه متحرک است که در سیستم مختصات پایه $\{B\}$ بیان شده است. پس از جایگزینی معادله (۱۹) در معادله (۱۸)، مشتق تابع انرژی شتاب صفحه متحرک بر حسب شتاب مختصات تعمیم یافته برابر است با:

$$\frac{\partial S_P}{\partial \dot{q}_i} = m_P \left(\vec{a}_M \cdot \frac{\partial \vec{a}_M}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial \dot{\vec{\Omega}}}{\partial \dot{q}_i} \cdot {}^{B_{IP}}\dot{\vec{\Omega}} + \frac{3}{2} \frac{\partial \dot{\vec{\Omega}}}{\partial \dot{q}_i} \cdot (\vec{\Omega} \times {}^{B_{IP}}\vec{\Omega}) \quad (20)$$

مشتق شتاب خطی صفحه متحرک نسبت به شتاب مختصات تعمیم یافته به شرح زیر است:

$$\frac{\partial \vec{a}_M}{\partial \dot{q}_i} = \vec{e}_i; \text{ for } i = 1, 2, 3, \quad \frac{\partial \vec{a}_M}{\partial \dot{q}_i} = 0; \text{ for } i = 4, 5, 6 \quad (21)$$

همان طور که قبلاً گفته شد، بردار $\vec{e}_i$ ، i امین بردار واحد دستگاه مختصات پایه $\{B\}$ است. به منظور محاسبه $\partial \dot{\vec{\Omega}} / \partial \dot{q}_i$ د ماتریس ژاکوبین باید مورد بازبینی قرار گیرد. از سینماتیک ربات مشخص است که جهت‌گیری صفحه متحرک به حرکت بخش موازی ربات بستگی دارد. بنابراین، سرعت زاویه‌ای صفحه متحرک $\dot{\vec{\Omega}}$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\vec{\Omega}} = J_{4:6,3:6} \dot{q}^* \quad (22)$$

که در آن $\dot{q}^* = [\dot{Z} \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T$ و $J_{m:n,p;q}$ بخشی از ماتریس ژاکوبین شامل ردیف‌هایی از m تا n و ستون‌هایی از p تا q است. با مشتق‌گیری از معادله (۲۲) شتاب زاویه‌ای صفحه متحرک بر حسب مشتقات مختصات تعمیم یافته به دست می‌آید.

$$\ddot{\vec{\Omega}} = J_{4:6,3:6} \ddot{q}^* + \dot{J}_{4:6,3:6} \dot{q}^* \quad (23)$$

با استفاده از معادله‌های بالا، معادله (۲۰) برای هر مختصات تعمیم یافته به صورت معادلات (۲۴) تا (۲۹) محاسبه می‌شود.

$$Q_i = \frac{\partial S_{P_1}}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial S_{P_2}}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial S_{P_3}}{\partial \dot{q}_i} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial S_a^j}{\partial \dot{q}_i} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial S_l^j}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial S_P}{\partial \dot{q}_i} \quad (16)$$

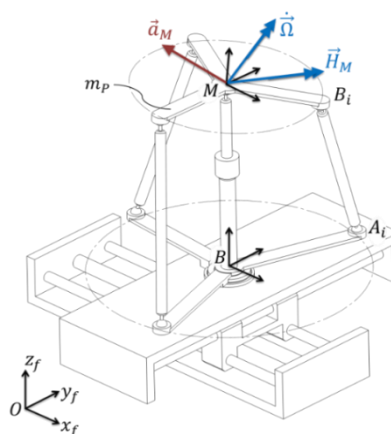
در معادله (۱۶) تابع انرژی شتاب محرک‌ها در راستای Y, X و Z به ترتیب با S_{P_1}, S_{P_2} و S_{P_3} نشان داده شده است. علاوه بر این، تابع انرژی شتاب برای آمین محرک دورانی با S_a^j و برای z امین لینک میانی با S_l^j و با S_P برای صفحه متحرک نشان داده شده است. همچنین Q_i نیروی تعمیم یافته مربوط به آمین مختصات تعمیم یافته است که برابر است با:

$$Q = [F_{e_1} \quad F_{e_2} \quad F_{e_3} \quad \tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T \quad (17)$$

که در آن F_{e_i} نیروی اعمال شده در امتداد $\vec{e}_i$ و τ_i گشتاور اعمال شده به هر لینک دوار است. در بخش زیر مشتق تابع انرژی شتاب برای هر یک از اجزای ربات با توجه به مختصات تعمیم یافته شتاب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تحلیل معادلات گیس-آپل برای صفحه متحرک

بردارهای مرتبط با پارامترهای معادله گیس-آپل برای صفحه متحرک در شکل (۴) نشان داده شده است که شامل بردار شتاب خطی $\vec{a}_M$ ، بردار شتاب زاویه‌ای $\dot{\vec{\Omega}}$ و تکانه زاویه‌ای صفحه متحرک حول مرکز جرم آن $\vec{H}_M$ است.



شکل ۴ پارامترهای گیس-آپل برای صفحه متحرک ربات

برای به دست آوردن معادله گیس-آپل صفحه متحرک، مرکز جرم M به عنوان نقطه دل‌خواه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، تابع انرژی شتاب برای صفحه متحرک ربات برابر است با:

$$S_l^j = \frac{1}{2} m_l (\vec{a}_{G_l}^j \cdot \vec{a}_{G_l}^j) + \frac{1}{2} \vec{\alpha}_j \cdot \frac{\partial (\vec{H}_{G_l}^j)}{\partial t} + \vec{\alpha}_j \cdot (\vec{\omega}_j \times \vec{H}_{G_l}^j) \quad (30)$$

که در آن m_l جرم هر لینک میانی و $\vec{H}_{G_l}^j$ تکانه زاویه‌ای j امین لینک میانی حول مرکز جرم آن است. عبارت $\partial S_l^j / \partial \dot{q}_i$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial S_l^j}{\partial \dot{q}_i} = m_l \left(\vec{a}_{G_l}^j \cdot \frac{\partial \vec{a}_{G_l}^j}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial \vec{\alpha}_j}{\partial \dot{q}_i} \cdot {}^{B_l} \vec{I}_l^j \vec{\alpha}_j + \frac{3}{2} \frac{\partial \vec{\alpha}_j}{\partial \dot{q}_i} \cdot (\vec{\omega}_j \times {}^{B_l} \vec{I}_l^j \vec{\omega}_j) \quad (31)$$

که در آن ${}^{B_l} \vec{I}_l^j$ تانسور اینرسی j امین لینک میانی است که در سیستم مختصات پایه $\{B\}$ تعریف شده است. با ایجاد رابطه بین شتاب نقاط A_j و G_l^j می‌توان شتاب خطی مرکز جرم لینک میانی را به دست آورد.

$$\vec{a}_{A_j} = \ddot{X} \vec{e}_1 + \ddot{Y} \vec{e}_2 + \ddot{\theta}_j \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BA_j} + \dot{\theta}_j \vec{e}_3 \times (\dot{\theta}_j \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BA_j}) \quad (32)$$

$$\vec{a}_{G_l^j/A_j} = \vec{\alpha}_j \times \overrightarrow{A_j G_l^j} + \vec{\omega}_j \times (\vec{\omega}_j \times \overrightarrow{A_j G_l^j}) \quad (33)$$

$$\vec{a}_{G_l}^j = \vec{a}_{A_j} + \vec{a}_{G_l^j/A_j} \quad (34)$$

عبارت $\partial \vec{a}_{G_l}^j / \partial \dot{q}_i$ برای هر یک از مختصات تعمیم یافته برابر است با:

$$\frac{\partial \vec{a}_{G_l}^j}{\partial \dot{q}_i} = \begin{cases} \vec{e}_i & ; \text{for } i = 1, 2 \\ \frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \dot{q}_i} \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BA_j} + \frac{\partial \vec{\alpha}_j}{\partial \dot{q}_i} \overrightarrow{A_j G_l^j} & ; \text{for } i = 3, \dots, 6 \end{cases} \quad (35)$$

با استفاده از $\ddot{\theta}_j$ و $\vec{\alpha}_j$ به دست آمده توسط معادلات (۱۳) و (۱۴)، مشتق دوم آنها نسبت به مختصات تعمیم یافته را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \dot{q}_i} = \frac{1}{a \vec{n}_j \cdot (\vec{e}_3 \times \vec{u}_j)} \left\{ \vec{n}_j \cdot \vec{e}_3 + b \vec{n}_j \cdot \left(\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial \dot{q}_i} \times \mathcal{R} \vec{v}_j' \right) \right\} \quad (36)$$

$$\frac{\partial \vec{\alpha}_j}{\partial \dot{q}_i} = \frac{1}{I} \left\{ \vec{n}_j \times \vec{e}_3 + b \vec{n}_j \times \left(\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial \dot{q}_i} \times \mathcal{R} \vec{v}_j' \right) - a \frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \dot{q}_i} \vec{n}_j \times (\vec{e}_3 \times \vec{u}_j) \right\} \quad (37)$$

$$\frac{\partial S_P}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial S_P}{\partial \dot{X}} = m_P \dot{X} \quad (24)$$

$$\frac{\partial S_P}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial S_P}{\partial \dot{Y}} = m_P \dot{Y} \quad (25)$$

$$\frac{\partial S_P}{\partial \dot{q}_3} = \frac{\partial S_P}{\partial \dot{Z}} = m_P \dot{Z} + J_{4:6,1}^T ({}^{B_{I_P}} \dot{\vec{\Omega}}) + \frac{3}{2} J_{4:6,1}^T (\vec{\Omega} \times {}^{B_{I_P}} \vec{\Omega}) \quad (26)$$

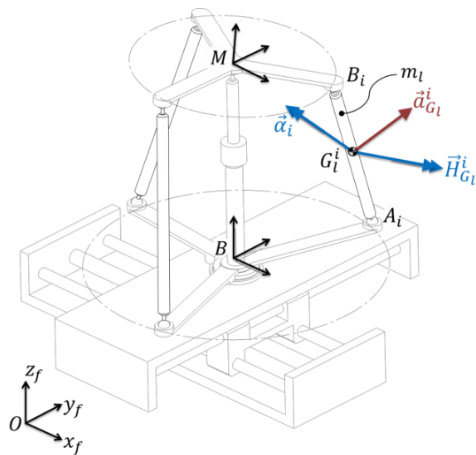
$$\frac{\partial S_P}{\partial \dot{q}_4} = \frac{\partial S_P}{\partial \dot{\theta}_1} = J_{4:6,2}^T ({}^{B_{I_P}} \dot{\vec{\Omega}}) + \frac{3}{2} J_{4:6,2}^T (\vec{\Omega} \times {}^{B_{I_P}} \vec{\Omega}) \quad (27)$$

$$\frac{\partial S_P}{\partial \dot{q}_5} = \frac{\partial S_P}{\partial \dot{\theta}_2} = J_{4:6,3}^T ({}^{B_{I_P}} \dot{\vec{\Omega}}) + \frac{3}{2} J_{4:6,3}^T (\vec{\Omega} \times {}^{B_{I_P}} \vec{\Omega}) \quad (28)$$

$$\frac{\partial S_P}{\partial \dot{q}_6} = \frac{\partial S_P}{\partial \dot{\theta}_3} = J_{4:6,4}^T ({}^{B_{I_P}} \dot{\vec{\Omega}}) + \frac{3}{2} J_{4:6,4}^T (\vec{\Omega} \times {}^{B_{I_P}} \vec{\Omega}) \quad (29)$$

تحلیل معادلات گیس-آپل برای لینک‌های میانی

در شکل (۵) پارامترهای بردارهای معادله گیس-آپل یک لینک میانی با مرکز جرم G_l^j نشان داده شده است. همچنین شتاب خطی و زاویه‌ای لینک به ترتیب با $\vec{a}_{G_l}^j$ و $\vec{\alpha}_i^j$ نشان داده شده است.



شکل ۵. پارامترهای گیس-آپل برای لینک‌های میانی ربات

در ادامه، برای به دست آوردن تابع گیس-آپل لینک میانی j ام، همان روش قسمت قبل تکرار می‌شود. شکل کلی معادله به صورت زیر است:

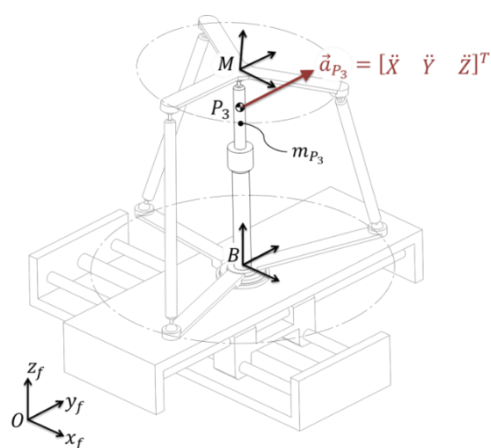
$$\frac{\partial S_a^j}{\partial \dot{q}_3} = \frac{\partial S_a^j}{\partial \dot{Z}} = I_{a_j}^z \ddot{\theta}_j \frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \dot{Z}} + m_a \vec{a}_B \cdot \left(\frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \dot{Z}} \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BG_a^j} \right) \quad (41)$$

$$\frac{\partial S_a^j}{\partial \dot{q}_i} = I_{a_j}^z \ddot{\theta}_j \frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \dot{q}_i} + m_a \vec{a}_B \cdot \left(\frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \dot{q}_i} \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BG_a^j} \right);$$

for $i = 4, 5, 6$ (42)

تحلیل معادلات گیس-آپل برای سیلندر مرکزی

در شکل (۷) مرکز جرم سیلندر یا همان نقطه P_3 و بردار شتاب آن نیز نشان داده شده است.



شکل ۷ پارامترهای گیس-آپل برای سیلندر مرکزی ربات

تابع انرژی شتاب سیلندر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S_{P_3} = \frac{1}{2} m_{P_3} (\vec{a}_{P_3} \cdot \vec{a}_{P_3}) \quad (43)$$

که m_{P_3} جرم سیلندر مرکزی و $\vec{a}_{P_3}$ بردار شتاب خطی آن است. با محاسبه مشتق دوم معادله (۴۵) نسبت به شتاب مختصات تعمیم یافته، معادله (۵۰) به دست خواهد آمد.

$$\frac{\partial S_{P_3}}{\partial \dot{q}_i} = m_{P_3} \left(\vec{a}_{P_3} \cdot \frac{\partial \vec{a}_{P_3}}{\partial \dot{q}_i} \right) \quad (44)$$

در ادامه معادله (۴۴) نسبت به هر مختصات تعمیم یافته گسترش می‌یابد که در معادلات (۴۵) تا (۴۸) آورده شده است.

$$\frac{\partial S_{P_3}}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial S_{P_3}}{\partial \dot{X}} = m_{P_3} \ddot{X} \quad (45)$$

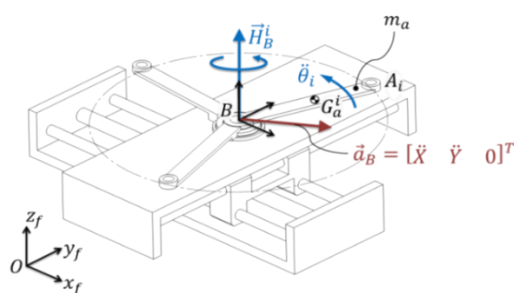
$$\frac{\partial S_{P_3}}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial S_{P_3}}{\partial \dot{Y}} = m_{P_3} \ddot{Y} \quad (46)$$

$$\frac{\partial S_{P_3}}{\partial \dot{q}_3} = \frac{\partial S_{P_3}}{\partial \dot{Z}} = m_{P_3} \ddot{Z} \quad (47)$$

با جایگزینی معادلات (۳۴) تا (۳۷) در معادله (۳۱) و با حل آن برای هر مختصات تعمیم یافته، آن عباراتی که مرتبط با نیروهای تعمیم یافته هستند برای لینک‌های میانی به دست می‌آید.

تحلیل معادلات گیس-آپل برای لینک‌های محرک دوار

لینک‌های ربات متصل به محرک‌های دوار در شکل (۶) نشان داده شده است. جرم هر لینک دوار با m_a نشان داده شده است و نقطه G_a^i مرکز جرم لینک i ام را نشان می‌دهد. متغیرهای $\ddot{\theta}_i$ و $\vec{H}_B^i$ به ترتیب شتاب زاویه‌ای و تکانه زاویه‌ای هر لینک حول محور چرخششان هستند. شتاب نقطه B که در واقع همان نقطه دل‌خواه در مشتقات معادله گیس-آپل است، نیز در شکل نشان داده شده است.



شکل ۶ پارامترهای گیس-آپل برای لینک‌های محرک دوار ربات

تابع انرژی شتاب لینک دوار i ام در معادله (۳۸) آورده شده است.

$$S_a^i = \frac{1}{2} m_a (\vec{a}_B \cdot \vec{a}_B) + \frac{1}{2} \ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \cdot \frac{\partial \vec{H}_B^i}{\partial t} + m_a \vec{a}_B \cdot \left(\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BG_a^i} \right) + m_a \vec{a}_B \cdot \left[\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \left(\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BG_a^i} \right) \right] \quad (38)$$

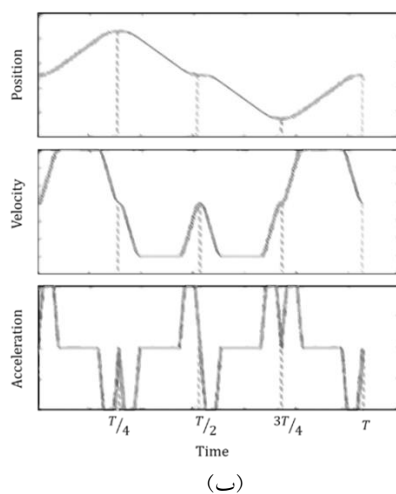
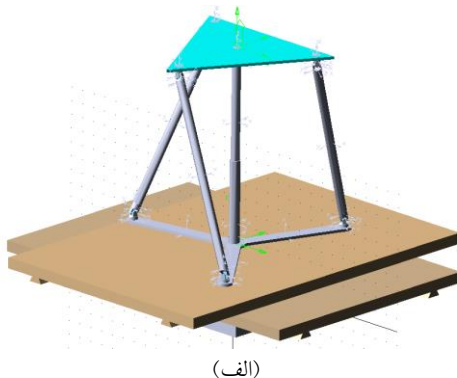
در نتیجه مشتق تابع انرژی شتاب نسبت به مختصات تعمیم یافته به صورت معادلات زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial S_a^i}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial S_a^i}{\partial \dot{X}} = m_a \ddot{X} + m_a \vec{e}_1 \cdot \left(\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BG_a^i} \right) + m_a \vec{e}_1 \cdot \left(\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \left(\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BG_a^i} \right) \right) \quad (39)$$

$$\frac{\partial S_a^i}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial S_a^i}{\partial \dot{Y}} = m_a \ddot{Y} + m_a \vec{e}_2 \cdot \left(\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BG_a^i} \right) + m_a \vec{e}_2 \cdot \left(\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \left(\ddot{\theta}_i \vec{e}_3 \times \overrightarrow{BG_a^i} \right) \right) \quad (40)$$

شبیه سازی و اعتبار سنجی نتایج

برای اطمینان از حل صحیح معادلات دینامیکی ربات PP- (3RSS-PS)، نتایج مدل تئوری با نتایج شبیه سازی شده در نرم افزار مدل سازی دینامیکی ADAMS مقایسه شده است. شکل (۹-الف) مدل شبیه سازی شده در نرم افزار ADAMS را نشان می دهد. به منظور ایجاد یک شبیه سازی مناسب برای ربات هیبریدی مورد نظر، شش مسیر در فضای کاری کارترین تعریف شده است. مسیر برای هر درجه آزادی نسبت به سیستم مختصات پایه به این صورت تعریف می شود که، ابتدا ربات در جهت مثبت از موقعیت اولیه خود تا حد انتهای درجه آزادی متناظر حرکت می کند. در طی این حرکت ربات به حداکثر سرعت و شتاب خود نیز می رسد. سپس ربات با همان ویژگی های حرکتی به حالت اولیه بر می گردد. با تکرار متوالی مسیر دو مرحله ای در جهت مخالف، ربات به طور کامل فضای کاری تک درجه آزادی خود را طی می کند [27]. شکل (۹-ب) نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب مجری نهایی ربات را برای هر یک از مسیرها نشان می دهد.

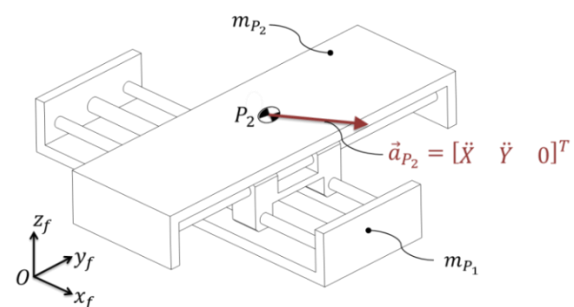


شکل ۹ (الف) مدل شبیه سازی شده در نرم افزار ADAMS، (ب) مسیر طراحی شده برای مجری نهایی ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS)

$$\frac{\partial S_{P_3}}{\partial \ddot{q}_i} = 0, \quad \text{for } i=3, \dots, 6 \quad (48)$$

تحلیل معادلات گیس-آپل برای میز XY

دو مازول خطی عمود بر هم که حرکت در راستای X و Y را ایجاد می کند با مرکز جرم های P_1 و P_2 در شکل (۸) نشان داده شده است. مازولی که در جهت X حرکت می کند با $j = 1$ و دیگری با $j = 2$ شناخته می شود.



شکل ۸ پارامترهای گیس-آپل برای میز XY

از آنجایی که میز XY دارای یک حرکت خطی است، تابع انرژی شتاب برای هر مازول را می توان به صورت زیر محاسبه کرد،

$$S_{P_j} = \frac{1}{2} m_{P_j} (\vec{a}_{P_j} \cdot \vec{a}_{P_j}) \quad (49)$$

که در آن m_{P_j} جرم هر مازول خطی و $\vec{a}_{P_j}$ بردار شتاب مرکز جرم آن ها است. مشتق انرژی شتاب مازول Y نسبت به شتاب مختصات تعمیم یافته به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial S_{P_2}}{\partial \ddot{q}_i} = m_{P_2} \left(\vec{a}_{P_2} \cdot \frac{\partial \vec{a}_{P_2}}{\partial \ddot{q}_i} \right) \quad (50)$$

معادله (۵۰) برای هر یک از مختصات تعمیم یافته به صورت جداگانه در معادلات (۵۱) تا (۵۳) بسط داده شده است.

$$\frac{\partial S_{P_2}}{\partial \ddot{q}_1} = \frac{\partial S_{P_2}}{\partial \ddot{X}} = m_{P_2} \ddot{X} \quad (51)$$

$$\frac{\partial S_{P_2}}{\partial \ddot{q}_2} = \frac{\partial S_{P_2}}{\partial \ddot{Y}} = m_{P_2} \ddot{Y} \quad (52)$$

$$\frac{\partial S_{P_2}}{\partial \ddot{q}_i} = 0, \quad \text{for } i = 3, \dots, 6 \quad (53)$$

با اعمال همین رویه برای مازول خطی در جهت X، مقدار $\partial S_{P_1} / \partial \ddot{q}_i$ برای هر مختصات تعمیم یافته نیز به دست می آید.

محرك‌های ربات برای درجه آزادی انتقالی Surge و برای درجه آزادی دورانی Yaw به صورت جداگانه برای حل تئوری و مدل شبیه‌سازی آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نیروی محرك ربات سریال در محور عمود بر جهت مسیر حرکت برابر با صفر است در حالی که برای ربات موازی برای انجام کامل یک مسیر لازم است که تمام محرك‌ها نیرویی اعمال کنند. از مقایسه دو حل موجود مشاهده می‌شود تحلیل دینامیک ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS) به درستی انجام شده است.

با توجه به روش ذکر شده، مسیر هر درجه آزادی با استفاده از حداکثر مقادیر مورد نظر برای موقعیت، سرعت و شتاب مندرج در جدول (۱) به دست خواهد آمد.

مقادیر پارامترهای سینماتیکی و دینامیکی ربات برای شبیه سازی در جدول (۲) آورده شده است. لازم به ذکر است که همان اینرسی با توجه به محورهای اصلی برای هر عضو متحرک بیان شده است.

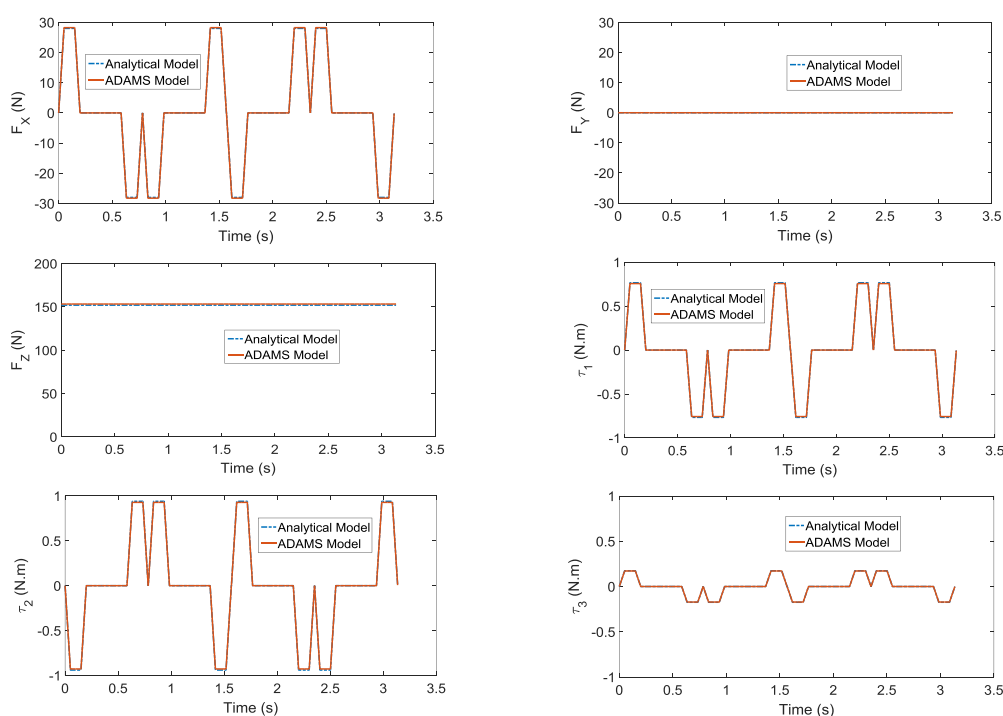
به منظور خلاصه‌سازی در ادامه نمودار نیروها و گشتاورهای

جدول ۱. مسیر طراحی شده برای مجری نهایی ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS)

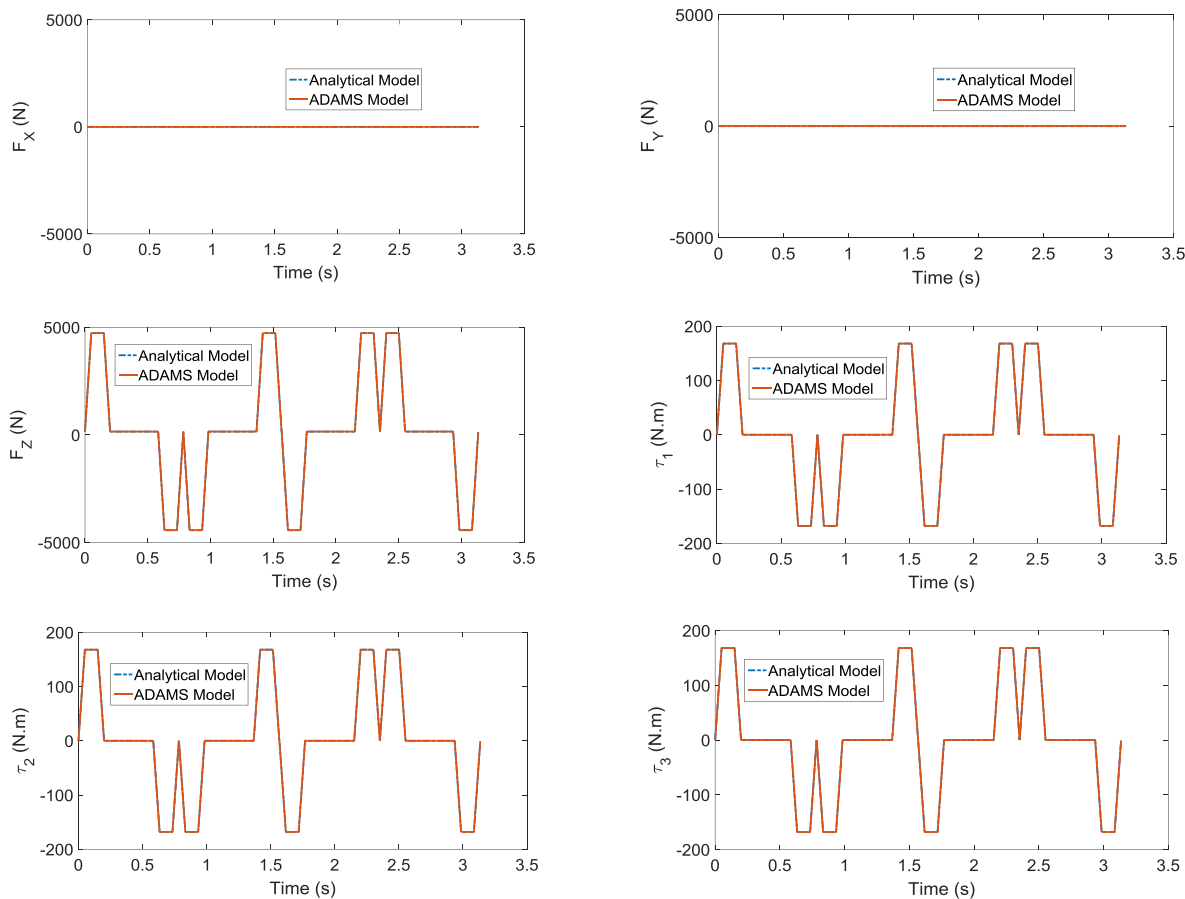
Yaw	Pitch	Roll	Heave	Sway	Surge	درجه آزادی
± 24	± 8	± 8	± 4	± 9	± 9	موقعیت (cm) (°)
42	13	13	6	15	15	سرعت (cm/s) (°/s)
280	88	88	40	100	100	شتاب (cm/s ²) (°/s ²)

جدول ۲. پارامترهای سینماتیکی و دینامیکی ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS)

مقدار	پارامتر	عضو متحرک ربات	مقدار	پارامتر	عضو متحرک ربات
$\begin{Bmatrix} 1.00 \text{ (kg)} \\ 1.00 \text{ (kg)} \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} m_{p1} \\ m_{p2} \end{Bmatrix}$	میز X و Y	0.40 (m)	a	لینک‌های دوار
$\begin{Bmatrix} 2.00 \text{ (kg)} \\ 0.50 \text{ (kg.m}^2\text{)} \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} m_a \\ I_a^z \end{Bmatrix}$	لینک‌های دوار	0.70 (m)	l	لینک‌های میانی
$\begin{Bmatrix} 3.00 \text{ (kg)} \\ \text{diag}(2, 2, 2) \text{ (kg.m}^2\text{)} \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} m_l \\ N_{I_l} \end{Bmatrix}$	لینک‌های میانی	0.27 (m)	b	صفحه متحرک
$\begin{Bmatrix} 10.00 \text{ (kg)} \\ \text{diag}(100, 100, 100) \text{ (kg.m}^2\text{)} \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} m_p \\ M_{I_p} \end{Bmatrix}$	صفحه متحرک			



شکل ۱۰. نمودار نیروها و گشتاورهای مورد نیاز برای محرك‌های ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS) در مسیر حرکتی Surge



شکل ۱۱ نمودار نیروها و گشتاورهای مورد نیاز برای محرک‌های ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS) در مسیر حرکتی Yaw

جدول ۳ مقدار میانگین توان دوم خطاهای عملگرهای ربات هیبریدی برای مسیر Yaw

τ_3	τ_2	τ_1	F_z	F_y	F_x	عملگر مربوطه
3.46×10^{-5}	3.67×10^{-5}	3.62×10^{-5}	5.31×10^{-11}	3.22×10^{-11}	4.13×10^{-11}	MSE

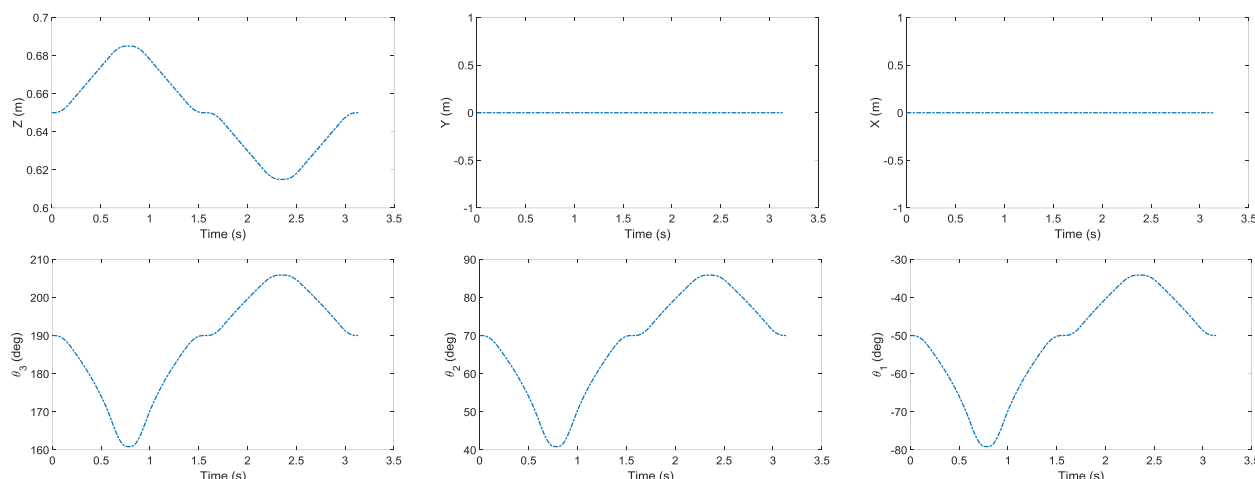
با توجه به مقادیر به دست آمده مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی از مطابقت خوبی با هم برخوردار هستند.

لازم به ذکر است دقت شود عملگرهای خطی و دورانی ربات هیبریدی معرفی شده به طور مستقیم تأثیر حرکتی خود را در حرکت درجات آزادی ربات نشان می‌دهند. این بدان منظور است که به عنوان مثال در راستای حرکتی Heave علاوه بر نقش مؤثر عملگر خطی میانی سه عملگر دورانی ربات نیز می‌بایست حرکت کنند تا مجری نهایی ربات حرکتی در راستای Z داشته باشد. شکل (۱۲) نحوه حرکتی عملگرهای خطی و دورانی ربات را به ازای حرکت در راستای Heave نشان می‌دهد.

به منظور مقایسه بین نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی میانگین توان دوم خطاها (Mean Squared Error) (MSE) برای هر کدام از عملگرها و به عنوان نمونه فقط برای مسیر Yaw به صورت جداگانه محاسبه شده است و نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است. برای به دست آوردن میانگین توان دوم خطا از یک مجموعه‌ای که دارای n داده است می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (54)$$

که در آن $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ مقدار مربع خطای هر داده را محاسبه می‌کند.



شکل ۱۲ موقعیت عملگرهای خطی و دورانی ربات هیبریدی به ازای حرکت در راستای Heave

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار ADAMS در شش مسیر مشخص، صحت مدل دینامیکی به دست آمده را ثابت کرده‌اند. در نتیجه می‌توان از مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی به جای یکدیگر استفاده کرد. صریح بودن روش گیس-آپل، استخراج معادلات و تولید کد برنامه‌نویسی را آسان کرده است زیرا از یک تابع ثابت برای محاسبه دینامیک هر قسمت به طور جداگانه استفاده می‌شود. چیزی که این ربات را نسبت به سایر ربات‌ها متمایز می‌کند، فضای کاری مازولار مستقل X و Y و حرکت یاو نامحدود با طراحی فشرده آن است. این ویژگی‌های ذکر شده ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS) را به گزینه‌ای مناسب برای شبیه‌ساز رانندگی تبدیل می‌کند که برای مراحل شتاب و کاهش سرعت به محدوده حرکت طولی و حرکت یاو زیادی نیاز دارد. ربات هیبریدی PP-(3RSS-PS) پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک مطالعه موردی برای بهینه‌سازی و مقایسه با سایر شبیه‌سازهای معمولی با در نظر گرفتن شاخص‌های عملکرد مختلف استفاده شود.

فهرست علائم

F_{e_i}	نیروی اعمال شده در امتداد $\vec{e}_i$
$\vec{H}_M$	تکانه زاویه‌ای صفحه متحرک حول مرکز جرم آن
B_I^J	تانسور اینرسی زامین لینک میانی
J	ماتریس ژاکوبین ربات
l	طول هر یک از لینک‌های میانی
m_a	جرم هر یک از لینک‌های دوار
m_l	جرم هر یک از لینک‌های میانی
m_{p_1}	جرم محرک خطی در راستای X
m_{p_2}	جرم محرک خطی در راستای Y
m_{p_3}	جرم سیلندر مرکزی
M	مرکز صفحه متحرک
$\vec{n}_i$	بردار یکه در راستای لینک میانی i ام
S_a^J	تابع انرژی شتاب برای زامین محرک دورانی
S_l^J	تابع انرژی شتاب برای زامین لینک میانی
S_{p_i}	تابع انرژی شتاب محرک‌های خطی
$\vec{u}_i$	بردار یکه در راستای لینک دورانی i ام
$\vec{v}_i$	بردار یکه در راستای لبه‌ی i ام صفحه متحرک
$\vec{\alpha}_i$	شتاب زاویه‌ای لینک میانی i ام
$\mathcal{R}$	ماتریس دوران
θ_i	زاویه دوران لینک دوار i ام
$\dot{\theta}_i$	سرعت زاویه‌ای لینک دوار i ام
$\ddot{\theta}_i$	شتاب زاویه‌ای لینک دوار i ام
$\vec{\Omega}$	سرعت زاویه‌ای صفحه متحرک
$\dot{\vec{\Omega}}$	شتاب زاویه‌ای صفحه متحرک

a	طول هر یک از لینک‌های دوار
$\vec{a}_M$	شتاب مجری نهایی ربات
b	طول هر یک از لبه‌های صفحه متحرک
C_1	دایره‌ای که از مرکز اتصالات کروی پایین می‌گذرد
C_2	دایره‌ای که از مرکز اتصالات کروی بالا می‌گذرد
$\vec{e}_i$	بردارهای واحد در سیستم مختصات ثابت و پایه

Jacobian	ژاکوبین	$\vec{\omega}_i$	سرعت زاویه‌ای لینک میانی i ام
Hybrid Robot	ربات هیبریدی	τ_i	گشتاور اعمال شده به لینک دوار i ام
Kinematics	سینماتیک		
Mean square error	میانگین توان دوم خطاها		واژه نامه
Parallel robot	ربات موازی	Acceleration energy function	تابع انرژی شتاب
Serial robot	ربات سریال	Angular acceleration	شتاب زاویه‌ای
Screw theory	نظریه پیچ	Angular momentum	تکانه زاویه‌ای
Trajectory	مسیر	Angular velocity	سرعت زاویه‌ای
		Closed kinematic chain	زنجیره سینماتیک بسته
		Dynamics	دینامیک
		End- Effector	مجری نهایی
		Gibbs- Appell Method	روش گیبس - اپل

تقدیر و تشکر

مراجع

- [1] M. Shahinpoor, "Kinematics of a parallel- serial (Hybrid) manipulator," *Journal of Robotic Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 17-36, (1992).
- [2] R. Ricard and C. Gosselin, "On the development of hybrid planar manipulators," *IEEE in Proceedings of 36th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 398-401, (1993).
- [3] S. Lee and S. Kim, "Efficient inverse kinematics for serial connections of serial and parallel manipulators," *IEEE in Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'93)*, vol. 3, pp. 1635-1641, (1993).
- [4] A. Campos, C. Budde, and J. Hesselbach, "A type synthesis method for hybrid robot structures," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 8, pp. 984-995, (2008).
- [5] K. Etemadi-Zanganeh and J. Angeles, "Instantaneous kinematics of general hybrid parallel manipulators," 1995.
- [6] S. Kim and W. Kim, "On the structure of the macro-micro neurosurgical robots in stereotactic surgery," *Hanyang Medical Reviews*, vol. 36, no. 4, pp. 254-261, (2016).
- [7] D. Zhang, J. Chen, W. Li, D. B. Salinas, and G.-Z. Yang, "A microsurgical robot research platform for robot-assisted microsurgery research and training," *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 15, no. 1, pp. 15-25, (2020).
- [8] G. Tosolin, J. Cartró, and V. Sharma, "Development of model predictive motion planning and control for autonomous vehicles," *Springer in 10th International Munich Chassis Symposium 2019*, pp. 323-340, (2020).
- [9] Y. Feng, J. Fan, B. Tao, S. Wang, J. Mo, Y. Wu, Q. Liang, and X. Chen, "An image-guided hybrid robot system for dental implant surgery," *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 17, no.1, pp.15-26, (2022).
- [10] C. Dong, H. Liu, J. Xiao, and T. Huang, "Dynamic modeling and design of a 5-DOF hybrid robot for machining," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 165, p.104438, (2021).

- [11] H. D. Yang and A. T. Asbeck, "Design and characterization of a modular hybrid continuum robotic manipulator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no.6, pp.2812-2823, (2020).
- [12] J. Enferadi and K. Jafari, "A Kane's based algorithm for closed-form dynamic analysis of a new design of a 3RSS-S spherical parallel manipulator," *Multibody System Dynamics*, vol. 49, pp. 377-394, (2020).
- [13] R. Kelaiaia, O. Company, and A. Zaatari, "Multiobjective optimization of a linear Delta parallel robot," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 50, pp. 159-178, (2012).
- [14] J. Enferadi and R. Nikrooz, "The performance indices optimization of a symmetrical fully spherical parallel mechanism for dimensional synthesis," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 90, no. 3-4, pp. 305-321, (2018).
- [15] S. N. Nabavi, M. Shariatee, J. Enferadi, and A. Akbarzadeh, "Parametric design and multi-objective optimization of a general 6-PUS parallel manipulator," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 152, p. 103913, (2020).
- [16] S. N. Nabavi, A. Akbarzadeh, J. Enferadi, and I. Kardan, "A homogeneous payload specific performance index for robot manipulators based on the kinetic energy," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 130, pp. 330-345, (2018).
- [17] Z. Gao and D. Zhang, "Performance analysis, mapping, and multiobjective optimization of a hybrid robotic machine tool," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 1, pp. 423-433, (2014).
- [18] S. Kucuk, "Dexterous workspace optimization for a new hybrid parallel robot manipulator," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 10, no. 6, (2018).
- [19] O. Ibrahim and W. Khalil, "Inverse and direct dynamic models of hybrid robots," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, no. 4, pp. 627-640, (2010).
- [20] S. N. Nabavi, A. Akbarzadeh, and J. Enferadi, "Closed-Form Dynamic Formulation of a General 6-P US Robot," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 96, no. 3-4, pp. 317-330, (2019).
- [21] J. Gallardo-Alvarado, C. R. Aguilar-Nájera, L. Casique-Rosas, J. M. Rico-Martínez, and M. N. Islam, "Kinematics and dynamics of 2 (3-RPS) manipulators by means of screw theory and the principle of virtual work," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 10, pp. 1281-1294, (2008).
- [22] Y. Wu, Z. Yang, Z. Fu, J. Fei, and H. Zheng, "Kinematics and dynamics analysis of a novel five-degrees-of-freedom hybrid robot," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 14, no. 3, p. 1729881417716634, (2017).
- [23] Y. Yun and Y. Li, "Modeling and control analysis of a 3-PUPU dual compliant parallel manipulator for micro positioning and active vibration isolation," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 134, no. 2, (2012).
- [24] D. Zhang, Y. Xu, J. Yao, and Y. Zhao, "Design of a novel 5-DOF hybrid serial-parallel manipulator and theoretical analysis of its parallel part," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 53, pp. 228-239, (2018).
- [25] J. W. Gibbs, "On the fundamental formulae of dynamics," *American Journal of Mathematics*, vol. 2, no. 1, pp. 49-64, (1879).
- [26] P. Appell, "Sur les mouvements de roulement; equations du mouvement analogues a celles de Lagrange," *Comptes Rendus*, vol. 129, pp. 317-320, (1899).
- [27] M. Shariatee, A. Akbarzadeh, and N. Nabavi, "Design of a Pneumatic Weight Compensation System for the FUM Stewart Robot," *IEEE in 2017 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, , pp. 624-629, (2017).

Design, Construction, and Experimental Investigation of Parabolic Solar Cooker Performance

Research Article

Nasser Baharlou-Houreh¹ , Ali Sadeghi², Saeed Golshadi³

DOI: [10.22067/jacsm.2023.82768.1190](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.82768.1190)

1. Introduction

Among the unique uses of solar energy is the use of solar ovens to collect and strengthen the energy of the sun for cooking food and boiling water. In general, three types of solar ovens have been studied by researchers, namely indirect solar ovens, solar ovens with vacuum tubes, and parabolic solar ovens. Parabolic ovens include a concentrator, a base, supports, a movable arm, and a pan-holding jaw. In the design of this oven, the holder of the container should be placed in the focal point of the parabolic oven. In this research, a parabolic solar oven was designed, built, and tested using extensive and regular mirror work. Among the innovations of the current research, the following can be mentioned:

- Using available and cost-efficient materials
- High ability to upgrade and repair the device
- The possibility of making and using stoves for teaching in schools and universities
- The possibility of changing the angle in all three dimensions of spatial coordinates
- Calculation of energy efficiency in all experiments
- Investigating the effect of container material, container size, container body color, and container lid placement on solar oven performance

2. Design and Construction

According to Figure 1, The equipment of the location of the container should be located at the focal point which is obtained by the equation (1):

$$f = \frac{d^2}{16h} \quad (1)$$

In the above relationship, d is the diameter of the dish and h refers to the depth of the dish, which are 81 and 7.7 cm in this research, respectively. Therefore, the focal distance, f , is equal to 53 cm.

The holding equipment is designed so that the device can change its position in three dimensions. The red arrows in Figure 2 show the methods of moving and adjusting the angle and spatial coordinates in three dimensions. The final shape of the solar oven is shown in Figure 3.

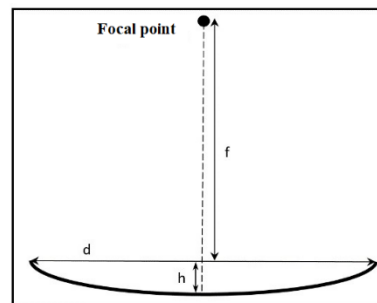


Fig. 1. Schematic of dish and focal point



Fig. 2. Support base and movable arm to adjust the angle in three dimensions



Fig. 3. The actual and final image of the solar oven device

3. Experimental Investigation of Performance

Investigating the effect of different amounts of water in a fixed container on water temperature

In this experiment, different amounts of water were tested inside a copper container of the same size. According to Figure 4, 0.5 L of water reached the boiling point (temperature of 100°C) after 20 minutes. In the same period, 0.75 L of water reached a temperature of 93°C, and 1 L reached a temperature of 85°C.

*Manuscript received: June 22, 2023. Revised, June 22, 2023, Accepted, August 1, 2023.

¹ Corresponding author, Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University. Email: Nasser.baharloo@sru.ac.ir

² B.Eng.student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

³ B.Eng.student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

Investigating the effect of copper and aluminium container material on water temperature

In this experiment, two copper and aluminum containers with almost equal dimensions were examined with a constant amount of 0.5 L of water. As shown in Figure 5, in 40 minutes, the temperature of the copper and aluminum containers reached 90°C and 78°C, respectively. As a result, in a certain period, the temperature of the water in the copper container rose more than the temperature of the water in the aluminum container. This result can be explained by the higher thermal conductivity of copper metal (398 W/mK) compared to aluminum metal (248 W/mK).

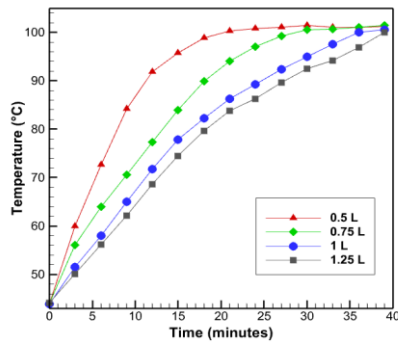


Fig. 4. Solar oven performance test to check different amounts of water in a fixed container

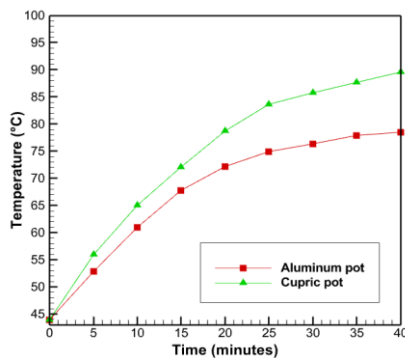


Fig. 5. Solar oven performance test for investigating the effect of container material (copper and aluminum)

Investigating the effect of black color on absorbing the sun's heat

In this experiment, normal and smoked aluminum containers with a constant amount of 0.5 L of water were examined under direct sunlight. As shown in Figure 6, the smoked aluminum container reached the boiling temperature in 25 minutes, while the normal aluminum container reached a temperature of 75°C during this period. The reason might be the high absorption coefficient of black body radiation.

Thermodynamic analysis (energy efficiency calculation)

In this part, thermodynamic analysis was performed to calculate energy efficiency. The input energy rate in the parabolic solar oven as the considered system is the sun energy, which is obtained by:

$$\dot{E}_s = I_{ave} A_{ap} \quad (2)$$

Where, I_{ave} is the average rate of solar radiation input to the parabolic solar oven in a time interval where the value of 941 W/m² is considered. A_{ap} refers to the area of the solar concentrator aperture. The rate of thermal energy consumed according to equation (3) is equal to the amount of thermal energy required for water to reach a certain

temperature per unit of time:

$$\dot{E}_w = \frac{m_w C_w (T_{w,f} - T_{w,i})}{\Delta t} \quad (3)$$

In the above equation, m_w and C_w are the mass and specific heat capacity of water, respectively, and $T_{w,i}$ and $T_{w,f}$ are the water temperature at the beginning and end of the test period, respectively. In order to check the thermal performance of the built device, the thermal efficiency of the device should also be checked. Using equation (2) and (3), the energy efficiency of the parabolic solar oven is obtained from the following equation:

$$\eta = \frac{\dot{E}_w}{\dot{E}_s} \quad (4)$$

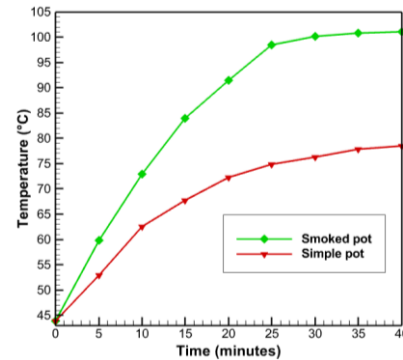


Fig. 6. Solar oven performance test to investigate the effect of black color

Energy calculations for different experiments are obtained according to Table 1. Based on this table, the highest energy efficiency is related to a medium copper container with a closed lid (18.52%).

Table 1 - Energy efficiency for different experiments (%)

Medium copper pot with a fully closed door	18.52
Medium copper pot with a fully open door	7.67
Small copper container with a closed lid	17
Aluminum pot	9.62
Smoked aluminium pot	16.93

4. Conclusion

In this research, a parabolic solar oven with simple usability and educational use was made. Available and cost-efficient materials were used for all pieces of equipment. This device could be upgraded highly and easily. In addition, due to the change of the sun's radiation angle at different hours, it can change the angle in three dimensions of the spatial coordinates. In order to ensure the tests, the repeatability chart was presented and to ensure the accuracy of the results, uncertainty analysis was conducted. The following results were obtained in summary from the experiments:

- A copper container with 0.5 L of water boiled in 20 minutes and 1.5 L of water reached 82°C in this time.
- The temperature of the copper container reached 86°C, while the aluminum container reached 76°C in 30 minutes.
- The smoked and non-smoked aluminum containers reached the temperatures of 100°C and 75°C in 25 minutes, respectively.
- The result of thermodynamic calculations to extract energy efficiency showed that the highest energy efficiency was related to medium copper container with closed lid with 18.52%.



طراحی، ساخت و بررسی تجربی عملکرد اجاق خورشیدی سهموی*

مقاله پژوهشی

ناصر بهارلو هوره^(۱) علی صادقی^(۲) سعید گلشادی^(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.82768.1190

چکیده با توجه به فراوانی و رایگان بودن انرژی خورشیدی در کشور و مشکلات گازرسانی، اجاق خورشیدی جایگزین بسیار مناسبی جهت پخت غذا به شمار می‌رود. در این مقاله، یک دستگاه اجاق خورشیدی سهموی طراحی، ساخته و آزمایش شد. تجهیزات مورد استفاده در ساخت، شامل دیش سهموی شکل آهنی، آینه‌ها به منظور بازتاب نور روی نقطه کانونی، قوطی و تسمه آهنی به منظور ساخت فک و پایه نگه‌دارنده می‌باشد. از جمله نوآوری دستگاه حاضر می‌توان به استفاده از مواد ارزان قیمت، قابلیت بالای ارتقا و تعمیر، کاربری ساده و استفاده آموزشی و قابلیت تغییر زاویه در هر سه بعد مختصات مکانی اشاره کرد. جهت اطمینان از دقت نتایج، نمودار تکرارپذیری ارائه گردیده و آنالیز عدم قطعیت برای همه پارامترها محاسبه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد ظرف با مقدار آب ۰/۵ لیتر در مدت زمان ۲۰ دقیقه به جوش می‌آید و با مقدار آب ۱/۵ لیتر در این مدت زمان به دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. با مقایسه ظرف آلومینیومی و ظرف مسی نتیجه می‌شود در مدت زمان ۳۰ دقیقه دمای آب در ظرف مسی به ۸۶ درجه و در ظرف آلومینیومی به ۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در آزمایش دیگری ظرف آلومینیومی به شکل دودی (مشکی) بررسی شد که مطابق آزمایش، آب در ظرف دودی در مدت زمان ۲۵ دقیقه به جوش می‌آید. مطابق تحلیل ترمودینامیکی که برای محاسبه بازده انرژی در همه آزمایش‌ها انجام پذیرفت، ظرف مسی متوسط با درب بسته با بازده ۱۸/۵۲ درصد و ظرف مسی کوچک با درب بسته با بازده ۱۷ درصد، به ترتیب رتبه اول و دوم را دارا هستند.

واژه‌های کلیدی انرژی خورشیدی، اجاق خورشیدی سهموی، جوش آمدن آب، بازده انرژی، ساخت و آزمایش.

Design, Construction and Experimental Investigation of Parabolic Solar Cooker Performance

Nasser Baharlou-Houreh

Ali Sadeghi

Saeed Golshadi

Abstract Considering the abundance and freeness of solar energy in the country and gas supply problems, solar oven is considered a very suitable alternative for cooking food. In this paper, a parabolic solar cooker was designed, built and tested. The equipment used in the construction includes iron parabolic dish, mirrors to reflect light on the focal point, cans and iron belts to make the jaw and support base. Among the innovations of the present device, we can mention the use of cheap materials, the ability to upgrade and repair, simple use and educational use, and the ability to change the angle in all three dimensions of spatial coordinates. To ensure the accuracy of the results, the repeatability chart is presented and the uncertainty analysis is calculated for all parameters. By comparing the aluminum container and the copper container, the result is that the temperature of the water in the copper container reaches 86 degrees and in the aluminum container reaches 76 degrees Celsius in 30 minutes. In another experiment, a smoked (black) aluminum container was checked, and according to the experiment, water in the smoked container boils in 25 minutes. According to the thermodynamic analysis that was done to calculate the energy efficiency in all experiments, the medium copper pot with a closed lid with 18.52% efficiency and a small copper container with a closed lid with 17% efficiency, are ranked first and second respectively.

Key Words Solar energy, Parabolic solar cooker, Water boiling, Energy efficiency, Construction and testing.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۴/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۵/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه حرارت، سیالات و تأسیسات، دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

Email: nasser.baharloo@sru.ac.ir

(۲) دانش آموخته کارشناسی، گروه حرارت، سیالات و تأسیسات، دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

(۳) دانش آموخته کارشناسی، گروه مکانیک، دانشکده شهید مهاجر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، اصفهان.

مقدمه

از جمله کاربردهای بی نظیر انرژی خورشیدی استفاده از اجاق‌های خورشیدی جهت جمع کردن و تقویت انرژی خورشید برای پخت غذا و جوشاندن آب هست. به طور کلی سه نوع اجاق خورشیدی [1] تا کنون توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. نوع اول، اجاق خورشیدی غیر مستقیم [2] است که اجزای تشکیل دهنده این نوع اجاق‌ها شامل کلکتور خورشیدی سهموی، واحد پخت، مخزن ذخیره کننده سیال، پمپ و لوله‌های رابط هستند. در این دستگاه‌ها کلکتور خورشیدی در خارج از ساختمان و بقیه بخش‌ها در داخل ساختمان قرار دارند که به وسیله لوله‌های رابط با بخش خارجی مرتبط می‌شوند. کارکرد این اجاق به این صورت هست که سیال عامل توسط پمپ از مخزن به سمت کلکتور خورشیدی هدایت می‌شود و پس از جذب انرژی گرمایی در بخش کلکتور خورشیدی سیال عامل به طرف واحد پخت داخل ساختمان حرکت می‌کند. نوع دوم، اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ [3] است که اجزای تشکیل دهنده این نوع اجاق‌ها شامل یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ همراه با یک مخزن با جنس فولاد ضد زنگ است. اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ یک نوع اجاق خورشیدی مستقیم است که از لوله تحت خلأ و متمرکز کننده خورشیدی آلومینیومی تشکیل شده است که فرایند پخت مواد غذایی در داخل لوله داخلی صورت می‌گیرد. نوع سوم، اجاق خورشیدی سهموی [4] است که اجزای تشکیل دهنده این نوع اجاق‌ها شامل متمرکز کننده، پایه و نگه‌دارنده‌ها، بازوی متحرک و فک نگه‌دارنده ظرف غذا هستند. در این اجاق باید طراحی به گونه‌ای باشد که فک و نگه‌دارنده ظرف در نقطه کانونی اجاق سهموی قرار بگیرد و در انواع مختلف، چیدمان آینه‌ها با توجه به عملکرد و کارایی متفاوت هست. در مقاله حاضر از این نوع اجاق خورشیدی استفاده شده است. اجاق‌های خورشیدی سهموی به دلیل اینکه از بازتابندگی بیشتری نسبت به سایر انواع اجاق‌های خورشیدی بهره می‌برند، می‌توانند در زمان کوتاه‌تری دمای بالاتری را فراهم کنند.

نتو و همکاران [5] ظرفیت پخت یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای ساخته شده از عناصر غیر قابل بازیافت را مورد بررسی قرار دادند و یک مدل ریاضی نیز با هدف تخمین دما را مطالعه کردند. دستگاه برای دو پیکربندی، بدون بار و بارگذاری آزمایش

شده است. در دستگاه آن‌ها پخت شش کیک (۴/۵۰۰ گرم) با دمای بین ۱۴۴/۲ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۴/۵ درجه سانتی‌گراد در ۸۰ دقیقه انجام شد. مدل ریاضی آن‌ها تطابق خوبی بین نتایج نظری و تجربی نشان داد. سنسبل [6] یک اجاق خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از یک دیش جمع کننده سهموی را بررسی کرد. اجاق ساخته شده وی دو سیلندر متحد المركز با باله‌های داخلی و موم پارافین دارد. میانگین راندمان انرژی و انرژی به ترتیب ۲۲٪ و ۲۰۶٪ و زمان لازم برای رسیدن آب به ۹۰ درجه سانتی‌گراد با و بدون مواد تغییر فاز دهنده به ترتیب ۱۲۰ دقیقه و ۹۰ دقیقه است. تافیک و همکاران [7] طراحی جدیدی از اجاق خورشیدی مجهز به بازتابنده‌های داخلی و یک بازتابنده سهموی پایینی را ارائه دادند. آزمایش‌های پخت واقعی برای خانواده چهار نفره انجام گردید که سودمندی اجاق خورشیدی پیشنهادی را توصیف می‌کند. راندمان کلی اجاق با و بدون بازتابنده‌ها به ترتیب ۱۰/۷٪ و ۱۲/۵٪ برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که اجاق با بازتابنده قادر به رسیدن به دمای متوسط ~ ۱۴۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است. جیانلوکا و همکاران [8] با طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی ارزان با استفاده از لنز فرنل متمرکز نور، توانستند مقدار زیادی از تابش خورشید را روی یک منطقه کانونی کوچک متمرکز کنند؛ سپس تابش توسط یک آینه به سمت سطح پخت‌وپز، جایی که ظرف می‌تواند قرار گیرد، منعکس می‌شود. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اجاق پیشنهادی می‌تواند با راندمان خوب و کاهش زمان گرمایش به دمای بالا برسد به طوری که ۳ کیلوگرم آب می‌تواند در حدود ۳۰ دقیقه به ۹۰ درجه سانتی‌گراد برسد، در حالی که ۳ کیلوگرم روغن سیلیکون را می‌توان در کمتر از یک ساعت از ۴۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد رساند. احمد و همکاران [4] به طراحی، ساخت و آزمایش اجاق خورشیدی سهموی برای خانوارهای روستایی و کمپ پناهندگان پرداختند. هدف اصلی این اجاق متمرکز کردن تابش خورشید و تبدیل آن به گرما با استفاده از مواد بازتابنده مختلف بود و برخی از عوامل از جمله صاف و براق بودن سطح بازتابنده، متغیرهای کنترلی همچون سنجش دما و متغیرهای کنترل نشده همچون باد و دمای محیط در نظر گرفته شد. خروجی آزمایش‌ها بر اساس مواد بازتابنده فولاد ضد زنگ، فویل آلومینیومی و نوار مایلار مورد مطالعه قرار گرفته شد، همچنین در تحقیق آن‌ها سه شکل مختلف دما اندازه‌گیری شد؛ دمای سطح

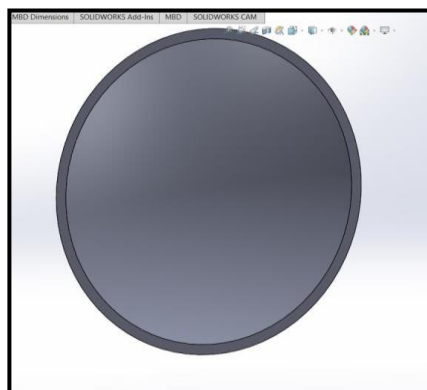
آبکاری آلومینیومی شده استفاده کردند. با توجه به نتایج آن‌ها یک ظرف از جنس آلومینیوم با توجه به دریافت ۱۰۱۲ وات بر متر مربع تشعشع ورودی خورشید، می‌تواند ۰/۵ لیتر آب را در مدت حدودا ۱۷ دقیقه به نقطه جوش برساند. حسین زاده و همکاران [3] به بررسی یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده مدت‌زمان لازم برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب ۱ ساعت و ۲۵ دقیقه است. همچنین میانگین بازده انرژی اجاق خورشیدی در آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر متر مربع برابر ۱۶/۱۶ درصد است. انوکوای و همکاران [13] به بررسی بازده انرژی و انرژی اجاق خورشیدی سهموی پرداختند. تجزیه و تحلیل آماری آن‌ها نشان داد تفاوتی بین نتایج تجربی و نظری که به کمک نرم‌افزار مینی‌تب به دست آمده است، نمی‌باشد و متوسط راندمان انرژی اجاق خورشیدی ۳۹ درصد است. ماریسیو گنزalez آویلز و همکاران [14] با طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی سهموی و با استفاده از یک مکانیزم مشاهده آنلاین به بررسی حرارتی اجاق پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند بهره‌وری حرارتی اجاق خورشیدی ۲۰ درصد و قدرت پخت آن ۷۵ وات می‌باشد. رگاتیری و همکاران [15] به طراحی و ساخت و تست چندین نمونه اجاق خورشیدی، به منظور تعیین بهترین شکل و بهره‌وری بالا پرداختند. طبق یافته‌های آن‌ها اجاق خورشیدی سهموی بهره‌وری حدودا ۱۴-۱۸ درصد بهترین عملکرد را دارد.

همان گونه که بیان گردید مطالعات زیادی به منظور ارزیابی عملکرد اجاق‌های خورشیدی صورت گرفته است اما مواردی همچون آموزش صفر تا صد ساخت اجاق خورشیدی، استفاده از مواد ارزان قیمت، تغییر زاویه قرارگیری اجاق در سه بعد و تحلیل ترمودینامیکی از جمله خلأهای مطالعات پیشین بوده است. در این تحقیق یک اجاق خورشیدی سهموی با استفاده از آینه‌کاری گسترده و منظم طراحی، ساخته و آزمایش شد. از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

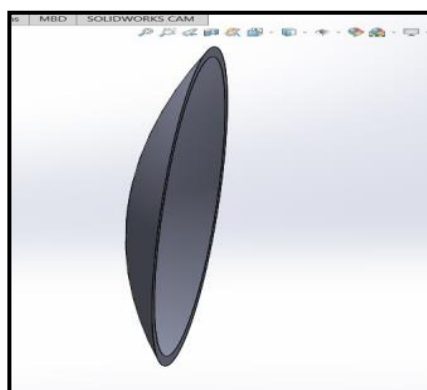
۱. استفاده از مواد در دسترس و ارزان قیمت در ساخت دستگاه.
۲. قابلیت بالای ارتقا و تعمیر دستگاه.
۳. امکان ساخت و استفاده اجاق برای آموزش در مدارس و دانشگاه‌ها.
۴. قابلیت تغییر زاویه در هر سه بعد مختصات مکانی.

متمرکز، دمای ظرف و دمای آب. موفقیت قابل توجه این کار تحقیقاتی در حالتی بود که از نوار مایلار به عنوان ماده بازتابنده استفاده شد. در این حالت حداکثر دمای مشاهده شده در آب ۷۴۰/۵ درجه سانتی‌گراد، در کاغذ ۱۰۵/۴ درجه سانتی‌گراد و در چوب ۲۳۹ درجه سانتی‌گراد بود.

ال موسایی و همکاران [9] ساختار، عملکرد و آزمایش‌های اجاق حرارتی خورشیدی سهموی را مورد بررسی قرار دادند. اجاق مد نظر در آلمان ساخته شده و برای پاسخگویی به نیازهای ساکنان روستایی و به طور گسترده در مراکش برای استفاده توسط ساکنانی که از چوب‌های جنگلی بهره می‌برند، طراحی شده است که نیاز به دمای پخت پایدار بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد. عملکرد دستگاه آن‌ها بر اساس تابش اشعه خورشید بر روی یک لوله خلأ شیشه‌ای است که منجر به گرم شدن روغن می‌شود. کارکرد دستگاه به این صورت است که روغن داغ شده از طریق دو لوله کوچک که با لوله بزرگ همراه هستند بالا آمده و ظرف حاوی غذای مورد نظر (به ظرفیت ۵ کیلوگرم) را گرم می‌کند. با توجه به نتایج مشاهده شده دمای روغن پخت‌وپز پس از یک ساعت حرارت دیدن به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و پخت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه انجام می‌شود. خراسانی زاده و همکاران [۱۰] به طراحی، ساخت و آزمایش یک اجاق خورشیدی سهموی با سه درجه آزادی به همراه یک صفحه پخت آلومینیومی به منظور پخت نان در شهر کاشان پرداختند. نتایج آن‌ها بازده کلی اجاق را ۵۰٪ نشان داد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده این اجاق می‌تواند در ۸ ماه از سال و حداقل در ۶ ساعت از هر روز آفتابی و در هر ساعت حدود ۱۲ عدد نان با خمیر ۲۰۰ گرمی را پخت کند. حسین زاده و همکاران [11] به طراحی، ساخت و آزمایش یک اجاق خورشیدی سهموی قابل حمل پرداختند. آن‌ها اثر سرعت‌های باد ۴،۲، ۰/۲ و ۶ متر بر ثانیه، بر بازده انرژی و انرژی را بررسی کردند. با توجه به نتایج آن‌ها در طول آزمایش بازده انرژی ۳۴/۵۲ تا ۴۶/۱۹٪ و بازده انرژی آن ۲/۱۱ تا ۵/۶۰٪ به دست آمد. آن‌ها طبق نتایج تجربی زمان لازم برای به جوش آوردن ۲ لیتر آب در سرعت باد ۶ متر بر ثانیه را حدود ۴۰ دقیقه به دست آوردند. رحیم زاده و همکاران [12] به طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی سهموی و قابل حمل پرداختند که از قطعاتی جمع شونده از جنس پلکسی و



(الف)



(ب)

شکل ۲ مدل سازی ۳ بعدی متمرکز کننده در نرم افزار سالدورک: (الف) نمای روبه رو، (ب) نمای جانبی

تجهیزات مورد استفاده

دیش سهموی شکل. با هدف استفاده از مواد ارزان قیمت و در دسترس از یک دیش سهموی دست دوم که از قبل در اختیار محققان بود، استفاده شد. به طور کلی دیش هر قدر عمق کمتری داشته باشد سایه کمتری تولید کرده و فاصله کانونی بیشتر خواهد شد. دیش مورد استفاده در این تحقیق مطابق شکل شماتیک ۱ اجاق خورشیدی دارای قطر ۸۱ سانتی متر و عمق ۷/۷ سانتی متر است.

آئینه ها. مدیریت و بازگرداندن بیشترین مقدار ممکن از اشعه خورشید توسط انعکاس به ظرف، یکی از عوامل مهم در کارکرد مناسب اجاق است. میزان بازتاب آئینه ۹۵٪ است در صورتی که آلومینیوم جلا داده شده ۸۵٪ است. لذا برای بهره گیری از بیشترین بازتاب از آئینه استفاده شده است. در این اجاق حدوداً ۴۳۵ عدد آئینه استفاده شده است.

قوطی پروفیل آهن و تسمه آهنی. باید سازه ای طراحی شود

۵. محاسبه بازده انرژی در همه آزمایش ها.

۶. بررسی تأثیر جنس ظرف، اندازه ظرف، رنگ بدنه ظرف و بررسی تأثیر نحوه قرارگیری درب ظروف بر عملکرد اجاق خورشیدی.

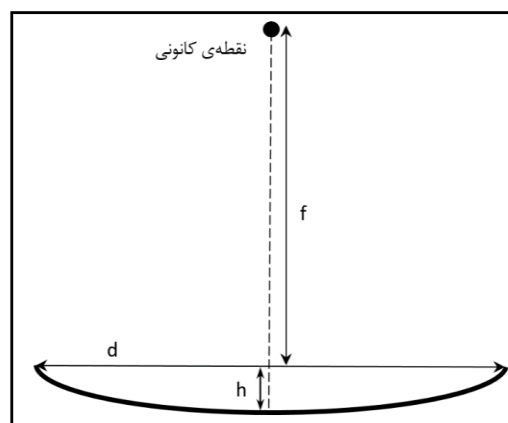
طراحی و ساخت

محاسبه نقطه کانونی

مطابق شکل (۱)، تجهیز محل قرارگیری ظرف باید در نقطه کانونی که به وسیله فرمول (۱) به دست می آید، قرار بگیرد [4].

$$f = \frac{d^2}{16h} \quad (1)$$

در رابطه فوق d قطر دیش و h عمق دیش هست که در این تحقیق به ترتیب مقادیر ۸۱ سانتی متر و ۷/۷ سانتی متر هستند؛ بنابراین فاصله کانونی، f ، برابر ۵۳ سانتی متر به دست می آید.



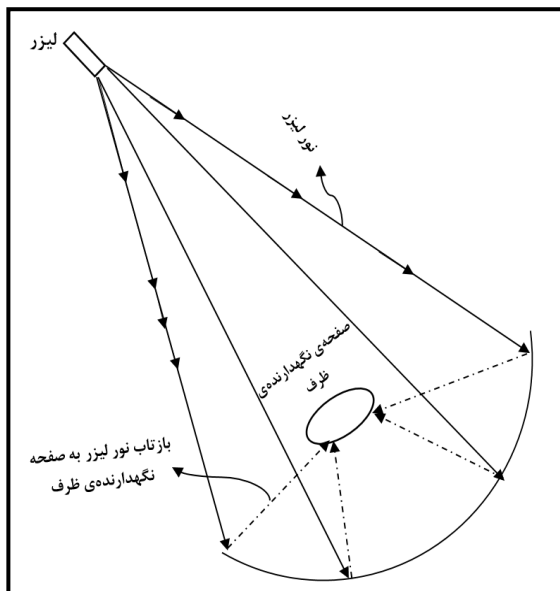
شکل ۱ شماتیک دیش و نقطه کانونی

با توجه به شکل (۱) و مشخصات موجود از اجاق خورشیدی، از نرم افزار سالدورک برای طراحی سه بعدی قسمت متمرکز کننده اجاق خورشیدی به منظور به دست آوردن مساحت سطح روی آن استفاده شده است. در شکل (۲) مدل سازی و طراحی نهایی قسمت متمرکز کننده اجاق خورشیدی در نرم افزار سالدورک قابل مشاهده هست. با توجه به مدل سازی انجام شده مساحت سطح متمرکز کننده ۰/۵۳۲۹۷۱ متر مربع به دست آمده است.



شکل ۴ پایه نگه‌دارنده و بازوی متحرک جهت تنظیم زاویه در سه بعد

آینه‌ها به اشکال مربعی $3/5$ در $3/5$ سانتی متر برش داده می‌شود. برش‌های کوچک‌تر باعث یکپارچه شدن آینه‌ها و اختلاف ارتفاع کمتر و تنظیم دقیق آن‌ها به سمت فاصله کانونی می‌شود. روش‌های مختلفی برای تنظیم کردن زاویه آینه‌ها وجود دارد. در این آزمایش صفحه دیش را زاویه دلخواهی قرار می‌دهیم و کاغذی را در صفحه‌ی کوچک به جای ظرف قرار می‌دهیم و لیزری را با فاصله چند متری از صفحه دیش و در همان زاویه صفحه قرار می‌دهیم. لیزر در همان جایی که قرار دارد به عنوان جایگزین خورشید است و به ترتیب نور لیزر را در تک‌تک آینه‌ها می‌اندازیم. اگر نور لیزر به وسط صفحه کاغذی برخورد کرد یعنی زاویه آینه مناسب است (شکل ۵). شکل نهایی دستگاه اجاق خورشیدی به صورت شکل (۶) است.



شکل ۵ نحوه تنظیم زاویه آینه‌ها

که از استحکام بالایی برخوردار باشد تا در شرایط جوی و باد دچار مشکل نشود. برای ساخت پایه و فک نگه‌دارنده ظرف از قوطی آهنی استفاده شده است تا ضمن استحکام بخشیدن به اجاق و مقاومت در برابر شرایط جوی و باد، تعادل ظرف را نیز برقرار کند. همچنین به دلایل ذکر شده و نیز اتصال بهتر اجزاء، از تسمه آهنی مطابق شکل (۳) استفاده شده است.



شکل ۳ استفاده از تسمه آهنی برای استحکام و اتصال

پیچ و مهره و چسب. برای اتصال تسمه به دیش و ساخت پایه متحرک و اتصال آن‌ها به هم از پیچ و مهره استفاده می‌شود. همچنین برای چسباندن آینه‌ها به صفحه دیش از چسب آکوارיום استفاده می‌شود. این چسب‌ها به دلیل اینکه مدت تقریباً زیادی طول می‌کشد تا خشک شوند برای این کار بسیار مناسب هستند چون برای تنظیم آینه‌ها به فرصت کافی احتیاج هست.

اتصال و اسمبل قطعات

ابتدا قوطی‌ها به اندازه‌های مشخص به حالت 90° درجه به یکدیگر جوش داده می‌شود و تقریباً از وسط، آن‌ها را دو چاک می‌دهیم تا انتهای قوطی‌ها به یکدیگر برسند و آن‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند و برای محکم‌تر شدن و سنگین‌تر شدن آن بین دو قوطی هم دوتکه دیگر قرار می‌گیرد و جوش داده می‌شود. برای تغییر درجه صفحه و تنظیم آن به سمت خورشید باید بازویی متحرک ساخته شود. به همین منظور دو تکه تسمه در انتهای پایه جوش داده می‌شود و دو قوطی طوری قرار می‌گیرند که قوطی کوچک‌تر بتواند داخل قوطی بزرگ‌تر آزادانه حرکت کند. روی قوطی کوچک‌تر با فاصله‌های 2 سانتی متر سوراخ قرار می‌گیرد تا در هر درجه‌ای که مورد نیاز است، قرار گیرد و ثابت شود (شکل ۴). فلش‌های قرمز رنگ در شکل (۴) نشان‌دهنده روش‌های حرکت و تنظیم زاویه و مختصات مکانی در سه بعد هست.

بازدهی حرارتی دستگاه نیز مورد بررسی قرار بگیرد که با استفاده از رابطه (۲) و (۳)، بازده انرژی اجاق خورشیدی سهموی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\dot{E}_w}{\dot{E}_s} \quad (4)$$

محاسبات برای آزمایش‌های مختلف بر اساس روابط فوق و داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده، انجام گردیده و در آخرین بخش مقاله آورده شده‌است.

بررسی تجربی عملکرد عدم قطعیت

آنالیز عدم قطعیت برای همه آزمایش‌ها با استفاده از روش مفات [19] انجام گرفت. اگر پارامتر F با استفاده از تابعی مطابق رابطه زیر محاسبه شود:

$$F = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (5)$$

مقدار عدم قطعیت در اندازه‌گیری و یا محاسبه پارامتر F از رابطه زیر حساب می‌شود.

$$\delta F = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

در رابطه بالا، Δx_i عدم قطعیت در اندازه‌گیری یا محاسبه متغیر x_i است. برای پارامترهایی که به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند؛ عدم قطعیت همان دقت وسیله اندازه‌گیری است. تنها متغیری که به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود دما می‌باشد که عدم قطعیت آن ± 0.5 درجه سلسیوس است. عدم قطعیت کلیه پارامترها با استفاده از رابطه (۶) حساب شده و در جدول (۱) بیان شده است. دماسنج دیجیتال از نوع دماسنج دیجیتالی tes-۱۳۰۶ ساخت کمپانی Tes تایوان می‌باشد.

جدول ۱ عدم قطعیت کلیه مشخصه‌های محاسبه شده

پارامتر	نماد	واحد	عدم قطعیت
دمای محیط (دماسنج جیوه‌ای)	$T_{amb,ave}$	$^{\circ}C$	± 0.5
دمای آب (دماسنج دیجیتالی)	$T_{w,f}$	$^{\circ}C$	± 0.5
زمان (کرونومتر دیجیتالی)	Δt	s	± 0.01
نرخ انرژی حرارتی	$\dot{E}_w$	W	$\pm 1/2$
بازده انرژی اجاق	η	درصد	± 0.4

تکرارپذیری

برای اطمینان از صحت داده‌های اندازه‌گیری و افزایش دقت



شکل ۶ تصویر واقعی و نهایی دستگاه اجاق خورشیدی

تحلیل ترمودینامیکی (محاسبه بازده انرژی)

در این قسمت، تحلیل ترمودینامیکی با هدف محاسبه بازده انرژی صورت می‌پذیرد [16].

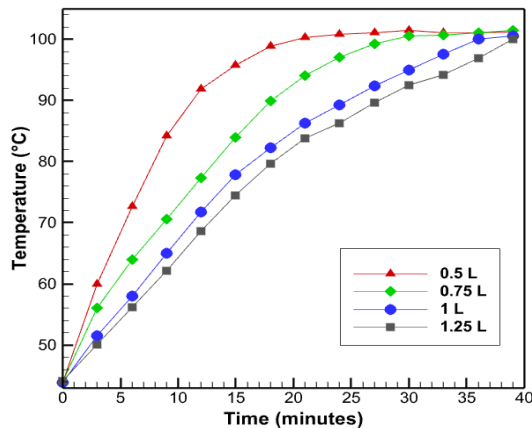
نرخ انرژی ورودی در اجاق خورشیدی سهموی به عنوان سیستم در نظر گرفته شده، انرژی خورشید است که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\dot{E}_s = I_{ave} A_{ap} \quad (2)$$

در رابطه (۲) I_{ave} میانگین نرخ تابش خورشیدی ورودی به اجاق خورشیدی سهموی در یک فاصله زمانی است که مقدار ۹۴۱ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است [17]. A_{ap} نیز مساحت دهانه متمرکز کننده خورشیدی است که در بخش طراحی و ساخت به دست آمد. نرخ انرژی حرارتی مصرف شده مطابق رابطه (۳) برابر است با مقدار انرژی گرمایی مورد نیاز برای رسیدن آب به دمای مشخص بر واحد زمان [17,18]:

$$\dot{E}_w = \frac{m_w C_w (T_{w,f} - T_{w,i})}{\Delta t} \quad (3)$$

در رابطه بالا، m_w و C_w به ترتیب جرم و ظرفیت گرمایی ویژه آب، $T_{w,i}$ و $T_{w,f}$ نیز به ترتیب بیانگر دمای آب در ابتدا و انتهای مدت زمان آزمایش است. برای آزمایش‌هایی که آب در آنها به نقطه جوش می‌رسد، نقطه نهایی را همان نقطه جوش در نظر می‌گیریم و واحد زمانی Δt نیز مدت زمانی است که بر حسب ثانیه طول می‌کشد تا آب به دمای 100 درجه برسد. جهت بررسی عملکرد حرارتی دستگاه ساخته شده باید



(ب)

شکل ۸ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی مقادیر مختلف آب در یک ظرف ثابت: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف مسی متوسط و ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

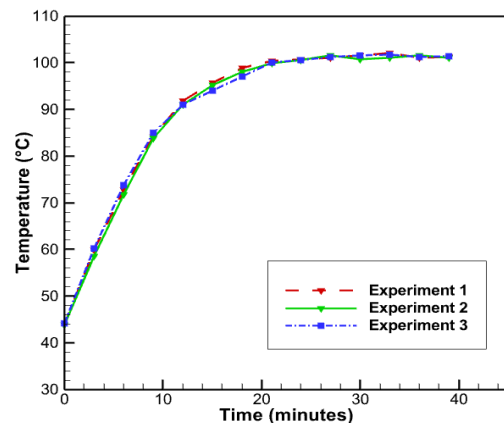
بررسی تأثیر جنس ظرف مسی و آلومینیومی بر دمای آب

در این آزمایش دو ظرف مسی و آلومینیومی با ابعاد تقریباً برابر (قطر کف ظرف حدوداً ۱۶ سانتی متر) با مقدار ثابت ۰/۵ لیتر آب بررسی شد. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید به طور میانگین از ۳۴ تا ۳۸ درجه سانتی گراد متفاوت بوده است. همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است در مدت زمان ۴۰ دقیقه ظرف مسی به دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و ظرف آلومینیومی به دمای ۷۸ درجه سانتی گراد می‌رسند. در نتیجه در یک مدت معین دمای آب در ظرف مسی بیشتر از دمای آب در ظرف آلومینیومی بالا می‌رود. علت این نتیجه را می‌توان بیشتر بودن میزان رسانندگی گرمایی فلز مس ($\frac{W}{mK}$ ۳۹۸) در مقایسه با فلز آلومینیوم ($\frac{W}{mK}$ ۲۴۸) [20]، بیان کرد.



(الف)

نتایج، هر آزمایشی حداقل سه مرتبه تکرار شده است. برای مثال در شکل (۷) نتایج حاصل از سه مرتبه تکرار در آزمایش ۱ که مربوط به ۰/۵ لیتر آب در ظرف مسی اندازه متوسط بود، نشان داده شده است. در همه نمودارها میانگین نتایج سه تکرار به عنوان داده نهایی ارائه شده است.



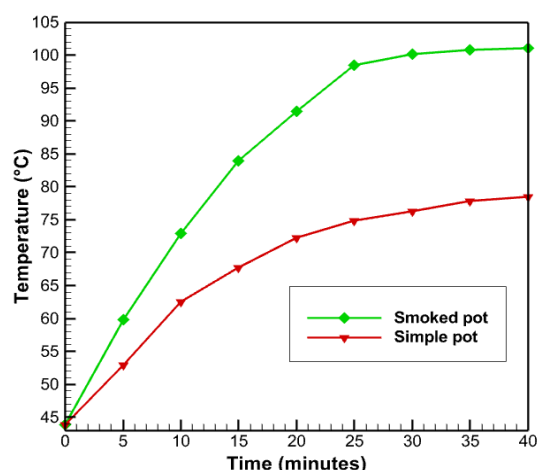
شکل ۷ نمودار تکرارپذیری

بررسی تأثیر مقادیر مختلف آب در یک ظرف ثابت بر دمای آب

در این آزمایش مقادیر متفاوت آب در داخل یک ظرف مسی با اندازه یکسان (قطر کف ظرف مسی ۱۸ سانتی متر) مورد آزمایش قرار داده شد. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید در این آزمایش به طور میانگین ۴۶ تا ۴۹ درجه سانتی گراد بود. با توجه به نمودار شکل (۸) طبق آزمایش‌های انجام شده مقدار ۰/۵ لیتر آب پس از گذشت ۲۰ دقیقه به نقطه جوش (دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد) می‌رسد. در همین مدت مقدار ۰/۷۵ لیتر آب به دمای ۹۳ درجه سانتی گراد، ۱ لیتر آب به دمای ۸۵ درجه سانتی گراد و ۱/۲۵ لیتر آب به دمای ۸۲ درجه سانتی گراد می‌رسند.

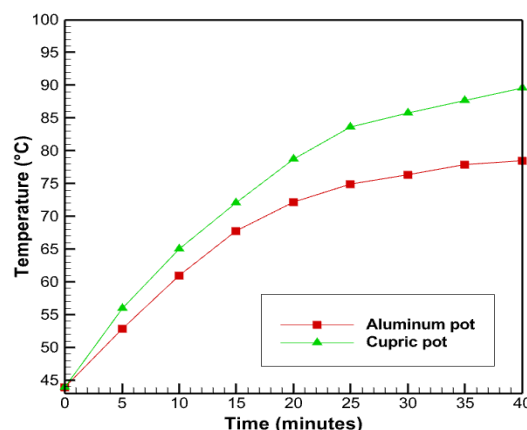


(الف)



(ب)

شکل ۱۰ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر رنگ سیاه (الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف آلومینیومی دودی و (ب) نمودار نتایج آزمایش



(ب)

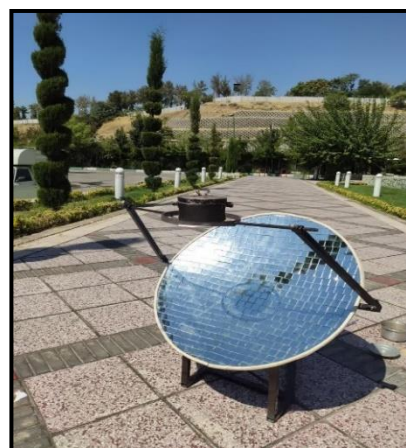
شکل ۹ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر جنس ظرف (مس و آلومینیومی): (الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف آلومینیومی و (ب) نمودار نتایج آزمایش

بررسی تأثیر رنگ سیاه به جذب گرمای خورشید

در این آزمایش ظرف آلومینیومی معمولی و دودی شده آن با مقدار ثابت ۰/۵ لیتر آب (قطر کف ظرف ۱۶ سانتی‌متر) در دمای هوای ۳۶ درجه سانتی‌گراد تحت تابش مستقیم خورشید بررسی شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشخص است ظرف آلومینیومی دودی در مدت ۲۵ دقیقه به دمای جوش می‌رسد در حالی که ظرف آلومینیومی معمولی در طی این مدت به دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است. می‌توان گفت مقدار آب داخل ظرف دودی در مقایسه با ظرف آلومینیومی معمولی در مدت زمان یکسان به دمای بالاتری می‌رسد. علت این امر بالا بودن ضریب جذب تشعشع جسم سیاه است. در واقع هر چه جسم تیره‌تر باشد جذب بالاتر و هر چه روشن‌تر باشد بازتاب بالاتر دارد.

بررسی تأثیر نوع قرارگیری درب ظرف به دمای آب

در این آزمایش ظرف مسی (با قطر کف ظرف برابر ۱۸ سانتی‌متر) و مقدار ۰/۵ لیتر آب با توجه به نوع قرارگیری درب ظرف (باز، بسته، نیمه‌باز) بررسی می‌شود. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید به طور میانگین بین ۵۰ تا ۵۴ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده است. مطابق نمودار شکل (۱۱)، اگر درب ظرف به‌طور کامل روی ظرف قرار بگیرد (ظرف کاملاً بسته باشد)، آب درون ظرف در مدت زمان ۲۰ دقیقه به نقطه جوش می‌رسد در حالتی که اگر درب ظرف نیمه‌باز و باز باشد در همین مدت زمان به ترتیب به دمای ۷۳ و ۶۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. می‌دانیم که اگر تابش نور مستقیم باشد دمای بالاتر باید حاصل شود اما باز بودن درب ظرف، سبب برقراری انتقال حرارت همرفتی می‌شود که سبب کاهش دمای آب خواهد شد. لذا می‌توان گفت تأثیر منفی انتقال حرارت همرفتی بر تأثیر مثبت تابش مستقیم غلبه کرده است. وجود نسیم و باد اگر چه اندک باشد در افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی تأثیر مستقیمی دارد که در این آزمایش و نیز در هر منطقه‌ای که اجاق خورشیدی بخواهد استفاده شود تأثیر خواهد گذاشت.

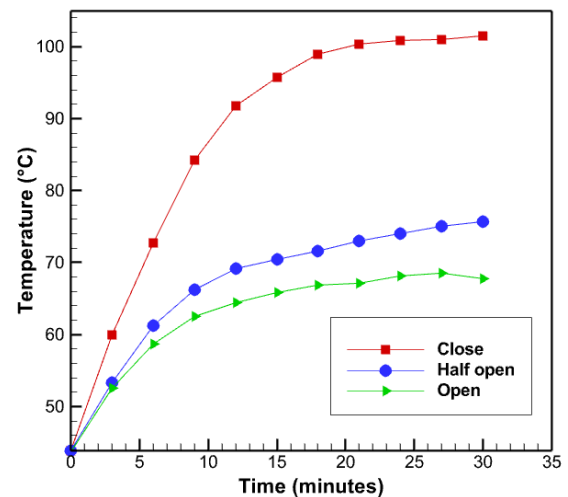


(الف)

کوچک روند صعودی خود را حفظ کرده ولی روند صعودی ظرف بزرگ ضعیف و در نهایت در محدوده ۸۵ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌شود. برای توجیه این رفتار باید به اندازه پهنای کف ظرف‌ها و نسبت آن با اندازه پهنای نقطه کانونی اشاره کرد. ذکر این نکته به عنوان مقدمه تحلیل ضروری است که نقطه کانونی یعنی محل تمرکز و تجمع بازتاب نور از آینه‌ها، در واقع یک نقطه نیست بلکه یک مساحتی شبیه دایره است. از آنجایی که محدوده نقطه کانونی (محل تجمع نورهای بازتاب شده) مساحتی در حدود ظرف متوسط دارد (قطر ۱۹ سانتی‌متر)، بهینه‌ترین دریافت انرژی توسط ظرف متوسط صورت می‌پذیرد. ظرف کوچک‌تر به دلیل کمتر بودن مساحتش از مساحت محدوده کانونی، از تمام نورهای بازتاب شده نمی‌تواند استفاده کند و بخشی از نورهای بازتاب شده بلا استفاده در محیط منعکس می‌شود. ظرف بزرگ‌تر نیز با وجود اینکه تمام نورهای بازتاب شده را دریافت می‌کند، اما بخشی از مساحت کف ظرف در معرض بازتاب نورها نیست و همین بخش، سهمی از گرمای دریافتی ناشی از بازتاب نورهای تجمع شده را از طریق رسانش جذب می‌کند و این گرما را از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی به محیط منتقل می‌کند. نهایتاً تمام این پدیده‌ها منجر به عملکرد ضعیف‌تر ظرف بزرگ‌تر می‌شود. میزان انتقال حرارت از ظرف بزرگ‌تر به محیط به اندازه‌ای است که از دقیقه ۲۰ بعد انتقال حرارت حالت دائم پیدا می‌کند یعنی نرخ دریافت و تحویل حرارت برابر می‌شود و دما در محدوده ۸۵ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌ماند.



(الف)

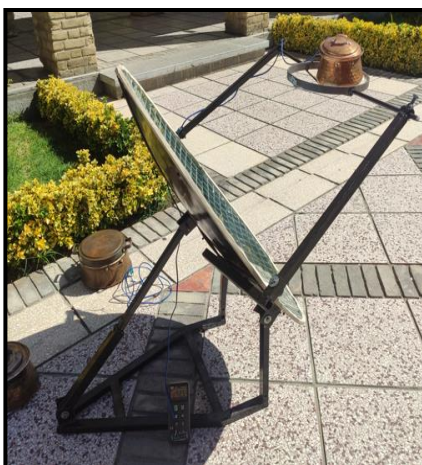


(ب)

شکل ۱۱ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر نحوه قرار گیری درب ظرف: (الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف مسی با درب باز، (ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

بررسی تأثیر اندازه ظرف بر دمای آب

در این آزمایش سه ظرف مسی کوچک (قطر کف ظرف حدود ۱۶ سانتی‌متر)، متوسط (قطر کف ظرف حدود ۱۹ سانتی‌متر) و بزرگ (قطر کف ظرف حدود ۲۲ سانتی‌متر) با مقدار مساوی ۰/۵ لیتر آب بررسی شده است. با توجه به نمودار شکل (۱۲) ظرف مسی متوسط در زمان کمتری نسبت به دو ظرف دیگر به جوش می‌آید. آب موجود در ظرف مسی متوسط در دقیقه ۲۰ به نقطه جوش می‌رسد. در همین زمان، ظرف کوچک‌تر ۶ درجه دمايش پایین‌تر است. دو ظرف مسی با اندازه کوچک و بزرگ تقریباً تا دقیقه ۱۳ رفتار مشابه دارند ولی از دقیقه ۱۳ به بعد ظرف مسی



(الف)

اندازه کوچک و تعداد بالا با تنظیم دقیق زاویه بر اساس بازتاب نور روی نقطه کانونی صورت پذیرفت. برای کلیه تجهیزات از مواد در دسترس و ارزان قیمت استفاده شد. این دستگاه قابلیت بالا و راحت ارتقا را داراست. همچنین با توجه به تغییر زاویه تابش خورشید در ساعت‌های متفاوت، قابلیت تغییر زاویه در سه بعد مختصات مکانی را داراست. جهت اطمینان از آزمایش‌ها نمودار تکرارپذیری ارائه گردیده و جهت اطمینان از دقت نتایج، آنالیز عدم قطعیت صورت پذیرفته است. نتایج زیر به طور خلاصه از آزمایش‌ها حاصل گردید:

۱. ظرف مسی با مقدار آب ۰/۵ لیتر در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به جوش می‌آید و مقدار ۱۰۵ لیتر آب در این مدت‌زمان به دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

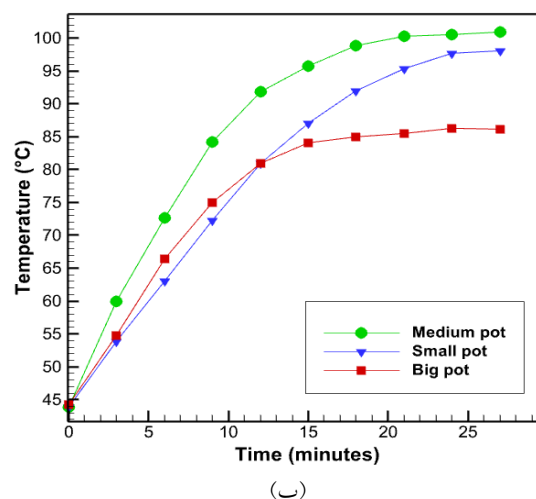
۲. با مقایسه ظرف آلومینیومی و ظرف مسی نتیجه می‌شود در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه درجه حرارت ظرف مسی به ۸۶ درجه سانتی‌گراد و ظرف آلومینیومی به ۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

۳. در بررسی تأثیر رنگ مواد در جذب گرما مشاهده شد که ظرف آلومینیومی دودی و غیر دودی به ترتیب در مدت‌زمان ۲۵ دقیقه به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسند.

۴. در بررسی تأثیر نحوه قرارگیری درب ظرف، مطابق آزمایش که اگر درب ظرف به طور کامل روی ظرف قرار بگیرد در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که اگر درب ظرف نیمه‌باز و یا باز باشد در همین مدت‌زمان به ترتیب به دمای ۷۳ و ۶۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

۵. برای مقایسه اندازه ظرف، عملکرد اجاق خورشیدی با سه ظرف کوچک، متوسط و بزرگ مسی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که محدوده نقطه کانونی مساحتی در حدود ظرف متوسط دارد، بهینه‌ترین دریافت انرژی توسط ظرف متوسط صورت می‌پذیرد. ظرف کوچک‌تر به دلیل کمتر بودن مساحتش از مساحت محدوده کانونی و ظرف بزرگ‌تر نیز به دلیل بیشتر بودن این مساحت، عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند.

۶. نتیجه محاسبات ترمودینامیکی جهت استخراج بازده انرژی، نشان می‌دهد بیشترین بازده انرژی مربوط به ظرف مسی



شکل ۱۲ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر اندازه ظرف: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظروف مسی، ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

نتایج محاسبات انرژی

محاسبات انرژی برای آزمایش‌های مختلف مطابق جدول (۲) به دست می‌آید. به جهت مقایسه در ست و شرایط یکسان، همه ظرف‌های اشاره شده در جدول، به اندازه ۰/۵ لیتر آب در خود جای داده‌اند. مطابق جدول بیشترین بازده انرژی مربوط به ظرف مسی متوسط با درب بسته و پس از آن ظرف مسی کوچک با درب بسته و ظرف آلومینیومی دودی در رتبه‌های دوم و سوم هستند.

جدول ۲ محاسبات انرژی برای آزمایش‌های مختلف

بازده انرژی (درصد)	انرژی مصرفی (وات)	
۱۸/۵۲	۹۲/۸۸۹	ظرف مسی متوسط درب کاملاً بسته
۷/۶۷	۳۸/۴۸۳	ظرف مسی متوسط درب کاملاً باز
۹/۶۶	۴۸/۴۳۵	ظرف مسی متوسط درب نیمه باز
۱۳/۶۶	۶۸/۵۰۶	ظرف مسی بزرگ با درب بسته
۱۷	۸۵/۲۵۹	ظرف مسی کوچک با درب بسته
۹/۶۲	۴۸/۲۶۹	ظرف آلومینیومی
۱۶/۹۳	۸۴/۹۲۷	ظرف آلومینیومی دودی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک اجاق خورشیدی سهموی با قابلیت کاربری ساده و استفاده آموزشی ساخته شد. نصب مجموعه آینه‌ها با

بازتاب	Reflection	متوسط با درب بسته با ۱۸/۵۲ درصد است و پس از آن ظرف
جسم سیاه	Black body	مسی کوچک با درب بسته با ۱۷ درصد و ظرف آلومینومی
تشعشع	Radiation	دودی با ۱۶/۹۳ درصد به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم
جذب	Absorption	هستند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق ابلاغ گزینت شماره ۴۹۹۱ مورخ ۱۴۰۲/۰۶/۰۳ انجام گردیده است.

واژه نامه

سهموی	Parabolic
نقطه کانونی	Focal point
همرفت	Convection

مراجع

- [1] U. C. Arunachala and A. Kundapur, "Cost-effective solar cookers: A global review," *Sol. Energy*, vol. 207, pp. 903-916, (2020)
- [2] M. Hosseinzadeh, S. Alizadeh Momen, S. M. Mirzababaei, H. Zamani and A. Kianifar, "Experimental Investigation of Indoor Cooking Using an Indirect Solar Cooker Integrated with Heat Storage Materials," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 3, pp. 207-219, (2021).
- [3] M. Hosseinzadeh, S. M. Mirzababaei and H. Zamani, "Thermodynamic Analysis of an Evacuated Tube Solar Cooker under Different Operating Conditions," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 5, pp. 259-268, (2021).
- [4] S. M. M. Ahmed, M. R. Al-Amin, S. Ahammed, F. Ahmed, A. M. Saleque and M. Abdur Rahman, "Design, construction and testing of parabolic solar cooker for rural households and refugee camp," *Sol. Energy*, vol. 205, pp. 230-240, (2020).
- [5] R. V. P. Neto, L. G. M. de Souza, J. C. de Lima, L. G. V. M. de Souza and E. V. Mendes, "Theoretical-experimental study of a box-type solar oven made from disused recyclable elements," *Sol. Energy*, vol. 230, pp. 732-746, (2021).
- [6] R. Senthil, "Enhancement of productivity of parabolic dish solar cooker using integrated phase change material," *Materials Today: Proceedings*, vol. 34, pp. 386-388, (2021).
- [7] M. A. Tawfik, A. A. Sagade, R. Palma-Behnke, H. M. El-Shal and W. E. Abd Allah, "Solar cooker with tracking-type bottom reflector: An experimental thermal performance evaluation of a new design," *Sol. Energy*, vol. 220, pp. 295-315, (2021)
- [8] G. Coccia, A. Aquilanti, S. Tomassetti, A. Ishibashi and G. Di Nicola, "Design, manufacture and test of a low-cost solar cooker with high-performance light-concentrating lens," *Sol. Energy*, vol. 224, pp. 1028-1039, (2021).
- [9] N. El Moussaoui, S. Tabli, I. Atmane, Kh. Kassmi, K. Schwarzer, H. Chayeb and N. Bachiri "Feasibility of a new design of a Parabolic Trough Solar Thermal Cooker (PSTC)," *Sol. Energy*, vol. 201, pp. 866-871, (2020).
- [10] H. Khorasanizadeh, M. Sabzpooshani and S. Nazari, "Design, Manufacture and Testing a Solar Bread Cooker with Concentrator," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 13, pp. 1-13, (2014) [In Persian].

- [11] F. Zarrinkalam, M. Hosseinzadeh, H. Zamani, S. M. Mirzababaei and A. Faezian, "Experimental Investigation of the Effect of Wind Speed on the Performance of a Portable Parabolic Solar Cooker from Energy and Exergy Viewpoints," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 1525-1532, (2020) [In Persian].
- [12] H. Rahimzadeh, M. Nasiri and A. S. Qomi, "Design and construction and thermal investigation of a portable parabolic solar oven," *27th Annual International Conference of the Iranian Mechanical Engineers Association, Iran*, pp. 3168-3172, April 30, (2019) [In Persian].
- [13] A.O. Onokwai, U. C. Okonkwo, C. O. Osueke, C. E. Okafor, T. M. A. Olayanju and S. O. Dahunsi, "Design, modelling, energy and exergy analysis of a parabolic cooker," *Renew Energy*, vol. 142, pp. 497-510, (2019).
- [14] M. González-Avilés, O. R. Urrieta, I. Ruiz and O.M. Cerutti, "Design, manufacturing, thermal characterization of a solar cooker with compound parabolic concentrator and assessment of an integrated stove use monitoring mechanism," *Energy for Sustainable Development*, vol. 45, pp. 135-141, (2018).
- [15] A. Regattieri, F. Piana, M. Bortolini, M. Gamberi and E. Ferrari, "Innovative portable solar cooker using the packaging waste of humanitarian supplies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, (2017).
- [16] M. Hosseinzadeh, M. Sardarabadi, F. Passandideh, "Nanofluid and Phase Change Material Integrated into a Photovoltaic Thermal System," *Phase Change Materials, Central West Publishing, Australia*, pp. 93-127, (2019).
- [17] S. K. Shukla, "Comparison of Energy and Exergy Efficiency of Community and Domestic Type Parabolic Solar Cookers," *International Journal of Green Energy*, vol. 6, no. 5, pp. 437-449, (2009).
- [18] P. M. Cuce, "Box type solar cookers with sensible thermal energy storage medium: A comparative experimental investigation and thermodynamic analysis," *Sol. Energy*, vol. 166, pp. 432-440, (2018).
- [19] R. J. Moffat, "Describing the uncertainties in experimental results," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 1, no. 1, pp. 3-17, (1988).
- [20] I. L. Pioro, M. Mahdi and R. Popov, "Heat transfer media and their properties," *Handbook of Thermal Science and Engineering*, pp. 1353-1446, (2018).

A High-Accuracy Method for Solving the Differential-Algebraic Equations Arising in Mechanical Systems

Research Article

Faezeh Kalantari¹, Mohammad Ali Mehrpouya² , Nabi Chegini³DOI: [10.22067/jacsm.2023.82824.1186](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.82824.1186)

1- Introduction

While the kinematic and dynamic modeling of mechanical systems is well developed, the numerical solution of the governing equations of many of these models is still a large field under investigation. In any constrained mechanical system, the connections of the connected bodies restrict their relative movement. Therefore, the governing equations of the model usually form a system of differential-algebraic equations that includes both differential and algebraic equations. It should be noted that, unlike the analytical and numerical solutions of differential equations, the analytical and numerical behavior of differential-algebraic equations is more complex and completely different from differential equations. In this paper, a high-accuracy method for solving the system of differential-algebraic equations arising in mechanical systems is presented. The presented method is based on the use of a pseudospectral method that will transform the solution of the system of differential-algebraic equations into the solution of a system of algebraic equations. Next, an optimization technique is utilized to facilitate solving the obtained system of algebraic equations. In the end, some numerical experiments are performed on several benchmark problems to show the accuracy and applicability of the method.

2- Problem Statement

In this paper, differential-algebraic equations are investigated in the most common form of its representation, which is the following form

$$\begin{cases} \mathbf{y}' = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}, \mathbf{z}), \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(t, \mathbf{y}, \mathbf{z}), \end{cases} \quad t \in [t_0, T],$$

And is called a nonlinear semi-explicit form. Here, $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), \dots, y_p(t)]^T$ and $\mathbf{z}(t) = [z_1(t), \dots, z_q(t)]^T$ are differential and algebraic functions, respectively, and $\mathbf{f} : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^p$ and $\mathbf{g} : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^q$ are continuously

differentiable functions. Furthermore, the initial and boundary conditions should be placed next to the system of nonlinear semi-explicit differential-algebraic equations.

3- Proposed Method

To implement the proposed method for solving the system of nonlinear semi-explicit differential equations, first, suppose that

$\hat{\theta}_i = (T - t_0)\theta_i + (T + t_0) / 2$, $i = 1, \dots, n$ for a given positive integer n , are the shifted Legendre-Gauss-Radau (LGR) points to the interval $[t_0, T]$. By adding the point $\hat{\theta}_{n+1} = T$, a set of $n + 1$ points

$$\{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_{n+1} = T\},$$

is constituted which are used for approximating $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$ and $\mathbf{z} = \mathbf{z}(t)$. For this purpose, we approximate the k -th component of $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$ and $\mathbf{z} = \mathbf{z}(t)$ as

$$\begin{aligned} y_k(t) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} c_{k,i} \hat{\phi}_i(t), \quad k = 1, \dots, p, \\ z_k(t) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} d_{k,i} \hat{\phi}_i(t), \quad k = 1, \dots, q, \end{aligned}$$

in which

$$\hat{\phi}_i(t) = \phi_i\left(\frac{2}{T - t_0}t - \frac{T + t_0}{T - t_0}\right),$$

are the Lagrange polynomials based on the shifted LGR points to the interval $[t_0, T]$. In general, we can write

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(t), \\ \mathbf{z}(t) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(t), \end{aligned}$$

in which

*Manuscript received: June 7, 2023. Revised, October 14, 2023, Accepted, November 12, 2023.

¹ M.Sc., Department of Mathematics, Tafresh University, Tafresh, Iran

² Corresponding Author: Associate Professor, Department of Mathematics, Tafresh University, Tafresh, Iran.

Email: mehrpouya@tafreshu.ac.ir.

³ Associate Professor, Department of Mathematics, Tafresh University, Tafresh, Iran

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{y}(\hat{\theta}_i) = [y_1(\hat{\theta}_i), \dots, y_{N_y}(\hat{\theta}_i)]^T,$$

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{z}(\hat{\theta}_i) = [z_1(\hat{\theta}_i), \dots, z_{N_z}(\hat{\theta}_i)]^T,$$

are unknown parameters. Now, we can approximate $\mathbf{y}'$ as

$$\mathbf{y}'(t) \simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i'(t).$$

By substituting these approximations into the system of nonlinear semi-explicit differential equations, and then collocating them in just $\hat{\theta}_j$, $j = 1, \dots, n$, we have

$$\sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i'(\hat{\theta}_j) \simeq \mathbf{f}(\hat{\theta}_j, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_j), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_j)), \quad j = 1, \dots, n,$$

$$0 \simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_j, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_j), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_j)), \quad j = 1, \dots, n.$$

In addition, by discretizing the initial and boundary conditions of the problem, we have

$$\mathbf{y}(\hat{\theta}_1 = t_0) \simeq \mathbf{y}_0,$$

$$\mathbf{0} \simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_1 = t_0, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_1 = t_0), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_1 = t_0)),$$

$$\mathbf{0} \simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_{n+1} = T, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_{n+1} = T), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_{n+1} = T)).$$

It is worth noting that although $\hat{\theta}_{n+1} = T$ is used beside the shifted LGR points to approximate $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$ and $\mathbf{z} = \mathbf{z}(t)$, we do not use this point for the collocation process. Now, with the Kronecker property, we have

$$\frac{2}{T - t_0} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i d_{ij} \simeq \mathbf{f}(\hat{\theta}_j, \mathbf{c}_j, \mathbf{d}_j), \quad j = 1, \dots, n,$$

$$\mathbf{0} \simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_j, \mathbf{c}_j, \mathbf{d}_j), \quad j = 1, \dots, n,$$

in which

$$d_{ij} = \hat{\phi}_i'(\hat{\theta}_j), \quad i = 1, \dots, n+1, \quad j = 1, \dots, n,$$

is the (i, j) -th component of the $n \times 1$ by $n \times 1$ matrix $\mathbf{D}$, which is called the differentiation matrix. Furthermore, using the Kronecker property, we also have

$$\mathbf{y}(\hat{\theta}_1 = t_0) \simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_1) = \mathbf{c}_1,$$

$$\mathbf{y}(\hat{\theta}_{n+1} = T) \simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_{n+1}) = \mathbf{c}_{n+1},$$

$$\mathbf{z}(\hat{\theta}_{n+1} = T) \simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_{n+1}) = \mathbf{d}_{n+1},$$

and therefore,

$$\mathbf{c}_1 \simeq \mathbf{y}_0,$$

$$\mathbf{0} \simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_1 = t_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{d}_1),$$

$$\mathbf{0} \simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_{n+1} = T, \mathbf{c}_{n+1}, \mathbf{d}_{n+1}).$$

Finally, the system of nonlinear semi-explicit differential equations beside its initial and boundary conditions is discretized to the following system of nonlinear algebraic equations

$$\mathcal{F} \begin{pmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{c}_{n+1} \\ \mathbf{d}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{T - t_0} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i d_{i1} - \mathbf{f}(\hat{\theta}_1, \mathbf{c}_1, \mathbf{d}_1) \\ \vdots \\ \frac{2}{T - t_0} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i d_{in} - \mathbf{f}(\hat{\theta}_n, \mathbf{c}_n, \mathbf{d}_n) \\ \mathbf{g}(\hat{\theta}_1, \mathbf{c}_1, \mathbf{d}_1) \\ \vdots \\ \mathbf{g}(\hat{\theta}_n, \mathbf{c}_n, \mathbf{d}_n) \\ \mathbf{c}_1 - \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{g}(T, \mathbf{c}_{n+1}, \mathbf{d}_{n+1}) \end{pmatrix} = \mathbf{0},$$

in which, to make it easier to solve, we transform it into the following optimization problem

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \quad J = (\mathbf{c}_1 - \mathbf{y}_0)^2 + (\mathbf{g}(T, \mathbf{c}_{n+1}, \mathbf{d}_{n+1}))^2 \\ \text{S.t.} \quad \frac{2}{T - t_0} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i d_{i1} - \mathbf{f}(\hat{\theta}_1, \mathbf{c}_1, \mathbf{d}_1) = \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{g}(\hat{\theta}_n, \mathbf{c}_n, \mathbf{d}_n) = \mathbf{0} \end{array} \right.$$

After solving the optimization problem, the unknown parameters $\mathbf{c}_i, \mathbf{d}_i, i = 1, \dots, n+1$, are obtained, and solving the target system of nonlinear semi-explicit differential equations will be completed.

4- Conclusion

In this paper, a Radau pseudospectral method based on using the Legendre-Gauss-Radau points was applied, along with optimization techniques, for solving the system of differential-algebraic equations appearing in mechanical systems. Four illustrative benchmark examples were given to demonstrate the validity and applicability of the proposed method. Compared to the existing methods for solving this class of problems, it can be said that the proposed method has very good accuracy, and it can satisfy the algebraic equations appearing in the problem without the occurrence of the drift-off effects. Furthermore, using the optimization technique to solve the system of algebraic equations, resulting from the implementation of the method, makes it possible to implement the proposed method without any distress of finding a good initial guess for the unknown parameters.



ارائه یک روش عددی از مرتبه دقت بالا برای حل معادلات دیفرانسیل-جبری ظاهر شده در سیستم‌های مکانیکی*

مقاله پژوهشی

فائزه کلانتری^(۱) محمدعلی مهرپویا^(۲) نبی چگینی^(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.82824.1186

چکیده در حالی که مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی سیستم‌های مکانیکی به خوبی توسعه یافته، لکن حل عددی معادلات حاکم بر بسیاری از این مدل‌ها هنوز یک زمینه بزرگ در حال بررسی است. از آنجایی که در هر سیستم مکانیکی محدود، اتصالات اجسام متصل، حرکت نسبی خود را محدود می‌نمایند، لذا معادلات حاکم بر مدل، معمولاً دستگاهی از معادلات دیفرانسیل-جبری را تشکیل می‌دهند که هم معادلات دیفرانسیلی و هم معادلات جبری را شامل می‌شود. لازم به ذکر است که برخلاف حل تحلیلی و عددی معادلات دیفرانسیلی، رفتار تحلیلی و عددی معادلات دیفرانسیل-جبری پیچیده‌تر و کاملاً متفاوت از معادلات دیفرانسیلی است. در این مقاله، یک روش عددی از مرتبه دقت بالا جهت حل دستگاه معادلات دیفرانسیل-جبری ظاهر شده در سیستم‌های مکانیکی ارائه می‌گردد. روش ارائه شده مبتنی بر استفاده از یک روش شبه‌طیفی است به طوری که حل دستگاه معادلات دیفرانسیل-جبری حاکم بر مدل را به حل یک دستگاه از معادلات جبری تبدیل خواهد نمود و برای حل دستگاه جبری به دست آمده، از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده خواهد شد. در انتها برخی آزمایش‌های عددی روی چند مسئله معیارسنج انجام می‌گیرد تا دقت و کاربردی بودن روش نشان داده شود.

واژه‌های کلیدی سیستم‌های مکانیکی، معادلات دیفرانسیل-جبری، روش‌های عددی، روش شبه‌طیفی.

A High Accuracy Method for Solving the Differential-Algebraic Equations Arising in Mechanical Systems

Faezeh Kalantari

Mohammad Ali Mehrpouya

Nabi Chegini

Abstract While the kinematic and dynamic modeling of mechanical systems is well developed, the numerical solution of the governing equations of many of these models is still a large field under investigation. Since in any constrained mechanical system, the connections of the connected bodies restrict their relative movement, therefore the governing equations of the model usually form a system of differential-algebraic equations that includes both differential and algebraic equations. It should be noted that, unlike the analytical and numerical solution of differential equations, the analytical and numerical behavior of differential-algebraic equations is more complex and completely different from differential equations. In this paper, a high accuracy method for solving the system of differential-algebraic equations arising in mechanical systems is presented. The presented method is based on the use of a pseudospectral method that will transform the solution of the system of differential-algebraic equations into the solution of a system of algebraic equations. Then, an optimization technique is utilized to facilitate solving the obtained system of algebraic equations. At the end, some numerical experiments are performed on several benchmark problems to show the accuracy and applicability of the method.

Key Words Mechanical Systems, Differential-Algebraic Equations, Numerical Methods, Pseudospectral Method

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۳/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۲۱ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد ریاضی کاربردی، دانشکده ریاضی، دانشگاه تفرش.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده ریاضی، دانشگاه تفرش.

(۳) دانشیار، دانشکده ریاضی، دانشگاه تفرش.

مقدمه

معادلات دیفرانسیل یکی از ابزارهای مهم در مدل سازی ریاضی می باشد که بسیاری از قوانین طبیعت مانند قوانین موجود در فیزیک، شیمی، زیست شناسی و ستاره شناسی، طبیعی ترین بیان ریاضی خود را در زبان معادلات دیفرانسیلی می یابند. معادلات دیفرانسیل در هندسه و مکانیک نیز کاربرد زیادی دارند. به عنوان نمونه، حرکت جسم به وسیله سرعت و مکان آن در زمان های مختلف با استفاده از معادلات دیفرانسیلی توصیف می شود. معادلات دیفرانسیل- جبری نیز که در واقع مجموعه ای از معادلات دیفرانسیلی و معادلات جبری می باشند، کاربردهای زیادی در تجزیه و تحلیل مدارهای الکتریکی [1,2]، سیستم های مکانیکی [3]، سیستم های قدرت [4]، شبیه سازی فرایندهای شیمیایی [5] و مسایل کنترل بهینه [6] دارند. علاوه بر این، حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی با استفاده از روش خطوط (Method of Lines) و گسسته سازی مشتقات مکانی مثلاً با استفاده از روش های اجزا (Finite Element Method) یا تفاضلات متناهی (Finite Difference Method)، می تواند به معادلات دیفرانسیل- جبری منجر شود [3-7]. چنانچه اشاره گردید، یکی از کاربردهای وسیع معادلات دیفرانسیل- جبری در سیستم های مکانیکی است. امروزه سیستم های مکانیکی در بسیاری از کاربردها مانند دینامیک خودرو، هوانوردی، بیومکانیک و رباتیک مورد استفاده قرار می گیرند. به لحاظ دینامیکی، یک سیستم مکانیکی به سیستمی اطلاق می گردد که در آن تعدادی از نقاط جرمی و بدنه های صلب یا الاستیکی با محدودیت هایی از انواع مختلف مانند اتصالات، فنرها، دمپرها و محرک ها به یکدیگر متصل شده باشند. در این گونه از سیستم ها، معادلات حرکت معمولاً دستگاهی از معادلات دیفرانسیل- جبری غیرخطی را تشکیل می دهند. علاقه مندان به نحوه مدل سازی سیستم های مکانیکی به یک دستگاه از معادلات دیفرانسیل- جبری، می توانند به فصل چهارم از مرجع [3] مراجعه نمایند.

لازم به ذکر است که یک دستگاه از معادلات دیفرانسیل- جبری به کمک مفهومی تحت عنوان اندیس یا شاخص (Index) تعیین و شناخته می شود و این مفهوم نقش مهمی را در

تجزیه و تحلیل و طبقه بندی این مسایل به عهده دارد. در نحوه شکل گیری چنین مفهومی، دیده شده است که کلاس های معینی از معادلات دیفرانسیل- جبری در حل، مشکلات جزئی ایجاد می نمایند، در حالی که فائق آمدن بر مشکلات حل کلاس هایی دیگر از این معادلات، دشوارتر است. لذا طبقه بندی و کلاس بندی این معادلات با توجه به مشکلات ناشی از حل تحلیلی یا عددی آن ها امری ضروری بوده است. این طبقه بندی با معرفی تعاریف مختلف و متفاوتی از مفهومی تحت عنوان اندیس یا شاخص در کتب و مقالات به ثبت رسیده که در حقیقت معیاری از دشواری در حل معادلات دیفرانسیل- جبری را نشان می دهند. از مهم ترین نمونه های اندیس می توان به اندیس مشتق (Differentiation Index) [8]، اندیس آشفتگی (Perturbation Index) [9]، اندیس غریبگی (Strangeness Index) [10] و اندیس قابلیت کشش (Tractability Index) [11] اشاره کرد [12] که در این میان به کارگیری اندیس مشتق برای معادلات دیفرانسیل- جبری رایج تر می باشد. در این مقاله، ما نیز اندیس مشتق را در مسایل به کار گرفته ایم. تعداد دفعاتی که از یک معادله دیفرانسیل- جبری مشتق گرفته می شود تا به یک معادله دیفرانسیلی تبدیل گردد را، اندیس مشتق آن معادله دیفرانسیل- جبری می نامند. به طور معمول معادلات دیفرانسیل- جبری دارای اندیس های ۱، ۲، ۳ و بالاتر می باشند. در مرجع [13] اشاره شده است که حل معادلات دیفرانسیل- جبری دارای اندیس های بالاتر از یک، می تواند بسیار دشوار باشد. به دلیل پیچیدگی که عمدتاً به دلیل وجود معادلات جبری در حل معادلات دیفرانسیل- جبری به وجود می آید، همواره حل آن ها مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. از طرفی همانند معادلات دیفرانسیلی و معادلات جبری، حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل- جبری نیز به جز در موارد خاص امکان پذیر نیست. لذا نیاز به روش های عددی مناسب برای حل این گونه معادلات همواره احساس می شود. لازم به ذکر است که بیشتر روش های عددی موجود در حل معادلات دیفرانسیل- جبری مبتنی بر استفاده از روش هایی کلاسیک همچون روش اویلر پسرو (Backward Euler Method) [13]، روش مشتق گیری پسرو (Backward Differentiation Method)

(Radau Pseudospectral Method)، مبتنی بر استفاده از نقاط لژاندر-گائوس-رادائو (Legendre-Gauss-Radau) در فرایند هم‌مکانی، که در واقع به نوعی یک روش هم‌مکانی متعامد (Orthogonal Collocation Method) نیز محسوب می‌شود، جهت حل عددی این دسته از معادلات استفاده کنیم و برای حل دستگاه جبری نهایی به دست آمده از پیاده‌سازی این روش، از تجربیات به کارگیری تکنیک‌های بهینه‌سازی که در مرجع [24] به کار رفته است، بهره بگیریم.

این مقاله در چند بخش طراحی شده است: بخش ۲، به معرفی معادلات دیفرانسیل-جبری در کلی‌ترین و رایج‌ترین فرم خواهد پرداخت. در بخش ۳، به معرفی روش شبه‌طیفی رادائویی و نحوه عملکرد آن در گسسته‌سازی و در نهایت حل یک معادله دیفرانسیل-جبری می‌پردازیم. بخش ۴، اختصاص به پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی چند مسئله معیارسنج ظاهر شده در سیستم‌های مکانیکی و بیان مزایای روش پیشنهادی خواهد داشت.

بیان مسئله، معادلات دیفرانسیل-جبری در کلی‌ترین و رایج‌ترین حالت

کلی‌ترین شکل نمایش یک معادله دیفرانسیل-جبری، فرمی به صورت:

$$\mathbf{F}(t, \mathbf{y}, \mathbf{y}') = \mathbf{0}, \quad t \in [t_0, T] \quad (1)$$

می‌باشد که به آن یک فرم تمام ضمنی غیرخطی اطلاق شده و در آن $\mathbf{F}: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^p$ و $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}}$ ماتریسی منفرد (Singular) می‌باشد [13]. در این مقاله قصد داریم تا به بررسی معادلات دیفرانسیل-جبری در رایج‌ترین فرم نمایش آن که فرمی به صورت:

$$\begin{cases} \mathbf{y}' = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}, \mathbf{z}), \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(t, \mathbf{y}, \mathbf{z}), \end{cases} \quad t \in [t_0, T] \quad (2)$$

است و به آن یک فرم نیمه‌صریح غیر خطی اطلاق می‌گردد، بپردازیم. باید توجه داشت که در فرم نمایش (۲)

$$\mathbf{y}(t) = [y_1(t), \dots, y_p(t)]^T$$

$$\mathbf{z}(t) = [z_1(t), \dots, z_q(t)]^T$$

$$\mathbf{g}: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^q \quad \text{و} \quad \mathbf{f}: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^p$$

توابعی برداری و به طور پیوسته مشتق‌پذیر هستند. در ضمن

[14]، روش‌های رونگه-کوتا (Runge-Kutta Methods) [9,15]، روش تقریب پده (Pade Approximation Method) [16] و روش تجزیه آدومیان (Adomian Decomposition Method) [17] بوده و این روش‌ها همواره در معرض مشکلاتی از قبیل پدیده کاهش مرتبه (Order Reduction Phenomena)، اثرات رهاشدگی (Drift-off Effects) و ناپایداری می‌باشند [13].

در این مقاله به دنبال ارائه یک روش عددی از مرتبه دقت بالا برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیل-جبری ظاهر شده در سیستم‌های مکانیکی هستیم. روش پیشنهادی ما یک روش شبه‌طیفی از خانواده روش‌های طیفی است که دارای سابقه‌ی بسیار خوبی در حل عددی معادلات دیفرانسیلی می‌باشد [18-20]. لازم به ذکر است که چنانچه یک معادله دیفرانسیلی که مسئله و جواب آن هموار باشد را بخواهیم با دقت بالا روی یک دامنه ساده حل کنیم، در این صورت روش‌های شبه‌طیفی بهترین انتخاب خواهند بود [21]. برای دقت‌های پایین‌تر، این روش‌ها در مقایسه با روش‌های اجزا و تفاضلات متناهی از زمان و حافظه کمتری برای اجرا، برخوردار هستند. روش‌های شبه‌طیفی در یک تقسیم بندی دیگر به خانواده‌ی روش‌های هم‌مکانی (Collocation Methods) نیز تعلق دارند که خانواده‌ای بزرگ از روش‌های حل عددی برای معادلات دیفرانسیلی، معادلات انتگرالی و سایر معادلات محسوب می‌گردند. متأسفانه دامنه ورود روش‌های شبه‌طیفی به حل عددی معادلات دیفرانسیل-جبری به گستردگی دامنه ورود این روش‌ها به حل عددی سایر معادلات نیست و می‌توان در این زمینه به پژوهش‌هایی اندک از محققانی همچون قنبری و قریشی [12]، حسینی [22] و بابلیان و حسینی [23] اشاره نمود که در همه این تحقیقات معادله دیفرانسیل-جبری به صورت خطی در نظر گرفته شده است. یک دلیل مهم برای این امر، دشواری حل دستگاه معادلات جبری نهایی حاصل از پیاده‌سازی روش‌های شبه‌طیفی در حل معادلات دیفرانسیل-جبری بوده که به دلیل وجود معادلات جبری ظاهر شده در معادلات دیفرانسیل-جبری ایجاد می‌گردد.

در این مقاله قصد داریم تا از یک روش شبه‌طیفی رادائویی

شرایط اولیه و مرزی به صورت:

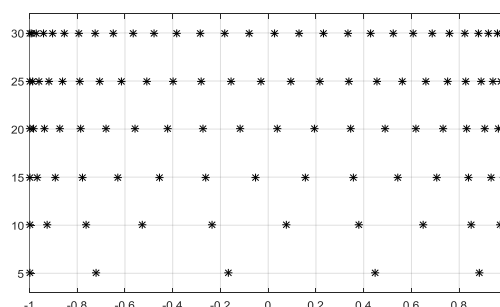
$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t_0) &= \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(t_0, \mathbf{y}(t_0), \mathbf{z}(t_0)) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(T, \mathbf{y}(T), \mathbf{z}(T)) \end{aligned} \quad (3)$$

در کنار دستگاه معادلات دیفرانسیل-جبری (۲) قرار خواهند گرفت. همچنین متغیرها یا به عبارتی توابع $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$ و $\mathbf{z} = \mathbf{z}(t)$ به ترتیب توابع دیفرانسیلی و توابع جبری و معادلات $\mathbf{y}' = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ و $\mathbf{0} = \mathbf{g}(t, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ به ترتیب معادلات دیفرانسیلی و معادلات جبری مسئله (۲) محسوب می‌شوند.

معرفی روش شبه‌طیفی رادائویی

برای طرح روش پیشنهادی، اولین گام معرفی مجموعه‌ای از نقاط، تحت عنوان نقاط لژاندر-گوس-رادائویی است که نقشی اساسی در شکل‌گیری روش را داشته و برای درک بهتر از آن‌ها، در شکل (۱) نحوه توزیعشان به ازای M های مختلف به تصویر کشیده شده است. این نقاط در واقع صفرها یا همان ریشه‌های توابع لژاندر $\{P_{M-1}(t) + P_M(t)\}$ بوده و همان گونه که در شکل پیداست، توزیعشان در بازه $[-1, +1]$ می‌باشد. در روش شبه‌طیفی رادائویی از این نقاط هم در گسسته‌سازی مسئله و هم در فرایند هم‌مکانی استفاده خواهیم کرد. لازم به ذکر است که توابع یا همان چندجمله‌ای‌های لژاندر، چندجمله‌ای‌هایی متعامد با انبوهی از خواص و کاربردهای مختلف در ریاضیات و علوم مهندسی می‌باشند که به کمک روابط بازگشتی و به صورت زیر قابل تولید هستند:

$$P_{M+1}(x) = \frac{2M+1}{M+1} x P_M(x) - \frac{M}{M+1} P_{M-1}(x), \quad M=1, 2, \dots$$



شکل ۱ نمایش توزیع نقاط لژاندر-گوس-رادائویی

برای این کار فرض کنیم شامل n نقطه‌ی لژاندر-گوس-رادائویی انتقال داده شده به بازه $[t_0, T]$ باشد (در واقع θ_i ها همان نقاط لژاندر-گوس-لوباتو در بازه $[-1, +1]$ و $\hat{\theta}_i$ ها نقاط انتقال داده شده به بازه $[t_0, T]$ هستند). با افزودن نقطه $\hat{\theta}_{n+1} = T$ به این مجموعه، به یک مجموعه شامل $n+1$ نقطه $\{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_{n+1} = T\}$ می‌رسیم که از این مجموعه نقاط برای تقریب $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$ و $\mathbf{z} = \mathbf{z}(t)$ استفاده خواهد شد. به این منظور و برای تقریب k -امین درایه‌ی $\mathbf{y}(t)$ و $\mathbf{z}(t)$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} y_k(t) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} c_{k,i} \hat{\phi}_i(t), \quad k=1, \dots, p \\ z_k(t) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} d_{k,i} \hat{\phi}_i(t), \quad k=1, \dots, q \end{aligned}$$

که در آن:

$$\hat{\phi}_i(t) = \phi_i\left(\frac{2}{T-t_0}t - \frac{T+t_0}{T-t_0}\right)$$

چندجمله‌ای‌های لاگرانژ مبتنی بر این $n+1$ نقطه انتقال داده شده می‌باشند. لازم به ذکر است که چندجمله‌ای‌های لاگرانژ گذرنده از $n+1$ نقطه $\{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_{n+1} = T\}$ ، چند جمله‌ای‌هایی به صورت کلی:

$$\phi_i(t) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} \frac{t - \theta_j}{\theta_i - \theta_j}$$

بوده که دارای خاصیتی تحت عنوان خاصیت دلتای کرونکر (Kronecker Property) هستند. یعنی به عبارت دیگر:

$$\phi_i(\theta_j) = \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

پس در حالت کلی می‌توان نوشت:

$$\mathbf{y}(t) \simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(t) \quad (5)$$

$$\mathbf{z}(t) \simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(t)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_i &= \mathbf{y}(\hat{\theta}_i) = [y_1(\hat{\theta}_i), \dots, y_{N_y}(\hat{\theta}_i)]^T \\ \mathbf{d}_i &= \mathbf{z}(\hat{\theta}_i) = [z_1(\hat{\theta}_i), \dots, z_{N_z}(\hat{\theta}_i)]^T \end{aligned}$$

ضرایب مجهول می‌باشند. اکنون با تقریب $\mathbf{y}'$ به صورت:

$$\mathbf{y}'(t) \simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}'_i(t)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(\hat{\theta}_1 = t_0) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_1) = \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{y}(\hat{\theta}_{n+1} = T) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_{n+1}) = \mathbf{c}_{n+1} \\ \mathbf{z}(\hat{\theta}_{n+1} = T) &\simeq \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_{n+1}) = \mathbf{d}_{n+1} \end{aligned}$$

و لذا شرایط اولیه و مرزی (۳) تبدیل به شرایط زیر خواهند شد:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_1 &\simeq \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{0} &\simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_1 = t_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{d}_1) \\ \mathbf{0} &\simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_{n+1} = T, \mathbf{c}_{n+1}, \mathbf{d}_{n+1}) \end{aligned}$$

و در نهایت، مسئله (۲) به همراه شرایط اولیه و مرزی (۳) به یک دستگاه از معادلات جبری غیر خطی به صورت زیر گسسته خواهد گردید:

$$\mathcal{F} \begin{pmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{c}_{n+1} \\ \mathbf{d}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{T-t_0} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i d_{i1} - \mathbf{f}(\hat{\theta}_1, \mathbf{c}_1, \mathbf{d}_1) \\ \vdots \\ \frac{2}{T-t_0} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i d_{in} - \mathbf{f}(\hat{\theta}_n, \mathbf{c}_n, \mathbf{d}_n) \\ \mathbf{g}(\hat{\theta}_1, \mathbf{c}_1, \mathbf{d}_1) \\ \vdots \\ \mathbf{g}(\hat{\theta}_n, \mathbf{c}_n, \mathbf{d}_n) \\ \mathbf{c}_1 - \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{g}(T, \mathbf{c}_{n+1}, \mathbf{d}_{n+1}) \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (7)$$

که پس از حل آن، مجهولات $\mathbf{c}_i, \mathbf{d}_i, i=1, \dots, n+1$ به دست آمده و یک تقریب برای جواب مسئله (۲) به دست خواهد آمد. متأسفانه، حل عددی دستگاه معادلات جبری (۷) بدون داشتن مقادیر اولیه (حدس اولیه (Initial Guess)) دقیق برای پارامترهای مجهول، امکان‌پذیر نخواهد بود، یا در صورت امکان، هم‌گرایی به سختی حاصل خواهد شد. لذا، برای به دست آوردن یک حدس اولیه مناسب جهت هم‌گرایی روش حل دستگاه معادلات جبری به دست آمده، باید از تکنیک دیگری استفاده گردد که در بخش بعد به آن خواهیم پرداخت.

و سپس جای‌گذاری روابط به دست آمده در مسئله (۲) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}'_i(t) \simeq \mathbf{f}(t, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(t), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(t)), \mathbf{y}(t_0) = \mathbf{y}_0 \\ 0 \simeq \mathbf{g}(t, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(t), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(t)), \end{cases}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (6)$$

تنها کاری که باقی مانده، گسسته‌سازی دستگاه معادلات (۶) می‌باشد که این کار به کمک فرایند هم‌مکان کردن طرفین معادلات در نقاط لژاندر-گائوس-رادائویی انجام خواهد گرفت. بدین منظور و در نهایت با پیاده‌سازی فرایند هم‌مکانی، آن هم فقط در نقاط لژاندر-گائوس-رادائویی $\hat{\theta}_j, j=1, \dots, n$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}'_i(\hat{\theta}_j) &\simeq \mathbf{f}(\hat{\theta}_j, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_j), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_j)), \quad j=1, \dots, n \\ 0 &\simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_j, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_j), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_j)), \quad j=1, \dots, n \end{aligned}$$

همچنین برای شرایط اولیه و مرزی (۳) داریم:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(\hat{\theta}_1 = t_0) &\simeq \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{0} &\simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_1 = t_0, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_1 = t_0), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_1 = t_0)) \\ \mathbf{0} &\simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_{n+1} = T, \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_{n+1} = T), \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{d}_i \hat{\phi}_i(\hat{\theta}_{n+1} = T)) \end{aligned}$$

لازم به ذکر است که در روش پیشنهادی، علی‌رغم استفاده از نقطه $\hat{\theta}_{n+1} = T$ در کنار سایر نقاط لژاندر-گائوس-رادائویی به منظور تقریب $\mathbf{y}(t)$ و $\mathbf{z}(t)$ ، از این نقطه در فرایند هم‌مکانی استفاده نمی‌شود و این نکته به کار رفته در روش پیشنهادی ما می‌باشد. اکنون به کمک خاصیت دلتای کرونکر (۴) داریم:

$$\begin{aligned} \frac{2}{T-t_0} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i d_{ij} &\simeq \mathbf{f}(\hat{\theta}_j, \mathbf{c}_j, \mathbf{d}_j), \quad j=1, \dots, n \\ \mathbf{0} &\simeq \mathbf{g}(\hat{\theta}_j, \mathbf{c}_j, \mathbf{d}_j), \quad j=1, \dots, n \end{aligned}$$

که در آن

$$d_{ij} = \hat{\phi}'_i(\hat{\theta}_j), \quad i=1, \dots, n+1, \quad j=1, \dots, n$$

$\mathbf{D}(i, j)$ -امین درایه از ماتریس $(n+1) \times (n+1)$ می‌باشد که به عنوان ماتریس مشتق (Differentiation Matrix) شناخته می‌شود. همچنین مجدداً با استفاده از خاصیت دلتای کرونکر (۴) خواهیم داشت:

انتخاب حدس اولیه مناسب به کمک تکنیک‌های بهینه‌سازی

مجدداً به دستگاه معادلات جبری به دست آمده از پیاده‌سازی روش شبه‌طیفی رادائویی بازمی‌گردیم. لازم به ذکر است که، هم‌گرا شدن در روش‌های ریشه‌یابی مانند روش‌های شبه‌نیوتن (Quasi-Newton Methods) یا نیوتنی در حل عددی دستگاه معادلات جبری (۷)، بدون داشتن مقدار اولیه خیلی دقیق برای پارامترهای مجهول، یا امکان‌پذیر نیست یا با کندی بسیار توأم خواهد بود. لذا برای رفع این مشکل، از یک تکنیک مبتنی بر بهینه‌سازی استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است که امروزه استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته بهینه‌سازی در حل بسیاری از مدل‌های حاکم بر سیستم‌های مکانیکی رواج پیدا کرده است [25-27]. لذا ما نیز در اینجا با در نظر گرفتن مجموع مربعات معادلات شرایط اولیه و مرزی گسسته شده در فرایند پیاده‌سازی روش پیشنهادی به عنوان تابع هدف و همچنین معادلات هم‌مکانی به دست آمده از پیاده‌سازی روش به عنوان قیود مسئله بهینه‌سازی، دستگاه معادلات جبری (۷) را به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی و به صورت:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } J = (\mathbf{c}_1 - \mathbf{y}_0)^2 + (\mathbf{g}(T, \mathbf{c}_{n+1}, \mathbf{d}_{n+1}))^2 \\ \text{S.t.} \\ \frac{2}{T - t_0} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{c}_i d_{i1} - \mathbf{f}(\hat{\theta}_1, \mathbf{c}_1, \mathbf{d}_1) = 0 \\ \vdots \\ \mathbf{g}(\hat{\theta}_n, \mathbf{c}_n, \mathbf{d}_n) = 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

در نظر می‌گیریم. به بیان دیگر، حل دستگاه معادلات جبری (۷) را به حل مسئله بهینه‌سازی (۸) تبدیل می‌نماییم. از آنجایی که، حل مسئله بهینه‌سازی (۸) که توسط الگوریتم‌های پیشرفته بهینه‌سازی انجام می‌پذیرد، به حدس اولیه حساسیت کمتری دارد، لذا حل آن به مراتب از حل دستگاه معادلات جبری به دست آمده از پیاده‌سازی روش پیشنهادی به کمک روش‌های ریشه‌یابی حساس به حدس اولیه ساده‌تر خواهد بود. لذا در نهایت، از حل مسئله بهینه‌سازی (۸) یک حدس اولیه مناسب برای پارامترهای مجهول پیدا شده و لذا حل دستگاه معادلات جبری (۷) امکان‌پذیر خواهد شد.

توجه شود که تمام پیاده‌سازی‌های انجام شده در این مقاله در محیط نرم‌افزاری Matlab و به کمک یک لب‌تاپ پنج هسته‌ای با 2.53 GHz CPU و یک سیستم 64-bit می‌باشد. در ضمن برای حل عددی دستگاه معادلات جبری (۷) به دست آمده از پیاده‌سازی روش شبه‌طیفی پیشنهادی از تابع fsolve در نرم‌افزار Matlab استفاده شده است و به منظور تأمین دقت مطلوب در این تابع، دو پارامتر تنظیمی آن یعنی TolFun و TolX روی 10^{-14} قرار داده شده. همچنین برای تأمین حدس اولیه مناسب برای این تابع، از حل مسئله بهینه‌سازی (۸)، به کمک تابع fmincon و با بهره‌گیری از الگوریتم نقطه درونی (Interior-Point Algorithm) آن استفاده نموده و پارامترهای تنظیمی این تابع یعنی TolFun، TolCon و TolX را نیز روی 10^{-14} تنظیم می‌نماییم.

مثال‌های عددی

در این بخش چهار مثال عددی ارائه خواهد گردید. این مثال‌ها در حقیقت دستگاه‌هایی از معادلات دیفرانسیل-جبری با اندیس‌های ۱، ۲، ۳ و بالاتر از ۳ می‌باشند که جهت نشان دادن دقت و کاربردی بودن روش پیشنهادی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

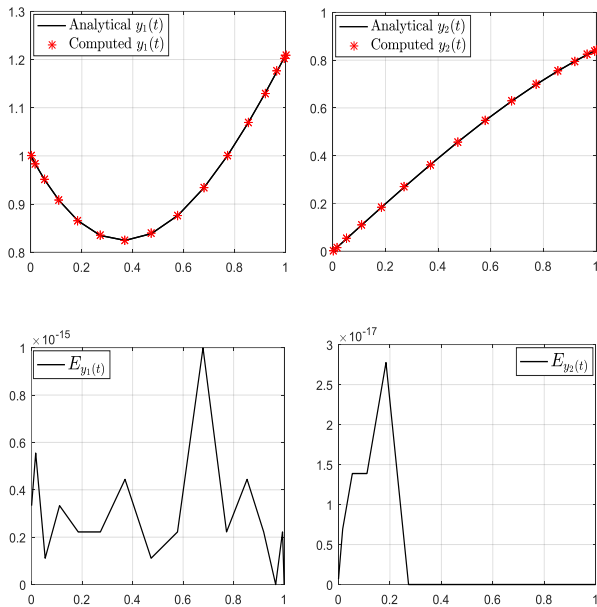
مثال ۱: معادله دیفرانسیل-جبری با اندیس ۱. فرض کنیم معادلات حرکت در یک سیستم مکانیکی به صورت:

$$\begin{aligned} y_1'(t) &= t \cos(t) - y_1(t) + (1+t)y_2(t), \quad 0 \leq t \leq 1 \\ y_2(t) - \sin(t) &= 0 \end{aligned}$$

و شرایط اولیه نیز به صورت $\mathbf{y}(0) = [y_1(0), y_2(0)]^T = [1, 0]^T$ باشد [28]. واضح است که شرط مرزی به صورت $y_2(1) = \sin(1)$ نیز در کنار شرایط اولیه این مسئله قرار خواهد گرفت. این مسئله دارای جوابی تحلیلی به صورت زیر می‌باشد:

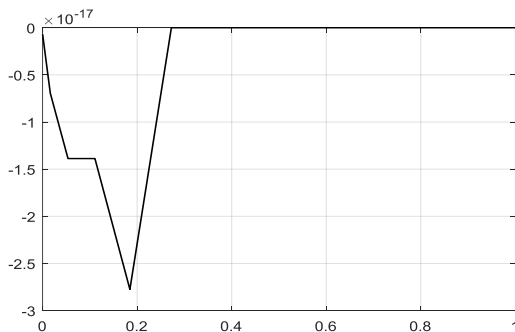
$$\begin{bmatrix} y_1^*(t) \\ y_2^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-t} + t \sin(t) \\ \sin(t) \end{bmatrix}$$

اکنون به کمک روش پیشنهادی برای حل تقریبی این مسئله دست به کار می‌شویم. جواب‌های تقریبی، تحلیلی و تابع خط



شکل ۲ نمودار توابع جواب تحلیلی، تقریبی و خطای بدست آمده از روش

پیشنهادی در مثال ۱



شکل ۳ نمودار تقریبی تابع $y_2(t) - \sin(t)$ به کار رفته در سمت چپ

معادله جبری مسئله، به دست آمده از روش پیشنهادی در مثال ۱

جدول ۱ مقایسه مقادیر به دست آمده برای $y_1(t)$ از روش پیشنهادی با $n=15$ نقطه گسسته‌سازی با دو روش مشتق‌گیری پسرو و تقریب پده به کار رفته در

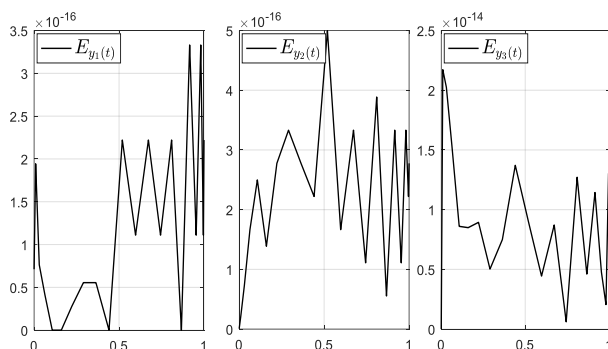
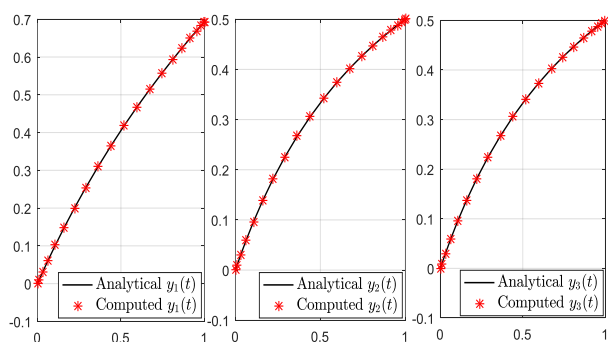
[28] در معادله دیفرانسیل- جبری با اندیس ۱ در مثال ۱

t	جواب تحلیلی	روش تقریب پده	خطا	روش مشتق‌گیری پسرو	خطا	روش پیشنهادی	خطا
0	1.0000	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	$3.3e-16$
0.1	0.9148	0.9148	$2.7e-06$	0.9148	$2.2e-07$	0.9148	$5.3e-16$
0.2	0.8585	0.8585	$2.0e-05$	0.8585	$3.9e-07$	0.8585	$4.9e-17$
0.3	0.8295	0.8295	$6.7e-05$	0.8295	$5.3e-07$	0.8295	$2.9e-16$
0.4	0.8261	0.8262	$1.6e-04$	0.8261	$6.3e-07$	0.8261	$3.3e-16$
0.5	0.8462	0.8466	$3.2e-04$	0.8462	$6.9e-07$	0.8462	$2.2e-16$
0.6	0.8876	0.8882	$5.8e-04$	0.8876	$1.3e-05$	0.8876	$3.9e-16$
0.7	0.9475	0.9485	$1.0e-03$	0.9475	$8.5e-05$	0.9475	$8.9e-16$
0.8	1.0232	1.0249	$1.7e-03$	1.0232	$2.3e-05$	1.0232	$1.1e-16$
0.9	1.1116	1.1143	$2.7e-03$	1.1121	$5.8e-04$	1.1116	$3.3e-16$
1	1.2094	1.2094	$4.2e-03$	1.2117	$2.3e-03$	1.2094	0

به ازای $n=15$ نقطه گسسته‌سازی شده، در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. همچنین برای مشاهده این موضوع که روش تا چه اندازه موفق به برقراری معادله جبری موجود در مسئله شده است، تقریبی از تابع $y_2(t) - \sin(t)$ را نیز روی بازه $[0,1]$ رسم می‌نماییم. نتیجه در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است که خود گویای دقت بالای روش پیشنهادی می‌باشد. به علاوه اثر ره‌اشدگی که یکی از مشکلات روش‌های کلاسیک در حل معادلات دیفرانسیل- جبری و مربوط به برقرار نشدن مطلوب معادلات جبری توسط روش عددی حل کننده مسئله می‌باشد، در روش پیشنهادی رخ نخواهد داد و معادله جبری همان گونه که در شکل (۳) پیداست، به نحو بسیار مطلوبی برقرار خواهد گشت. همچنین، برای مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های به کار رفته دیگر، مقادیر توابع جواب $y_1(t)$ و $y_2(t)$ حاصل از روش پیشنهادی و به ازای $n = 15$ نقطه گسسته‌سازی در مجموعه‌ای از نقاط گسسته شده در بازه $[0,1]$ ، در جداول (۱) و (۲) به همراه نتایج به دست آمده از دو روش مشتق‌گیری پسرو و روش تقریب پده به کار رفته در [28]، آمده است. همان گونه که مشخص است، دقت روش پیشنهادی نسبت به دو روش به کار رفته در [28] بسیار بالاتر است. در ضمن روش پیشنهادی با استفاده از نقاط بسیار کم در گسسته‌سازی موفق به رسیدن به دقت ماشین (Machine Accuracy) شده است که نشان از قدرت حل بالای این روش دارد.

جدول ۲ مقایسه مقادیر به دست آمده برای $y_2(t)$ از روش پیشنهادی با $n=15$ نقطه گسسته‌سازی با دو روش مشتق‌گیری پسرو و تقریب پده به کار رفته در [28] در معادله دیفرانسیل-جبری با اندیس ۱ در مثال ۱

t	جواب تحلیلی	روش تقریب پده	خطا	روش مشتق‌گیری پسرو	خطا	روش پیشنهادی	خطا
0	0	0	0	0	0	0	$2.2e-16$
0.1	0.0998	0.0998	$2.0e-11$	0.0998	$3.5e-09$	0.0998	$4.2e-17$
0.2	0.1987	0.1987	$2.5e-09$	0.1987	$6.9e-09$	0.1987	$1.1e-16$
0.3	0.2955	0.2955	$4.3e-08$	0.2955	$1.0e-08$	0.2955	0
0.4	0.3894	0.3894	$3.2e-07$	0.3894	$1.4e-08$	0.3894	0
0.5	0.4794	0.4794	$1.5e-06$	0.4794	$1.7e-08$	0.4794	$5.6e-17$
0.6	0.5646	0.5646	$5.5e-06$	0.5646	$3.9e-05$	0.5646	0
0.7	0.6442	0.6442	$1.6e-05$	0.6440	$2.0e-04$	0.6442	$1.1e-16$
0.8	0.7174	0.7174	$4.1e-05$	0.7177	$3.0e-04$	0.7174	$1.1e-16$
0.9	0.7833	0.7834	$9.4e-05$	0.7855	$2.2e-03$	0.7833	$1.1e-16$
1	0.8415	0.8417	$2.0e-04$	0.8467	$5.2e-03$	0.8415	0



شکل ۴ نمودار توابع جواب تحلیلی، تقریبی و خطای به دست آمده از روش پیشنهادی در مثال ۲

همچنین برای مشاهده این موضوع که روش تا چه اندازه موفق به برقراری معادله جبری موجود در مسئله شده است، تقریبی از تابع $(y_1(t) + ty_2(t) - \ln(1+t) - \frac{t^2}{1+t})$ را نیز روی بازه $[0,1]$ رسم می‌کنیم. نتیجه در شکل (۵) به تصویر کشیده شده است که خود گویای دقت بالای روش پیشنهادی می‌باشد.

مثال ۲: معادله دیفرانسیل-جبری با اندیس ۲. فرض کنیم معادلات حرکت در یک سیستم مکانیکی به صورت:

$$y_1'(t) = ty_2^2(t) + y_3(t) + \frac{1-t^2-t^3}{(1+t)^2}, \quad 0 \leq t \leq 1$$

$$y_2'(t) = te^{y_1(t)} + ty_3(t) + \frac{1-t-4t^2-4t^3-t^4}{(1+t)^2}$$

$$y_1(t) + ty_2(t) - \ln(1+t) - \frac{t^2}{1+t} = 0$$

شرایط اولیه نیز به صورت:

$$\mathbf{y}(0) = [y_1(0), y_2(0), y_3(0)]^T = [0, 0, 0]^T$$

باشد [29]. واضح است که شرط مرزی به صورت $y_1(1) + y_2(1) = \ln(2) + \frac{1}{2}$ نیز در کنار شرایط اولیه این مسئله قرار خواهد گرفت. این مسئله دارای جوابی تحلیلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} y_1^*(t) \\ y_2^*(t) \\ y_3^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln(1+t) \\ \frac{t}{1+t} \\ \frac{t}{1+t} \end{bmatrix}$$

اکنون به کمک روش پیشنهادی برای حل عددی این مسئله اقدام می‌نماییم. جواب‌های تقریبی، تحلیلی و تابع خطا به ازای $n=20$ نقطه گسسته‌سازی شده، در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

مثال ۳: معادله دیفرانسیل- جبری با اندیس ۳. فرض کنیم معادلات حرکت در یک سیستم مکانیکی به صورت:

$$\dot{y}_1(t) = y_2(t), \quad 0 \leq t \leq 1$$

$$\dot{y}_2(t) = y_3(t)$$

$$y_1(t) - e^{-t} = 0$$

و شرایط اولیه نیز به صورت:

$$\mathbf{y}(0) = [y_1(0), y_2(0), y_3(0)]^T = [1, -1, 1]^T$$

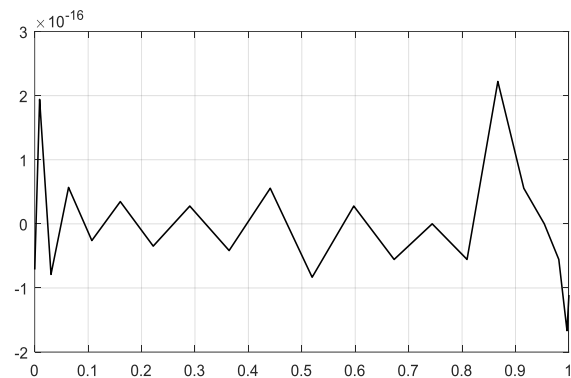
باشد [30]. واضح است که شرط مرزی به صورت $y_1(1) - e^{-1} = 0$ نیز در کنار شرایط اولیه این مسئله قرار خواهد گرفت. این مسئله دارای جوابی تحلیلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} y_1^*(t) \\ y_2^*(t) \\ y_3^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-t} \\ -e^{-t} \\ e^{-t} \end{bmatrix}$$

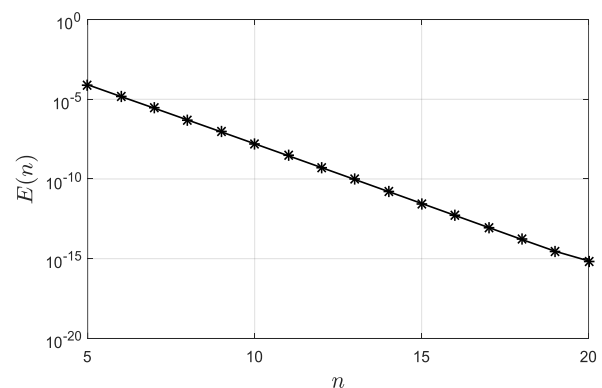
اکنون به کمک روش پیشنهادی برای حل عددی این مسئله اقدام می‌نماییم. جواب‌های تقریبی، تحلیلی و تابع خطا به ازای $n=15$ نقطه گسسته‌سازی شده، در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. همچنین برای مشاهده این موضوع که روش تا چه اندازه موفق به برقراری معادله جبری موجود در مسئله شده است، تقریبی از تابع $y_1(t) - e^{-t}$ را نیز روی بازه $[0,1]$ رسم می‌نماییم. نتیجه در شکل (۸) به تصویر کشیده شده است که خود گویای دقت بالای روش پیشنهادی می‌باشد. به علاوه اثر رهاشدگی که یکی از مشکلات روش‌های کلاسیک در حل معادلات دیفرانسیل- جبری می‌باشد، در روش پیشنهادی رخ نخواهد داد و معادله جبری همان گونه که در شکل (۸) پیداست، به نحو بسیار مطلوبی برقرار خواهد گشت.

همچنین برای آگاهی یافتن از نرخ هم‌گرایی روش، مقدار خطای ایجاد شده در روش را به ازای n های مختلف رسم می‌نماییم. نتیجه در شکل (۹) آمده است. همان گونه که از این شکل پیداست، با افزایش n ، میزان خطا با شیب زیادی کاهش می‌یابد و این بدان معناست که نرخ هم‌گرایی روش شبه‌طیفی رادائویی برای حل معادلات دیفرانسیل- جبری بالاست.

به علاوه اثر رهاشدگی که یکی از مشکلات روش‌های کلاسیک در حل معادلات دیفرانسیل- جبری می‌باشد، در روش پیشنهادی رخ نخواهد داد و معادله جبری همان گونه که در شکل (۵) پیداست، به نحو بسیار مطلوبی برقرار خواهد گشت. همچنین برای آگاهی یافتن از نرخ هم‌گرایی روش، مقدار خطای ایجاد شده در روش را به ازای n های مختلف رسم می‌نماییم. نتیجه در شکل (۶) آمده است. همان گونه که از این شکل پیداست، با افزایش n ، میزان خطا با شیب مطلوبی کاهش خواهد یافت و البته چنین انتظاری را با توجه به این که روش پیشنهادی روشی متعلق به خانواده روش‌های طیفی است، از قبل متصور بودیم.



شکل ۵: نمودار تقریبی تابع $(y_1(t) + ty_2(t) - \ln(1+t) - \frac{t^2}{1+t})$ به کار رفته در سمت چپ معادله جبری مسئله، به دست آمده از روش پیشنهادی در مثال ۲



شکل ۶: نمودار مقدار خطای تابع y_1 به ازای n های مختلف در روش پیشنهادی مربوط به معادله دیفرانسیل- جبری با اندیس ۲ در مثال ۲

$$\begin{aligned}
\dot{y}_1(t) &= y_4(t), & 0 \leq t \leq 1.5 \\
\dot{y}_2(t) &= y_5(t) \\
\dot{y}_3(t) &= y_6(t) \\
\dot{y}_4(t) &= -2y_2(t) + ty_{12}(t) - \frac{y_{12}(t)y_{10}(t)}{y_3(t)} - y_{12}(t)y_9(t) \\
\dot{y}_5(t) &= 2y_4(t) + y_2(t) + y_{11}(t) - 2y_2(t)y_{13}(t) \\
\dot{y}_6(t) &= y_7(t) + y_8(t)y_3(t) + \frac{y_{12}(t)y_9(t)y_{10}(t)}{y_3(t)} \\
&\quad + y_{12}(t)y_9(t) - 2y_3(t)y_{13}(t) \\
\dot{y}_7(t) &= 2y_2(t) \\
\dot{y}_8(t) &= -2y_9(t) - 2 \\
y_{11}(t) + 2y_3(t) &= 0 \\
y_9(t)y_3(t) - y_1(t) &= 0 \\
y_1(t) - y_{10}(t) - y_3(t) &= 0 \\
y_9(t)y_{10}(t) - ty_1(t) &= 0 \\
y_2^2(t) + y_3^2(t) - 1 &= 0
\end{aligned}$$

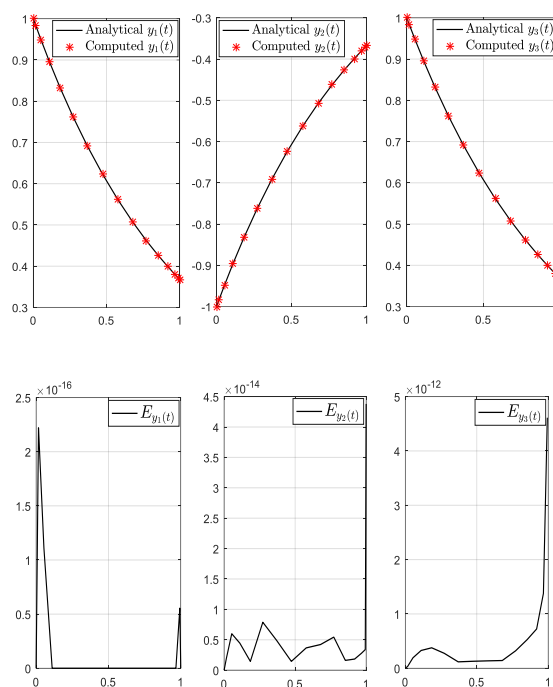
و شرایط اولیه نیز به صورت:

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}(0) &= [y_1(0), y_2(0), y_3(0), y_4(0), y_5(0), y_6(0), y_7(0), y_8(0)]^T \\
&= [1, 0, 1, 1, 1, 0, -2, 0]^T
\end{aligned}$$

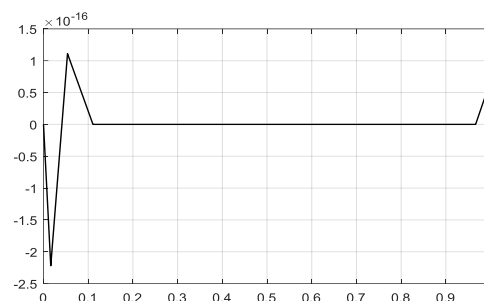
باشند [3]. این مسئله دارای جوابی تحلیلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}
y_1^*(t) &= \cos(t)(1+t) \\
y_2^*(t) &= -y_6^*(t) = \sin(t) \\
y_3^*(t) &= y_5^*(t) = -\frac{1}{2}y_7^*(t) = -\frac{1}{2}y_{11}^*(t) = y_{12}^*(t) = \cos(t) \\
y_4^*(t) &= -\sin(t)(1+t) + \cos(t) \\
y_8^*(t) &= -4t - t^2 \\
y_9^*(t) &= 1+t \\
y_{10}^*(t) &= t \cos(t) \\
y_{13}^*(t) &= -t
\end{aligned}$$

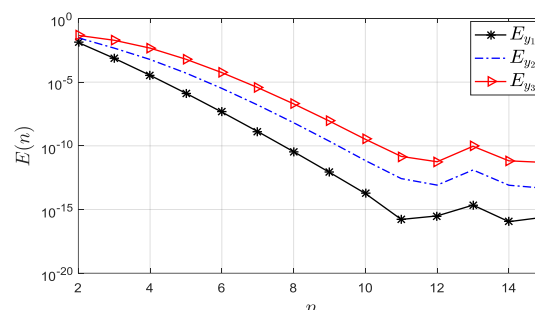
اکنون قصد داریم تا به کمک روش پیشنهادی به حل این مسئله بپردازیم. در شکل (۱۰)، جواب‌های تقریبی، تحلیلی و توابع خطا برای به طور مثال توابع $y_1(t)$ ، $y_4(t)$ ، $y_8(t)$ و $y_{10}(t)$ به ازای $n = 15$ روی بازه $[0, 1.5]$ نشان داده شده‌اند. همچنین برای مشاهده این موضوع که روش تا چه اندازه موفق به برقراری معادلات جبری موجود در مسئله شده است، طرف‌های چپ موجود در پنج معادله جبری ظاهر شده در این مسئله را نیز به صورت تقریبی روی بازه $[0, 1.5]$ رسم می‌نماییم. نتایج در شکل (۱۱) قابل مشاهده است، که خود گویای دقت بالای روش پیشنهادی می‌باشد. همچنین اثر رهاشدگی که یکی از مشکلات روش‌های کلاسیک در حل معادلات دیفرانسیل-



شکل ۷ نمودار توابع جواب تحلیلی، تقریبی و خطای به دست آمده از روش پیشنهادی در مثال ۳



شکل ۸ نمودار تقریبی تابع $y_1(t) - e^{-t}$ به کار رفته در سمت چپ معادله جبری مسئله، به دست آمده از روش پیشنهادی در مثال ۳

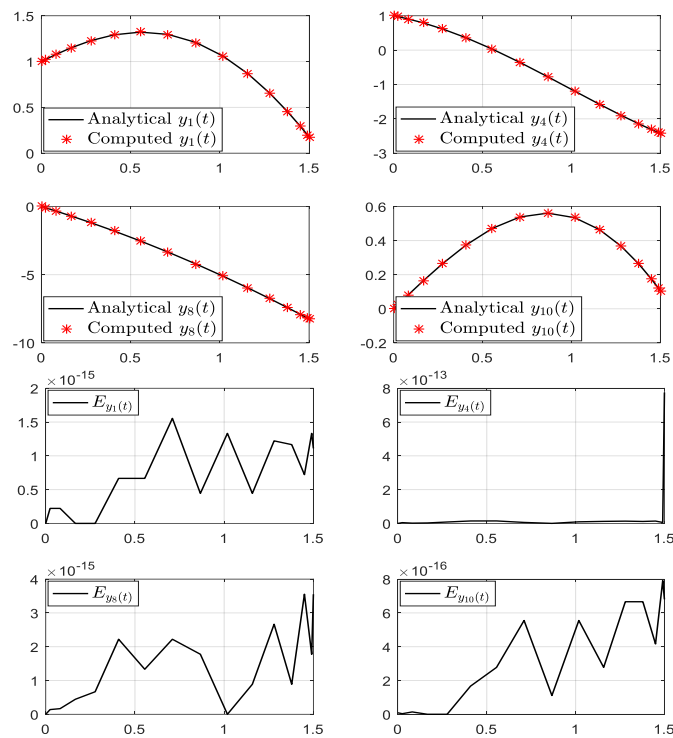


شکل ۹ نمودار مقدار خطای توابع جواب به ازای nهای مختلف در روش پیشنهادی مربوط به معادله دیفرانسیل-جبری با اندیس ۳ در مثال ۳

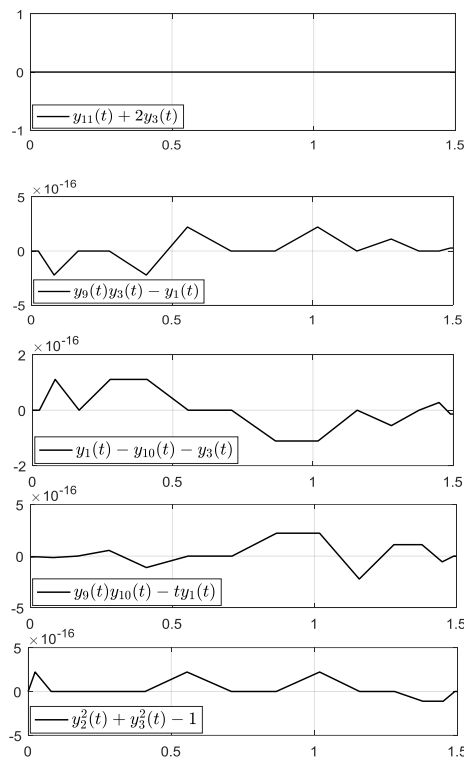
مثال ۴: معادله دیفرانسیل-جبری با اندیس بالا. فرض کنیم معادلات حرکت در یک سیستم مکانیکی به صورت:

مطلوبی برقرار خواهند گشت.

جبری می‌باشد، در روش پیشنهادی رخ نخواهد داد و معادلات جبری همان گونه که در شکل (۱۱) پیداست، به نحو بسیار



شکل ۱۰ نمودار توابع جواب تحلیلی، تقریبی و خطای به دست آمده از روش پیشنهادی در مثال ۴



شکل ۱۱ نمودار تقریبی از توابع به کار رفته در سمت چپ معادلات جبری مسئله، به دست آمده از روش پیشنهادی در مثال ۴

نتیجه گیری	روش خطوط	Method of Lines
در این مقاله از یک روش شبه طیفی رادائویی، مبتنی بر استفاده از نقاط لژاندر-گائوس-رادائو در فرایند هم مکانی، در کنار تکنیک های بهینه سازی برای حل عددی مناسب دستگاه معادلات دیفرانسیل-جبری ظاهر شده در سیستم های مکانیکی استفاده شد و نتایج کار روی چهار مسئله معیار سنج مشاهده گردید. در مقایسه با روش های موجود برای حل این دسته از مسایل می توان گفت که روش پیشنهادی دقت بسیار مناسبی داشته و به خوبی می تواند معادله یا معادلات جبری ظاهر شده در مسئله را با دقت بالا و بدون رخ دادن اثرات رهاشدگی برآورده سازد. در ضمن استفاده از تکنیک بهینه سازی جهت حل دستگاه معادلات جبری حاصل از پیاده سازی روش، این امکان را فراهم می سازد که بتوان روش پیشنهادی را بدون نیاز به حدس اولیه دقیق برای متغیرهای تصمیم، با آسودگی خاطر بیشتر پیاده نمود.	روش اجزای متناهی	Finite Element Method
	روش تفاضلات متناهی	Finite Difference Method
	روش اویلر پسرو	Backward Euler Method
	روش مشتق گیری پسرو	Backward Differentiation Method
	روش های رونگه-کوتا	Runge-Kutta Methods
	روش تقریب پده	Pade Approximation Method
	روش تجزیه آدومیان	Adomian Decomposition Method
	پدیده کاهش مرتبه	Order Reduction Phenomena
	اثرات رهاشدگی	Drift-off Effects
	اندیس مشتق	Differentiation Index
	اندیس آشفتگی	Perturbation Index
	اندیس غریبیگی	Strangeness Index
	اندیس قابلیت کشش	Tractability Index
	روش های شبه-نیوتنی	Quasi-Newton Methods
	الگوریتم نقطه درونی	Interior-point Algorithm
	دقت ماشین	Machine Accuracy
	مسئله معیار سنج	Benchmark Problem
واژه نامه		
روش شبه طیفی	State variable	
روش هم مکانی متعامد	Orthogonal Collocation Method	
چند جمله ای لاگرانژ	Lagrange Polynomial	
نقاط لژاندر-گائوس-رادائو	Legendre-Gauss-Radau Points	
خاصیت دلتای کرونگر	Kronecker Property	
ماتریس مشتق	Differentiation Matrix	
هم گرایی	Convergency	
حدس اولیه	Initial Guess	

مراجع

- [1] R. Winkler, "Stochastic differential algebraic equations of index 1 and applications in circuit simulation," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 163, no. 2, pp. 435-463, (2003).
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2003.12.017>
- [2] M. S. Soto and C. Tischendorf, "Numerical analysis of DAEs from coupled circuit and semiconductor simulation," *Applied Numerical Mathematics*, vol. 53, no. 2-4, pp. 471-488, (2005).
<https://doi.org/10.1016/j.apnum.2004.08.009>
- [3] A. Steinbrecher, "Numerical solution of quasi-linear differential-algebraic equations and industrial simulation of multibody systems, PhD Thesis," Technische Universität Berlin, Berlin, (2006).

- [4] C. C. Pantelides, D. Gritsis, K. R. Morison, and R. W. H. Sargent, "The mathematical modelling of transient systems using differential-algebraic equations," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 449-454, (1988). [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(88\)85062-2](https://doi.org/10.1016/0098-1354(88)85062-2)
- [5] R. Gani and I. T. Cameron, "Modelling for dynamic simulation of chemical processes: the index problem," *Chemical engineering science*, vol. 47, no. 5, pp. 1311-1315, (1992). [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(92\)80252-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(92)80252-8)
- [6] H. Peng, F. Li, J. Liu, and Z. Ju, "A symplectic instantaneous optimal control for robot trajectory tracking with differential-algebraic equation models," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 5, pp. 3819-3829, (2019). <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2916390>
- [7] P. Kunkel and V. L. Mehrmann, "Defferential-Algebraic Equations: Analysis and Numerical Solution," *European Mathematical Society*, (2006).
- [8] K. E. Brenan, S. L. Campbell, and L. R. Petzold, "Numerical solution of initial-value problems in differential-algebraic equations," *Society for Industrial and Applied Mathematics*, (1996).
- [9] E. Hairer and G. Wanner, "Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems," *Springer Berlin, Heidelberg*, (1996).
- [10] P. Kunkel and V. Mehrmann, "Canonical forms for linear differential-algebraic equations with variable coefficients," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 56, no. 3, pp. 225-251, (1994). [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(94\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0377-0427(94)90080-9)
- [11] R. Marz, "Numerical methods for differential algebraic equations," *Acta Numerica*, vol. 1, pp. 141-198, (1992). <https://doi.org/10.1017/S0962492900002269>
- [12] F. Ghanbari and F. Ghoreishi, "Convergence analysis of the pseudospectral method for linear DAEs of index-2," *International Journal of Computational Methods*, vol. 10, no. 04, (2013). <https://doi.org/10.1142/S0219876213500199>
- [13] U. Archer and L. R. Petzold, "Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations," Philadelphia: SIAM, (1998). <https://doi.org/10.1137/1.9781611971392>
- [14] C. W. Gear, "Differential-algebraic equations and index transformation," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 9, no. 1, pp. 39-47, (1988). <https://doi.org/10.1137/0909004>
- [15] E. Hairer, C. Lubich, and M. Roche, "The Numerical Solution of Differential-Algebraic Systems by Runge-Kutta Methods," *Berlin: Springer-Verlag*, (1989). <https://doi.org/10.1007/BFb0093947>
- [16] N. Guzel and M. Bayram, "On the numerical solution of differential-algebraic equations with index-3," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 175, no. 2, pp. 1320-1331, (2006). <https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.08.025>
- [17] M. M. Hosseini, "Adomian decomposition method for solution of nonlinear differential algebraic equations," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 181, no. 2, pp. 1737-1744, (2006). <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.03.027>
- [18] S. Ghasemi and M. M. Jafarian, "The Application of Adaptive Time Spectral Method for Analyzing Inviscid Compressible Flow around a Pitching Airfoil," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 1, pp. 1-18, (2023). <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.78842.1138>
- [19] H. Hashemian and E. M. Hamedani, "The Effects of Winkler-Pasternak Foundation Coefficients on the Natural

- Frequency of Cylindrical Lattice Structures Using Galerkin Method," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 3, pp. 19-34, (2022). <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.73646.1069>.
- [20] A. Jafarian, S. M. Alavi Tabatabaei, and S. Shakhshi, "Calculating the Added Mass Matrix of an Airship Using Boundary Element Method," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 2, pp. 15-28, (2022). <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.71335.1040>
- [21] B. Fornberg, "A Practical Guide to Pseudospectral Methods," *Cambridge University Press*, 1998.
- [22] M. M. Hosseini, "Pseudospectral method for numerical solution of DAEs with an error estimation," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 170, no. 1, pp. 115-124, (2005). <https://doi.org/10.1016/j.amc.2004.10.068>
- [23] E. Babolian and M. M. Hosseini, "Reducing index, and pseudospectral methods for differential-algebraic equations," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 140, no. 1, pp. 77-90, (2003). [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(02\)00200-X](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(02)00200-X)
- [24] M. A. Mehrpouya and R. Salehi, "A numerical scheme based on the collocation and optimization methods for accurate solution of sensitive boundary value problems," *The European Physical Journal Plus*, vol. 136, no. 909, pp. 1-23, (2021). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01915-w>
- [25] H. Eskandari and S. Hashemi, "Numerical Comparison of Shell Side Thermo-Hydraulic Characteristics of Shell and Tube Heat Exchangers with Trefoil and Segmental Baffle by Genetic Algorithm," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 55-76, (2023). <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.75777.1105>
- [26] F. Rabiei, M. Seidi, and Z. Seydi, "Prediction and Optimization of Hardness Value of Mold Steel in Wirecut Process based on Fuzzy Inference System," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 1, pp. 53-70, (2023). <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.79508.1145>
- [27] P. Kazemiani-Najafabadi and E. Amiri Rad, "Thermoeconomic Optimization of a Superheated Kalina Cycle for Various Geothermal Source Temperatures in Iran," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 33, no. 1, pp. 1-16, (2022). <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.67824.1002>
- [28] K. A. Samer Amin, "Numerical Methods for Solving Differential Algebraic Equations, MSc Thesis," *An-Najah National University*, Nablus, (2010).
- [29] F. Soltanian, M. Dehghan, and S. M. Karbassi, "Solution of the differential algebraic equations via homotopy perturbation method and their engineering applications," *International Journal of Computer Mathematics*, vol. 87, no. 9, pp. 1950-1974, (2010). <https://doi.org/10.1080/00207160802545908>
- [30] P. G. Thomsen and C. Bendtsen, "Numerical Solution of Differential Algebraic Equations, Technical Report," *Technical University of Denmark*, (1999).



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

Parameter Optimization of Various Solar Cell Models by Neural Network Algorithm*

Research Article

Ali Sadollah¹, Javad Riazat²

DOI: [10.22067/jacsm.2023.81702.1176](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81702.1176)

1- Introduction

The necessity of renewable energy in recent years has significantly risen due to the daily price hike of fossil fuels, such as oil and gas, along with the increasing environmental pollution following the use of these fuels. Solar energy has been widely investigated among renewable energies because of the deplete availability of this energy. Lately, accurate modeling of the voltage (I-V) of solar cells has attracted the attention of many researchers. The main drawback in precise modeling is the absence of information about the accurate values of the model parameters to create a good coordination between the experimental data and the results of the models, and this variable identification is performed well with the assistance of an optimization technique. So far, several models have been proposed and expanded to demonstrate the behavior of the system under different exploitation conditions. In order to indicate the performance of the solar cell, three solar cell models are extensively used in practice, namely the single-diode, double-diode, and triple-diode models containing five, seven, and nine unknown variables, respectively. The solution key in deriving an effective mathematical model is the precise estimation of these parameters, and therefore, these parameters must be extracted and calculated with

high accuracy to reach a correct balance between the current (I) and voltage (V) of the solar cell outputs. In this article, the neural network optimization algorithm (NNA) is used to achieve the optimal values of the unknown variables of commercial silicon solar cell models (R.T.C. France) with a diameter of 57 mm for the single-diode, double-diode, and triple-diode models. To evaluate the performance of NNA, the optimization results obtained from this method were compared with the results obtained by the other optimization algorithms recently used for this problem. It was proved that applying the NNA method led to the best results compared to other approaches.

2- Solar Cells Diode Circuit Models

Investigating several solar models revealed the triple-diode model among all existing solar cell models as the most accurate model. It solved the drawbacks of other

models by taking into account almost all the physical details and leakages in actual solar cells, leading to the improved accuracy of the results. However, complexity and time consumption are the main defects of this model. The theoretical relations of this model have been described briefly as follows.

Triple-Diode Model

The nodal current equation at the entrance terminal can be written as Eq. (1) utilizing Kirchhoff's law for the triple-diode model, where the constant q is the charge of the electron (1.6021×10^{-19}); C , K represents the constant of the Boltzmann (1.2806×10^{-23}); and J/K and T is the temperature of the junction in Kelvin.

$$I_t = I_{ph} - I_{sd1} \left[\exp \left(\frac{qC}{n_1 K T} I_t \right) - 1 \right] - I_{sd2} \left[\exp \left(\frac{qC}{n_2 K T} I_t \right) - 1 \right] - I_{sd3} \left[\exp \left(\frac{qC}{n_3 K T} I_t \right) - 1 \right] - \frac{V_t}{R_{sh}} I_t \quad (1)$$

In Eq. (1), $x = [I_{ph}, I_{sd1}, I_{sd2}, I_{sd3}, R_s, R_{sh}, n_1, n_2, n_3]$ is the unknown parameter matrix of the triple diode model which reflects the solar cell model performance against the actual solar cell behavior. Each parameter of this matrix indicates a distinct physical element of the model circuit. Moreover, I_t and V_t refer to the terminal current and voltage, respectively. Applying nine design variables in the triple-diode model has made this model more capable and efficient for estimating the actual performance of the solar cell in practice compared to the single- and double-diode models having five and seven unknown parameters, respectively.

3- Optimization Model and Optimizer

The first step of the optimization process is to define each extracted solution by a solution vector, namely x , where $x = [I_{ph}, I_{sd1}, I_{sd2}, I_{sd3}, R_s, R_{sh}, n_1, n_2, n_3]$ for the triple-

*Manuscript received: April 5, 2023. Revised, May 28, 2023, Accepted, July 26, 2023.

¹ Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran. Email: sadollah@usc.ac.ir.

² M.Sc. Department of Mechanical Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.

diode model. The error function of the considered models is as follows:

$$E(I_t, V_t, x) = I_{\text{Measured}} - I_{\text{Calculated}} \quad (2)$$

where I_{Measured} is obtained from the experimental datasheets of recent sources and $I_{\text{Calculated}}$ will be calculated based on parameters extracted from the optimization algorithm and Eq. (1). Now, using Eq. (2) the root mean square error (RMSE) which is the objective function can be defined by the following relation:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} (E(I_t, V_t, x))^2} \quad (3)$$

where N_c is the number of the coupled experimented data. The domain of the solution vector for each unknown parameter is compiled from the literature and the cost function is minimized during the optimization based on this parameter domain limitation. In the last step, the RMSE function of all three models will be imported to the NNA as the objective function in order to extract the optimal unknown parameters for each model.

Neural Network Algorithm

The NNA is a newly created metaheuristics motivated by the unique structure of artificial neural networks (ANNs) and biological system-inspired optimizers. To produce new candidate solutions, the NNA benefits from the complex nature of ANNs and operators. For other metaheuristic optimization algorithms, the NNA starts with an initial population called the population of the pattern solution. Inspired by ANNs, each iteration in the NNA assumes the best solution achieved (i.e., time-optimal solution) as the target data, and the aim is to minimize the error between target data and other predicted pattern solutions. Therefore, based on the given definition, the NNA is programmed to minimize optimization problems (i.e., reduce the error between the target and the model solutions). It should be emphasized that at each iteration this target solution will be updated.

4- Results and Discussions

MATLAB software environment was used to identify the unknown parameters of the reported solar cell models. The

optimization task was performed for 30 independent runs using the NNA for all three models and optimized parameters extracted from the corresponding best RMSE. In the case of the triple-diode model, the best RMSE value is $9.84\text{e-}04$. For this model, the NNA has the lowest RMSE value, showing that the nine extracted parameters by this method are closer to those in practice.

Therefore, the calculated currents are determined for all three models and compared with the measured current as can be seen in Fig. 1. Existence of such a matching level between results means that the variables extracted from the NNA are very accurate for all three solar cell models and are so close to the real values. Other characteristics, such as relative error and voltage-power, can be extracted using the calculated currents in order to evaluate the accuracy of estimated parameters by NNA.

5- Conclusions

In this paper, NNA was studied to obtain accurate results of single-, double-, and triple-diode solar cell models. The NNA could provide an effective optimization model for solving optimization problems by taking the idea of the unique structure of neural networks in the human brain. The proposed algorithm was used to identify the design and unknown parameters of a solar cell with a 57 mm diameter (R.T.C. France). The obtained optimization results by the proposed algorithm are quite promising and overcome the results reported in the literature. In all three diode models, the NNA suggested more accurate and optimal solutions. This is especially evident in the double- and triple-diode models, where the number of unknown design parameters is higher (the nonlinear complexity of the problem is higher). It shows the successful performance of the proposed algorithm in solving more complex problems with a nonlinear nature. As a result, the NNA can be considered as a suitable candidate for solving the optimization problems of the solar cell systems.

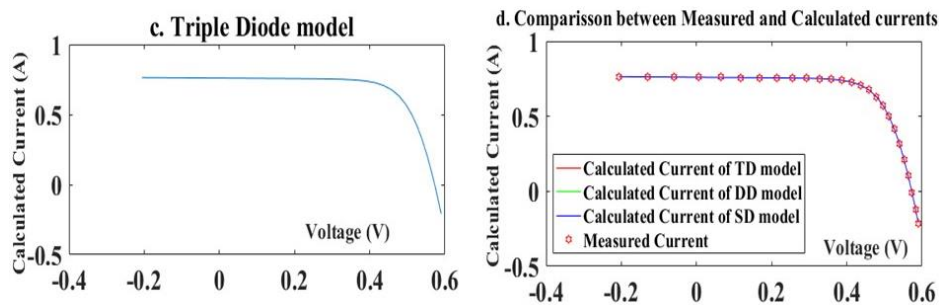


Fig. 1. Current-Voltage characteristic diagrams (I - V) obtained from c) Triple-Diode model, d) Comparison of the calculated currents of all three models with the measured current



بهینه‌سازی فرایند شناسایی پارامتر مدل‌های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی سلول خورشیدی مدل R.T.C. توسط الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی*

مقاله پژوهشی

علی سعداله^(۱) و جواد ریاضت^(۲)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81702.1176

چکیده شناخت دقیق متغیرهای مجهول برای انواع سلول‌های خورشیدی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اهمیت حیاتی در طراحی، کنترل، کیفیت، برآورد هزینه، و پیش‌بینی عملکرد سلول‌های خورشیدی دارد. گسترش مشخصه‌های یک سلول خورشیدی واحد به مجموعه‌ای از سلول‌ها (پنل خورشیدی) معمولاً بر اساس یک نقطه عملیاتی واحد بر روی منحنی مشخصه جریان-ولتاژ یکی از این سلول‌ها انجام می‌شود. در سال‌های اخیر، یک روش جدید برای پیش‌بینی عملکرد سلول و غربالگری سلولی با مدل‌سازی سلول با استفاده از یک مدار الکتریکی معادل ارائه شده است که در آن، هر متغیر، مربوط به یک پدیده فیزیکی در سلول خورشیدی است. این مدل‌های تحلیلی می‌توانند با یک مدل پنج، هفت، و اخیراً نه متغیری نشان داده شوند. به واسطه غیرخطی بودن و ناتوانی روش‌های بهینه‌سازی سنتی در شناسایی دقیق متغیرهای ناشناخته سیستم، اخیراً الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، توجهات چشم‌گیری را در حل این نوع مسائل مهندسی به خود جلب کرده‌اند. الگوریتم شبکه عصبی یک الگوریتم فراابتکاری است که از عملکرد شبکه عصبی مغز انسان الهام گرفته است. در این مقاله، تکنیک شناسایی پارامتر بهینه یک سلول خورشیدی تجاری برای مدل تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی توسط الگوریتم شبکه عصبی انجام گرفته است. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی دارای دقت پاسخ بهتری نسبت به الگوریتم‌های بهینه‌سازی اخیر در منابع است. این بهبود عملکرد به ترتیب برای مدل‌های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی به میزان ۰٫۴۴، ۰٫۸۵، و ۱۷٫۹۷ درصد نسبت به بهترین روش مطالعه شده در منابع حاصل شده است.

واژه‌های کلیدی سلول خورشیدی، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری، شناسایی پارامتر، الگوریتم شبکه عصبی.

Parameter Optimization of Various Solar Cell Models by Neural Network Algorithm*

Ali Sadollah

Javad Riazat

Abstract Precise recognition of unknown variables for different types of solar cells is important in design, control, quality, cost estimation, and prediction of solar cell performance. Aggregation and development of a single solar cell to a set of cells (solar panels) is usually based on a single operating point on the current-voltage characteristic curve. In recent years, a new method to predict cell performance and cell screening by modeling the cell is represented using an equivalent electrical circuit in which each variable corresponds to a physical phenomenon in the solar cell. These analytical models can be represented by a five-variable, seven-variable, and recently nine-variable models. Due to the nonlinearities and inability of traditional methods in introducing and identifying the unknown variables of the system, recently intelligent algorithms have attracted considerable attentions in solving engineering and industrial problems. Neural network algorithm (NNA) is a metaheuristic optimization algorithm that is inspired by the function of the neural network of human brain. In this article, the optimum parameter identification technique of a silicon commercial solar cell is used for single diode, two diode, and three diode models. The obtained optimization results of this research are compared with other optimizers in the literature and the surrounding discussions are carried out. The attained numerical optimization results of the proposed NNA method have the highest accuracy among the other optimizers in the literature. Therefore, the NNA can be considered as a suitable optimizer in solar industry where high accuracy is needed.

Keywords Solar cell; Optimization; Metaheuristics; Parameter identification; Neural network algorithm.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۵/۷ می‌باشد.

Email: sadollah@usc.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران.

(۲) کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران.

مقدمه

به واسطه افزایش قیمت روزانه سوخت‌های فسیلی نظیر نفت، گاز و همچنین افزایش آلودگی‌های محیطی به سبب استفاده از این سوخت‌ها، تقاضای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری را در بین دولت‌های مختلف داشته است. اما، انرژی‌های خورشیدی در این بین به دلیل دسترسی آسان در نرخ‌های بسیار بالا، مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته‌اند. به طور جزئی‌تر، سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی به طور گسترده‌ای برای دستیابی به بهترین بهره‌برداری از این نوع از منابع انرژی تجدیدپذیر بررسی و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [1]. علی‌رغم این واقعیت که سلول‌های خورشیدی مزایای زیادی را برای شبکه‌های تولیدی بازار جهانی برق به ارمغان آورده‌اند [2,3]، اخیراً یک چالش جدید و قابل توجه در رابطه با عدم تطبیق بازدهی تخمینی و بازدهی عملی آن‌ها به وجود آمده است که با شرایط آب و هوایی که تحت آن عمل می‌کنند متناسب است [4,5]، که این مورد افزون بر هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری آن‌ها محسوب می‌شود [6,7].

به تازگی، مدل‌سازی دقیق جریان به ولتاژ (I-V) سلول‌های خورشیدی برای حل این چالش جدید، توجه محققان مختلف را به خود جلب کرده است [8-11]. اشکال اصلی در مدل‌سازی دقیق، فقدان اطلاعات در مورد مقادیر دقیق پارامترهای مدل، به منظور ایجاد یک هماهنگی خوب بین داده‌های تجربی و نتایج مدل‌ها است و این شناسایی متغیر با کمک یک تکنیک بهینه‌سازی به خوبی انجام می‌شود. مدل‌سازی سلول‌های خورشیدی در قدم اول شامل فرموله کردن نمودار غیر خطی جریان به ولتاژ (V-I) است. روش‌های تعیین متغیرهای معادله سلول خورشیدی از داده‌های تجربی می‌تواند به دو دسته طبقه‌بندی شود: روش‌هایی که از نقاط انتخاب شده مشخصه (I-V) استفاده می‌کنند و روش‌هایی که از تمام نقاط آزمایش استفاده می‌کنند.

تا به حال چندین مدل برای نمایش رفتار سیستم تحت شرایط بهره‌برداری مختلف ارائه و توسعه داده شده است. مدل‌های متفاوتی از جمله مدل‌هایی با فرضیات ساده تا مدل‌هایی پیشرفته به همراه تعداد زیادی از متغیرهای فیزیکی وجود دارند. با این وجود سه نوع مدل سلول خورشیدی به

صورت گسترده در عمل به کار گرفته می‌شوند، که عبارتند از: مدل تک دیودی، مدل دو دیودی، و مدل سه دیودی.

دو مدل تک دیودی و دو دیودی هر دو از عناصر الکترونیکی تشکیل شده‌اند که یک مدار الکتریکی را می‌سازند که می‌تواند ماهیت غیرخطی را در سلول خورشیدی آنالیز و ترکیب کند. هر دو مدل تک دیودی و دو دیودی شامل مجموعه‌ای از مؤلفه‌ها نظیر جریان اشباع دیودی، جریان تولید شده، مقاومت شنت، مقاومت سری، و فاکتور ایدئال‌گرایی مربوط به دیود می‌باشند. برای مدل تک‌دیودی، پنج متغیر مجهول و برای مدل دو دیودی هفت متغیر مجهول برای نمایش عملکرد سلول خورشیدی وجود دارند. نکته کلیدی در استخراج یک مدل ریاضی کارآمد، تخمین دقیق این پارامترها است و بنابراین این پارامترها برای رسیدن به یک تعادل صحیح بین جریان (I) و ولتاژ (V) خروجی سلول خورشیدی باید با دقت بسیار بالا استخراج و محاسبه شوند.

علی‌رغم توانایی این دو مدل برای فراهم آوردن تحلیل‌های بهتر برای سلول‌های خورشیدی، استفاده از آن‌ها محدود به کاربردهای آزمایشگاهی بوده؛ به این معنی که عملکرد پویای آن‌ها در طول زمان فقط برای تعداد محدودی از شرایط عملیاتی آزمایش شده است. بنابراین، برای حل این مشکل مدل سه دیودی سلول خورشیدی به تازگی ارائه شده است [12]. مدل سه دیودی، ۹ متغیر را برای نمایش عملکرد سلول خورشیدی با یکدیگر ترکیب می‌کند. استفاده از ۹ متغیر در مدل سه دیودی، این مدل را برای تخمین عملکرد واقعی سلول خورشیدی در عمل و در کاربردهای صنعتی با دقت بسیار بالا و بازدهی بهبود یافته نسبت به دو مدل دیگر تواناتر و کاراتر کرده است. در حقیقت، شناسایی متغیرها به کمک یک تکنیک بهینه‌سازی قابل استفاده و توانمند امری ضروری و مهم قلمداد می‌شود.

دو رویکرد اصلی برای حل مشکل شناسایی متغیرهای بهینه در ادبیات مربوط به مدل‌سازی سلول خورشیدی وجود دارد، که عبارتند از: رویکرد تحقیقاتی مرسوم (ستتی) [13-16] و رویکرد تحقیقاتی فراابتکاری [17-19]. در مدل‌سازی مرسوم یا ستتی از یک رویکرد تخمینی مبتنی بر حداقل مربعات غیرخطی بهبود یافته خطا که بر پایه روش نیوتون توسعه یافته شده است استفاده می‌شود [13]، تا متغیرهای سلول خورشیدی استخراج و شناسایی شوند. وابستگی به نقطه آغازین که در این روش

روش‌ها محسوب می‌شوند [27].

در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، مزیت‌های الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات این است که پیاده‌سازی آن آسان است و چند متغیر برای تنظیم آن وجود دارد. با این وجود، این الگوریتم نیز اشکالاتی دارد. عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات به شدت بستگی به متغیرهای تنظیم شونده آن دارد، ممکن است به راحتی تنوع را در منطقه‌های جست و جو از دست بدهد و همچنین ممکن است تحت تأثیر هم‌گرایی زودرس قرار گیرد.

الگوریتم فرایند بازپخت شبیه‌سازی شده یک روش فراابتکاری دیگر است که تلاش می‌کند فرایند بازپخت را در متالورژی شبیه‌سازی کند. به خاطر این حقیقت که در الگوریتم فرایند باز پخت شبیه‌سازی شده، فرایند جست‌وجو توسط تنها یک عملگر جست‌وجوگر انجام می‌شود که عملکرد آن نسبت به نقطه شروع جست‌وجو حساس است. علاوه بر این، هیچ پایه نظری دقیقی برای تعیین متغیرهای این روش به خصوص متغیرهای روش خنک‌کاری وجود ندارد. انتخاب این متغیرها بسیار دشوار است و طراح باید به گونه‌ای این متغیرها را انتخاب کند که بهینه‌سازی مناسب در یک مدت زمان محاسباتی معقول انجام شده و پاسخ نهایی متغیرهای مجهول مدار به دست بیایند.

چالش غیر خطی بودن مجهولات سلول خورشیدی انتظار استفاده از یک تکنیک بهینه‌سازی با عملکرد بسیار مناسب را دارد. موفقیت یک الگوریتم بهینه‌سازی به توانایی ارائه یک تعادل خوب بین اکتشاف (Exploration) و بهره‌برداری (Exploitation) بستگی دارد. اکتشاف به تولید راه‌حل‌های جدید از محدوده مناطق دیده نشده فضای جست‌وجو اشاره دارد و بهره‌برداری یعنی تمرکز جست‌جوی الگوریتم در مجاورت راه حل‌های مناسب فعلی. ناتوانی الگوریتم برای ایجاد یک تعادل خوب بین اکتشاف و بهره‌برداری منجر به هم‌گرایی زودرس، افتادن در دام پاسخ محلی و رکود خواهد شد.

در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی (Neural Network Algorithm, NNA)، برای دست‌یابی به مقادیر بهینه متغیرهای مجهول مدل‌های یک سلول خورشیدی تجاری سیلیکونی با قطر ۵۷ میلی‌متر برای مدل تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی استفاده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد

استفاده می‌شود تفاوت بسیار بزرگ این رویکرد با رویکردهای دیگر است. به علاوه، این نوع روش بهینه‌سازی در ماهیت، به صورت محلی است و اگر راه‌حل و جواب موجود باشد ممکن است به جای مقادیر بهینه شده کلی (جهانی) مقادیر بهینه شده محلی را به دست آورد که یک نقص بزرگ در این رویکرد به شمار می‌آید [14-16]. علاوه بر این، روش‌های بهینه‌سازی سنتی نیازمند پیوستگی در مدل و محاسبات سنگین ریاضیاتی هستند، باید شرایط تقعر در منحنی و مشتق‌پذیر بودن را برای کاربردی بودن داشته باشند. روش‌های سنتی نسبت به حل و شرایط حل اولیه حساس و وابسته هستند و اغلب هم به یک مقدار بهینه محلی می‌انجامند. غیرخطی بودن ویژگی‌ها و متغیرهای سلول خورشیدی دلیل دیگری بر ناتوانی روش‌های مرسوم یا سنتی برای حل مؤثر مشکل شناسایی متغیرهای اصلی در این زمینه محسوب می‌شود. در نتیجه، برای حل مشکلات بهینه‌سازی در سلول خورشیدی در راستای احتمال تر شدن دست‌یابی به یک پاسخ کلی (جهانی) و دقیق و در مدت زمان معقول روش‌های تحقیقاتی فراابتکاری پیشنهاد داده شده‌اند [20-23].

پیشینه و منابعی که برای روش و رویکرد تحقیقاتی فراابتکاری وجود دارند، حل مسئله شناسایی متغیرهای اصلی در سلول‌های خورشیدی را به الگوریتم ژنتیک [18]، الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات [17]، و الگوریتم فرایند بازپخت شبیه‌سازی شده [19] ارجاع می‌دهند و تقریباً این روش‌ها، اولین الگوریتم‌هایی فراابتکاری محسوب می‌شوند که برای حل بهینه سلول‌های خورشیدی به کار گرفته شده‌اند. علاوه بر این، ثابت شده است که تکنیک‌های بهینه‌سازی فراابتکاری با تلفیق معیارهای مختلف مانند دقت، ثبات، سرعت هم‌گرایی، بازدهی محاسبات، و تعداد متغیرهای کنترلی کاهش یافته، پاسخ‌هایی بی‌نقص و تا حد ممکن نزدیک به حل دقیق را برای مدل‌های سلول خورشیدی ارائه می‌دهند [24-26].

اگرچه الگوریتم‌های فراابتکاری نتایج بهتری را نسبت به روش‌های مرسوم یا سنتی در پی دارند اما محدودیت‌هایی نسبی نیز به همراه دارند [27]. به عنوان رایج‌ترین الگوریتم فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک مکرراً فضای جست‌وجو را برای دستیابی به یک پاسخ مناسب به سرعت پیدا می‌کند، اما دارای اشکالاتی است. عدم وجود جست‌وجوهای مناسب محلی در این الگوریتم و تعیین پارامترهای اولیه از جمله معایب این گونه

شاکلی برای جریان دیود و جایگزین کردن جریان مقاومت شنت و تعمیم رابطه بالا مدل تک دیودی می‌تواند به صورت زیر فرموله شود [18]:

$$I_t = I_{ph} - I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{(V_t + R_s I_t)}{R_{sh}} \quad (2)$$

که I_{SD1} جریان اشباع دیودی، V_t نماد ولتاژ ترمینال، R_s و R_{sh} نمادهای مقاومت‌های سری و شنت، q نماد شارژ الکترونیک، K نماد ثابت بولتزمن، و T نیز نماد دمای سلول می‌باشد. همان طور که در معادله (۲) مشاهده می‌شود، شناسایی متغیرها در این مدل به شناسایی پنج متغیر مجهول به نام‌های R_s , I_{ph} , I_{SD1} , R_{sh} و n ختم می‌شود.

مدل دو دیودی

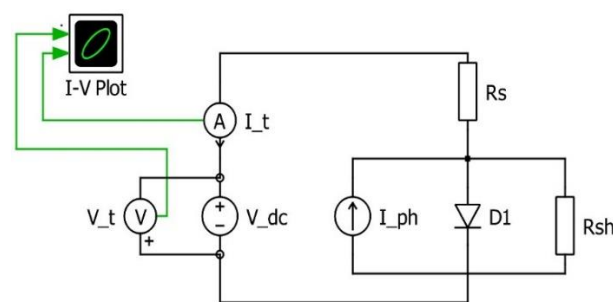
در حالت ایدئال، برای مدل‌سازی یک سلول خورشیدی تحت تابش خورشید، منبع جریان الکتریکی تولید شده توسط نور خورشید با یک دیود یک‌سو کننده موازی می‌شود. با این وجود، در عمل برای در نظر گرفتن فاصله شارژ شدن جریان بازترکیبی در مدار، منبع جریان با یک دیود دیگر و یک مقاومت نشستی شنت موازی می‌شود که این کار به منظور دخیل نمودن اتصال کوتاه‌های جزئی مسیر جریان (که در نزدیکی لبه‌های سلول انجام می‌شوند و مربوط به ناخالصی‌های موجود در ماده نیمه هادی به کار رفته در سلول و غیر ایدئال بودن آن می‌باشند) در داخل محاسبات و افزایش دقت در نتایج حاصله انجام می‌شود. در واقع این ویژگی، برتری اصلی مدل دودیودی نسبت به مدل تک دیودی می‌باشد و در واقع اضافه شدن دیود دوم در این مدل تا حدودی نشتی‌های جریان در سلول خورشیدی واقعی را جبران کرده و تأثیر آن در نتایج این مدل نشان داده می‌شود. اما با این وجود باز هم نشتی جریان در این مدل به طور کامل جبران نشده و باز هم اختلافی اندک میان نتایج این مدل و سلول خورشیدی واقعی وجود دارد. علاوه بر این، به دلیل اتصالات فلز سلول خورشیدی و مقاومت عمده مواد نیمه هادی، یک مقاومت سری با عناصر شنت سلول متصل است. مدار معادل مدل دو دیودی در شکل (۲) نشان داده شده است.

الگوریتم شبکه عصبی، نتایج حاصل از این روش با نتایج به دست آمده از روش‌های الگوریتم ژنتیک (Genetic algorithms, GAs)، الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات (Particle swarm algorithm, PSO)، الگوریتم فرایند بازپخت شبیه سازی شده (Simulated annealing, SA)، الگوریتم جست‌وجوی هارمونیک (Harmony Search, HS) و الگوریتم جست‌وجوی الگویی (Pattern Search, PS) مقایسه شده‌اند.

مدل‌سازی ریاضی مسئله سلول خورشیدی

مدل تک دیودی

مدل تک دیودی به طور گسترده برای نشان دادن رفتار سلول خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل با ترکیب جریان دو دیود موجود در مدل دو دیودی با یکدیگر یک ضریب غیر فیزیکی به اسم n معرفی می‌کند. پیچیدگی کمتر، سادگی در کاربرد و نتایج به نسبت دقیق از مزایای اصلی این مدل به حساب می‌آیند. اما در مقابل، این مدل برای پیش بینی عملکرد سلول‌های خورشیدی واقعی در صنعت مدل نسبتاًضعیفی است و شامل تقریب‌های نسبتاً زیادی می‌باشد که باعث می‌شود نتایج حاصل از این مدل با نتایج سلول خورشیدی واقعی، اختلاف زیادی داشته باشد. مدار معادل این مدل در شکل (۱) نمایش داده شده است.



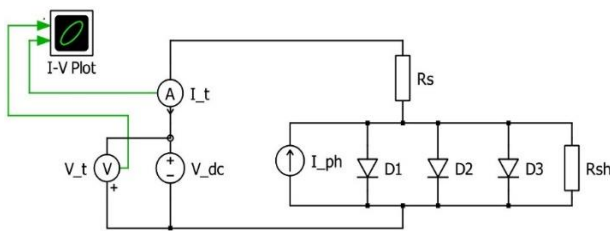
شکل ۱ شماتیک مدار معادل مدل تک‌دیودی سلول خورشیدی

جریان پایانه I_t را با توجه به شکل (۱) می‌توان با کمک قانون گره در ورودی ترمینال به صورت زیر نوشت:

$$I_t = I_{ph} - I_{D1} - I_{sh} \quad (1)$$

که I_{ph} نماد جریان خالص تولیدی حاصل از تابش نور، I_{D1} نماد جریان عبوری از تک دیود، I_t جریان پایانه و I_{sh} نیز به جریان مقاومت شنت اشاره دارد. با در نظر گرفتن معادله

سلول خورشیدی بسیار ضروری و مورد نیاز است. مدل سه - دیودی به نسبت دو مدل قبلی برای کاربردهای صنعتی مناسب تر است. مقادیر متغیرهای n_1 و n_2 نشان دادند که مدل دو دیودی برای نمایش اجزای مختلف جریان الکتریکی عبوری از سلول خورشیدی کافی نیستند. تأثیرات افزایش مرزهای سلول خورشیدی در اثر انبساطهای طولی (ناشی از تغییرات دمایی) و همچنین اتلاف جریان ناشی از نشت جریان داخل مدار، در مدل سه دیودی در نظر گرفته شده‌اند. مدار الکتریکی معادل مدل سه دیودی بعد از اتصال موازی دیود سوم به مدل دو دیودی در شکل (۳) نمایش داده شده است.

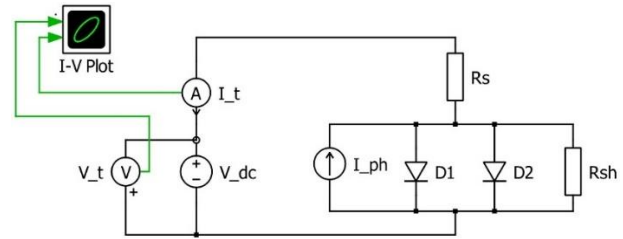


شکل ۳ شماتیک مدار معادل مدل سه دیودی سلول خورشیدی

به واسطه باز ترکیب‌هایی که در نواحی دچار نقص سلول رخ داده است و انرژی‌هایی که آزاد می‌شوند، هدف افزودن دیود سوم همراه با دو دیود دیگر، بررسی سهم جریان اتلافی دیود سوم است. در واقع در این مدل تمام جوانب و احتمالات ناشی جریان در نظر گرفته شده‌اند و نتایج استخراج شده از این مدل اختلاف اندکی با نتایج تک سلول واقعی صنعتی دارد که مزیت اصلی این مدل در مقایسه با دو مدل دیگر محسوب می‌شود. اما در نقطه مقابل پیچیدگی استفاده، ازدیاد متغیرها و محاسبات سنگین ریاضیاتی، از محدودیت‌های این مدل قلمداد می‌شوند. جریان پایانه I_t را با توجه به شکل (۳) می‌توان با کمک قانون گره در ورودی ترمینال به صورت زیر نوشت:

$$I_t = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{D3} - I_{sh} \quad (5)$$

در معادله (۵)، I_{ph} نماد جریان خالص تولیدی حاصل از تابش نور، I_{D1} نماد جریان عبوری از دیود اول، I_{D2} نماد جریان عبوری از دیود دوم، I_{D3} نماد جریان عبوری از دیود سوم و I_{sh} نیز نشان‌دهنده جریان مقاومت شنت می‌باشد. با در نظر گرفتن معادله شاکی برای جریان‌های سه دیود و جایگزینی جریان مقاومت شنت، معادله (۵) در قالب معادله (۶) بازنویسی



شکل ۲ شماتیک مدار معادل مدل دو دیودی سلول خورشیدی

جریان پایانه را با توجه به شکل (۲) می‌توان به کمک قانون گره در ورودی ترمینال به صورت زیر نوشت:

$$I_t = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (3)$$

در معادله (۳)، I_{ph} نماد جریان خالص تولیدی حاصل از تابش نور، I_{D1} نماد جریان عبوری از دیود اول، I_{D2} نماد جریان عبوری از دیود دوم و I_{sh} نیز به جریان مقاومت شنت اشاره دارد. با در نظر گرفتن معادله شاکی برای جریان‌های دیودها و جایگزین کردن جریان مقاومت شنت، معادله (۳) به شکل زیر بازنویسی می‌شود [12]:

$$I_t = I_{ph} - I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_1 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{SD2} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_2 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{(V_t + R_s I_t)}{R_{sh}} \quad (4)$$

در معادله (۴)، I_{SD1} و I_{SD2} به ترتیب نمادهای جریان دیفیوژن و جریان اشباع، V_t نماد ولتاژ ترمینال، R_s و R_{sh} نمادهای مقاومت‌های سری و شنت، q نماد شارژ الکترونیکی، K نماد ثابت بولتزمن، n_1 و n_2 نمایانگر ضرایب ایدئال‌گرایی دیفیوژن و بازترکیبی، و T نیز نماد دمای سلول می‌باشند. معادله (۴) هفت متغیر مجهول به نام‌های I_{SD1} ، I_{SD2} ، R_s ، I_{ph} ، I_{D1} ، I_{D2} ، R_{sh} را در بر می‌گیرد که برای منعکس کردن عملکرد واقعی سلول خورشیدی و سیستم تحت عنوان نتایج آزمایش، شناسایی این متغیرها ضروری و حائز اهمیت بالایی است.

مدل سه دیودی

این مدل، مدل دقیقی از تک سلول‌های خورشیدی و ماژول‌های فوتولتائیک است که برای تحلیل قوانین انرژی برای سیستم

می‌شود [12]:

فرایند بهینه‌سازی مدل ریاضی

متغیرهای مجهول را می‌توان با کمک روش بهینه‌سازی و مجموعه‌ای از داده‌های تجربی I-V که از یک سیستم واقعی به دست آمده‌اند شناسایی کرد. تکنیک بهینه‌سازی به کار رفته در این مقاله الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی (NNA) است که در ادامه به تفصیل به آن پرداخته خواهد شد. تعداد ۲۶ داده آزمایشگاهی I-V برای ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده از روی نمونه آزمایش به همراه مقدار I_t محاسبه شده از روابط (۲)، (۴)، و (۶) برای هر جفت داده جریان تجربی (I_t) و ولتاژ تجربی (V_t) برای هر سه مدل تک دیودی، دودی و سه دیودی در جدول (۱) آورده شده است.

در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، هر جواب توسط یک بردار راه‌حل مانند X تعریف می‌شود که X در مدل‌های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی به ترتیب توسط معادلات (۷) تا (۹) بیان شده‌اند:

$$X = [R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD}, n] \quad (۷)$$

$$[R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD3}, I_{SD2}, I_{SD1}, n_1, n_2, n_3] \quad (۹)$$

$$I_t = I_{ph} - I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_1 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{SD2} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_2 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{SD3} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_3 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{(V_t + R_s I_t)}{R_{sh}} \quad (۶)$$

که در معادله (۶)، I_{SD1} ، I_{SD2} و I_{SD3} به ترتیب نمادهای جریان دیفیوژن، جریان اشباع بازترکیبی، و جریان نشی-بازترکیبی، V_t نماد ولتاژ ترمینال، R_s و R_{sh} نمادهای مقاومت‌های سری و شنت، q نماد شارژ الکترونیکی، K نماد ثابت بولتزمن، n_1 ، n_2 و n_3 نمایانگر ضرایب ایدئال‌گرایی دیفیوژن، بازترکیبی، و نشی-بازترکیبی، و T نیز نماد دمای سلول می‌باشند. معادله (۶)، ۹ متغیر مجهول به نام‌های R_s ، I_{ph} ، I_{SD3} ، I_{SD2} ، I_{SD1} ، R_{sh} ، n_1 ، n_2 و n_3 را در بر می‌گیرد که استخراج آن‌ها برای نمایش و تخمین عملکرد سلول خورشیدی که تحت آزمایش‌ها و بررسی‌های مکرر قرار گرفته است، از اهمیت بالایی برخوردار است.

جدول ۱ داده‌های تجربی جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده برای یک سلول خورشیدی تجاری سیلیکونی با قطر ۵۷ میلی‌متر برای مدل تک دیودی،

دو دیودی و سه دیودی

اندازه‌گیری	V_t (V)	I_t (A)	اندازه‌گیری	V_t (V)	I_t (A)
1	-0.2057	0.764	14	0.4137	0.728
2	-0.1291	0.762	15	0.4373	0.7065
3	-0.0588	0.7605	16	0.459	0.6755
4	0.0057	0.7605	17	0.4784	0.632
5	0.0646	0.760	18	0.496	0.573
6	0.1185	0.759	19	0.5119	0.499
7	0.1678	0.757	20	0.5265	0.413
8	0.2132	0.757	21	0.5398	0.3165
9	0.2545	0.7555	22	0.5521	0.212
10	0.2924	0.754	23	0.5633	0.1035
11	0.3269	0.7505	24	0.5736	0.010
12	0.3585	0.7465	25	0.5833	0.123
13	0.3873	0.7385	26	0.590	0.210

بهینه‌سازی، تابع هدف با توجه به محدوده پارامترها به حداقل می‌رسد. الگوریتم شبکه عصبی (NNA) برای بهینه‌سازی متغیرهای مجهول به گونه‌ای که پاسخ به دست آمده تابع هدف را به حداقل مقدار خود برساند، در ادامه استفاده خواهد شد. حد بالایی و پایینی پارامترهای طراحی، در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. متغیرهای طراحی مدل (پنج، هفت، و نه بر اساس مدل دیود انتخاب شده) به ترتیب توسط الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی تا زمانی که معیار پایانی و قابل قبول برآورده شود، انتخاب و در معادلات استفاده می‌شوند. واضح است که هر چه مقدار تابع هدف کوچک‌تر باشد، راه‌حل بهتر و دقیق‌تری حاصل شده است.

جدول ۲ حدود بالا و پایین برای هر یک از متغیرهای طراحی سلول خورشیدی در مدل‌های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی

متغیرهای طراحی	حد پایین	حد بالا
$R_s(\Omega)$	0	0.5
$R_{sh}(\Omega)$	0	100
$I_{ph}(A)$	0	1
$I_{SD1}, I_{SD2}, I_{SD3}(\mu A)$	0	1
n_1, n_2, n_3	1	2

روش بهینه‌سازی الگوریتم شبکه عصبی مقدمه

الگوریتم شبکه عصبی یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری جدید و الهام گرفته از سیستم‌های عصبی زیستی و شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks, ANNs) است که برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده پیشنهاد شده است [28]. روش پیشنهادی با نام الگوریتم شبکه عصبی (Neural Network Algorithm, NNA) بر اساس ساختار منحصر به فرد شبکه‌های عصبی مصنوعی توسعه داده شده است. الگوریتم شبکه عصبی از ساختار پیچیده شبکه‌های عصبی مصنوعی و عملگرهایش برای تولید راه‌حل‌های جدید بهره می‌گیرد. تا کنون چندین مسئله طراحی مهندسی در دامنه محدودی مورد بررسی قرار گرفته است تا کارایی الگوریتم شبکه عصبی برای جستجو در محدوده دامنه در مسائل بهینه‌سازی دارای قید و

در قدم بعدی برای تعریف تابع هدف، معادلات (۲)، (۴) و (۶) در فرم همگن آن‌ها به صورت زیر بازنویسی می‌شوند. برای مدل تک دیودی تابع خطا از معادله (۲) به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$f(I_t, V_t, X) = I_t - I_{ph} + I_{SD} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n. K. T} \right) - 1 \right] + \frac{(V_t + R_s I_t)}{R_{sh}} \quad (10)$$

تابع خطا برای مدل دو دیودی از معادله (۴) عبارت است از:

$$f(I_t, V_t, X) = I_t - I_{ph} + I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_1. K. T} \right) - 1 \right] + I_{SD2} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_2. K. T} \right) - 1 \right] + \frac{(V_t + R_s I_t)}{R_{sh}} \quad (11)$$

و در نهایت از معادله (۶) برای مدل سه دیودی تابع خطا عبارت است از:

$$f(I_t, V_t, X) = I_t - I_{ph} + I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_1. K. T} \right) - 1 \right] + I_{SD2} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_2. K. T} \right) - 1 \right] + I_{SD3} \left[\exp \left(\frac{q(V_t + R_s I_t)}{n_3. K. T} \right) - 1 \right] + \frac{(V_t + R_s I_t)}{R_{sh}} \quad (12)$$

مقدار f که همان تابع خطای نسبی است، در ادامه و در بخش نتایج برای مدل‌های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی برای هر جفت از داده‌های تجربی داده شده محاسبه می‌شود. در معادلات (۱۰) تا (۱۲) متغیرهای I_t و V_t مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده برای ولتاژ و جریان پایانه‌ها هستند. از خطای مجذور مربعات میانگین ریشه (Root Means Square Error, RMSE) به عنوان معیاری برای تعیین کیفیت و تفاوت بین نتایج مدل و داده‌های تجربی استفاده می‌کنیم و در واقع RMSE، تابع هدف یا هزینه در مسئله بهینه‌سازی سلول خورشیدی است. RMSE توسط معادله (۱۳) تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i(I_t, V_t, X))^2} \quad (13)$$

که N تعداد داده‌های تجربی است. در طول فرایند

ماتریس وزن

با استفاده از یک جمع‌بندی ساده، یک سلول عصبی، مقادیر وزنی این مسیرهای ورودی را ترکیب می‌کند. وزن‌های اولیه در شبکه‌های عصبی مصنوعی اعداد تصادفی هستند و وقتی که شمارنده تکرار در حال افزایش است، با توجه به خطای محاسبه شده شبکه، به روز می‌شوند. ماتریس وزنی W در رابطه (۱۵) برای جمعیت راه‌حل‌های الگو نمایش داده شده است:

$$W(t) = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_D] \quad (15)$$

که W یک ماتریس مربعی $N_{pop} \times N_{pop}$ با w_{ij} درایه است که در حین تکرار اعداد تصادفی را به طور یک‌نواخت بین صفر تا یک تولید می‌کند و t یک شاخص تکرار است. زیرنویس اول وزن مربوط به شمارنده راه‌حل الگوی آن می‌شود و زیرنویس دوم وزن مربوط به مقادیر وزنی راه‌حل‌های الگوی دیگر است. هر راه‌حل الگو دارای وزن مربوط به خودش می‌باشد که برای تولید یک راه‌حل جدید به کار گرفته می‌شود. با این حال، محدودیتی برای مقادیر وزن وجود دارد. قید تحمیل شده، به این صورت است که مجموع وزن‌ها برای یک راه‌حل الگو نباید از عدد یک تجاوز کند که از نظر ریاضی می‌تواند به شکل رابطه (۱۶) تعریف شود:

$$\sum_{j=1}^{N_{pop}} w_{ij}(t) = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (16)$$

وجود چنین محدودیتی برای مقادیر وزن، ناشی از کنترل انحراف از تولید راه‌حل‌های الگوی جدید در منطقه بهینه محلی است. پس از تشکیل ماتریس وزن (W)، راه‌حل‌های الگوی جدید (X^{NEW}) با استفاده از معادله (۱۷) که از تکنیک جمع وزن مورد استفاده در شبکه‌های عصبی مصنوعی الهام گرفته شده، محاسبه می‌شود [28]:

$$\bar{X}_j^{NEW}(t+1) = \sum_{i=1}^{N_{pop}} w_{ij}(t) \times \bar{X}_i(t), \quad j = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (17)$$

$$\bar{X}_i(t+1) = \bar{X}_i(t) + \bar{X}_i^{NEW}(t+1), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (18)$$

که در آن t شاخص تکرار است. بنابراین راه‌حل الگوی جدید برای تکرار $(t+1)$ ام با استفاده از معادلات (۱۴) و (۱۵) به روز شده است. پس از ایجاد راه‌حل‌های الگوی جدید از جمعیت الگوهای قبلی بر مبنای بهترین مقدار وزن که وزن

شرط را مورد اعتبارسنجی قرار دهد. عدم نیاز به تنظیم پارامترهای اولیه می‌تواند الگوریتم شبکه عصبی را نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌ساز مطالعه شده دیگر تمایز و برتری بسیاری ببخشد.

ایده اولیه

با الهام از شبکه‌های عصبی مصنوعی، در الگوریتم شبکه عصبی (NNA) بهترین راه‌حل به دست آمده در هر تکرار (یعنی راه‌حل بهینه موقتی) به عنوان داده‌های هدف فرض می‌شوند و هدف از این کار کاهش خطا بین داده‌های هدف و سایر راه‌حل‌های الگوی پیش‌بینی شده است. بر اساس مفهوم تعریف شده، الگوریتم شبکه عصبی برای به حداقل رساندن خطا بین راه‌حل‌های هدف و الگو توسعه داده شده است.

تولید جمعیت اولیه

در یک مسئله بهینه‌سازی D بعدی، یک راه‌حل الگو (Pattern Solution)، یک ماتریس سطری $1 \times D$ است که داده‌های ورودی را در الگوریتم شبکه عصبی نشان می‌دهد. این بردار به صورت $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_D]$ تعریف می‌شود. برای شروع الگوریتم بهینه‌سازی یک انتخاب تصادفی از ماتریس الگوی راه‌حل با اندازه $N_{pop} \times D$ تولید می‌شود. از این رو ماتریس X که به طور تصادفی بین مرزهای بالایی و پایینی یک دامنه ایجاد می‌شود، یک ماتریس $N_{pop} \times D$ خواهد بود. هزینه یک راه‌حل الگو برای تکرارهای متوالی با ارزیابی تابع هزینه (تابع برازش C) برای راه‌حل الگوی مربوطه به شرح زیر است:

$$C_i = f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_D^i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (14)$$

که در رابطه (۱۴) f همان تابع هدف است. بعد از محاسبه تابع هزینه برای تمامی راه‌حل‌های الگو، مرحله بعدی پیدا کردن بهترین راه‌حل الگو است، که منظور از بهترین راه‌حل در این الگوریتم، یک راه‌حل بهینه جهانی با کمترین مقدار تابع هدف می‌باشد. سپس، بعد از تنظیم راه‌حل هدف (X^{TARGET}) از بین راه‌حل‌های الگو، وزن هدف (W^{TARGET}) متناظر با راه‌حل هدف باید از بین جمعیت وزن (ماتریس وزن) انتخاب شود.

نزدیک تر شدن به بهترین راه حل (راه حل هدف) انجام می شود. بنابراین رابطه (۲۱) به عنوان یک عملگر انتقال برای روش پیشنهاد شده برای هر عضو از جمعیت به صورت زیر تعریف می شود:

$$\vec{X}_i^*(t+1) = TF(\vec{X}_i(t+1)) = \vec{X}_i(t+1) + 2 \times \text{Rand} \times (\vec{X}^{\text{Target}}(t) - \vec{X}_i(t+1)) \quad (21)$$

اخیرا الگوریتم بهینه سازی شبکه عصبی در کاربردهای مختلف مهندسی از قبیل پریتراهای سه بعدی [29]، سلول های سوختی [30,31] و مسایل بهینه سازی مهندسی و چند هدفه [23-34] مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج و مباحث

در این مقاله، مشخصه جریان- ولتاژ (I-V) یک سلول خورشیدی سیلیکونی ۵۷ میلی متری تجاری (R.T.C. فرانسه) برای شناسایی پارامترهای مجهول طراحی مبتنی بر الگوریتم شبکه عصبی (NNA) در نظر گرفته شده است. داده های تجربی از سیستمی که زیر تابش ۱ سان (مقداری معادل 1000 W/m^2) و در دمای ۳۳ درجه سانتی گراد قرار دارد، استخراج شده اند. در این تحقیق از روش تاگوچی [35] برای تعیین پارامترهای بهینه الگوریتم شبکه عصبی (تعداد اعضای جمعیت و بیشترین تعداد تکرار) استفاده شده است. پارامترهای تنظیم الگوریتم شبکه عصبی (NNA) برای هر سه مدل سلول خورشیدی شامل جمعیت اولیه ۵۰ و ماکزیمم مقدار محاسبه تابع هدف به میزان 10000 برای انجام فرایند بهینه سازی در نظر گرفته شده اند. تعداد دفعات اجرای بهینه سازی و الگوریتم برای شناسایی متغیرهای مجهول طراحی ۳۰ بار تکرار در نظر گرفته شده است. همچنین، از محیط نرم افزار MATLAB جهت شناسایی پارامترهای مجهول مدل سلول خورشیدی استفاده شده است. جدول (۳) نتایج آماری به دست آمده توسط روش الگوریتم شبکه عصبی را برای ۳ مدل در نظر گرفته شده سلول خورشیدی نشان می دهد.

جدول (۴) پارامترهای طراحی بهینه شده و مقدار RMSE را برای مدل های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی را که توسط الگوریتم NNA استخراج شده اند، در مقایسه با سایر

هدف نامیده می شود، ماتریس وزن نیز باید به خوبی به روزرسانی شده باشد. رابطه (۱۹)، یک معادله به روزرسانی - شده برای ماتریس وزن را پیشنهاد می دهد:

$$\vec{W}_i^{\text{Updated}}(t+1) = \vec{W}_i(t) + 2 \times \text{rand} \times (\vec{W}^{\text{Target}}(t) - \vec{W}_i(t)), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{\text{pop}} \quad (19)$$

عملگر تصادفی

در الگوریتم شبکه عصبی (NNA)، عملگر تصادفی درصد معینی از راه حل های الگو را در جمعیت جدیدی از الگو اصلاح می کند، به این معنا که راه حل الگوی جدید $\vec{X}_1^{\text{NEW}}(t+1)$ و ماتریس وزن به روز شده $\vec{W}_i^{\text{Updated}}(t+1)$ باز هم اصلاح خواهند شد. برای این منظور، پارامتر β که همان ضریب اصلاح می باشد تعریف می شود، که درصد راه حل های الگویی را که باید تغییر یابند را تعیین می کند. مقدار اولیه β بر روی ۱ تنظیم شده (یعنی ۱۰۰ درصد احتمال برای اصلاح همه افراد در جمعیت در تکرار اول) و مقدار آن به طور تطبیقی در هر تکرار با استفاده از فرمول کاهشی که در ادامه پیشنهاد شده است، به دست خواهد آمد:

$$\beta(t+1) = \beta(t) \times 0.99 \quad t = 1, 2, 3 \dots \text{Max. Iteration} \quad (20)$$

عملگر تصادفی به طور تطبیقی کاهش می یابد تا به الگوریتم اجازه جستجو برای راه حل بهینه نزدیک به راه حل هدف را بدهد و همچنین از تغییرات شدید در راه حل های الگوی در تکرارهای نهایی اجتناب کند.

عملگر انتقال

در الگوریتم شبکه عصبی (NNA)، برخلاف شبکه های عصبی مصنوعی (ANNs)، عملگر انتقال، راه حل های الگوی جدید را در جمعیت، از موقعیت فعلی خود در فضای جستجو به موقعیت های جدید به منظور به روز رسانی و تولید راه حل های با کیفیت بهتر به سمت راه حل هدف انتقال می دهد. بهبود راه حل ها با حرکت راه حل های الگوی جدید فعلی و

HS برای مدل تک دیودی و دو دیودی، این نتایج به نتایج حاصله از الگوریتم پیشنهادی NNA نزدیک‌تر است و رقابت نزدیک‌تری میان این سه روش وجود دارد. همچنین، در جدول (۴) نتایج مدل سه دیودی به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی با نتایج روش‌های الگوریتم بهینه‌سازی شعله-پروانه (MFO) [40]، بهینه‌ساز مورچه شیر (ALO) [44]، الگوریتم بهینه‌سازی سینوس-کسینوسی (SCA) [42]، بهینه-سازی چند بیتی (MVO) [43]، بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) [39] و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ آشفته (WOA) [41] که در منابع [45] برای یک سلول خورشیدی ۵۷ میلی‌متری شرکت R.T.C. فرانسه آورده شده‌اند، مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار RMSE محاسبه شده توسط الگوریتم شبکه عصبی برای این مدل مقدار $9.843e-4$ است که این عدد پایین‌ترین مقدار در بین سایر روش‌ها محسوب می‌شود و این موضوع به این معناست که نتیجه مطالعه حاضر برای مدل سه دیودی نیز دقت بالاتری را نسبت به سایر روش‌ها در بر دارد.

در ادامه، مقادیر جریان محاسبه شده که به کمک متغیرهای استخراج شده از روش الگوریتم شبکه عصبی و روابط مدلسازی برای هر جفت داده جریان-ولتاژ به دست آمده‌اند به همراه جریان اندازه‌گیری شده و همچنین متغیر خطای نسبی که از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود، برای سه مدل تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی استخراج شده که در جداول (۵) تا (۷) آورده شده‌اند.

روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۴)، درصد بهبود برای الگوریتم‌های مطالعه شده به منظور ارزیابی میزان بهبود نتایج و دقت پارامترهای استخراج شده به کمک الگوریتم شبکه عصبی و مقایسه دقت این روش با روش‌های دیگر، آورده شده است.

در جدول (۴) نتایج مدل‌های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی با نتایج روش‌های الگوریتم بهینه‌سازی ذرات تصادفی (CPSO) [17]، الگوریتم ژنتیک (GAs) [18]، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه لانه زنبوری به صورت مصنوعی (ABSO) [36]، الگوریتم‌های جستجوی الگو محور (PS) [37]، روش بازپخت شبیه‌سازی شده (SA) [19] و جستجوی هارمونیک (HS) [38] مقایسه و نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود، مقادیر RMSE حاصل از الگوریتم شبکه عصبی در میان روش‌های دیگر، پایین‌ترین مقدار را دارد. با توجه به روابط بخش مدل‌سازی سلول خورشیدی می‌توان به این نکته پی برد که نزدیکی مقادیر پارامترهای استخراج شده به پارامترهای سلول خورشیدی واقعی، منجر به کم شدن اختلاف میان جریان محاسبه شده و جریان اندازه‌گیری شده می‌شود. با در نظرگیری این موضوع می‌توان ذکر کرد که الگوریتم شبکه عصبی (NNA) نتایجی بهتر و دقیق‌تری را برای مدل‌های تک - دیودی، دو دیودی، و سه دیودی نسبت به الگوریتم‌های بررسی شده ارائه داده است. این عملکرد در خصوص چهار روش PS، SA، CPSO و GAs به مراتب محسوس‌تر است. در خصوص نتایج به دست آمده توسط دو روش ABSO و

جدول ۳ نتایج آماری بهینه‌سازی به دست آمده برای مدل‌های مختلف سلول خورشیدی توسط روش NNA

مدل سلول خورشیدی	بدترین RMSE	میانگین RMSE	انحراف معیار RMSE	بهترین RMSE	ضریب تغییرات * RMSE
تک دیودی	0.003838	0.0017789	0.0005161	0.00098666	0.29012
دو دیودی	0.005485	0.0014478	0.0008677	0.00098262	0.59932
سه دیودی	0.008652	0.0014278	0.0014483	0.00098435	1.014147

* ضریب تغییرات برابر است با انحراف معیار داده‌ها تقسیم بر میانگین

جدول ۴ متغیرهای مجهول طراحی استخراج شده برای مدل‌های تک‌دیودی، دو دیودی، و سه دیودی توسط روش NNA و مقایسه با یافته‌های مطالعات قبلی

متغیرهای طراحی مدل تک دیودی	NNA (مطالعه حاضر)	ABSO [28]	HS [30]	CPSO [17]	PS [29]	SA [19]	GAs [18]
$R_S(\Omega)$	0.036452	0.0365	0.0366	0.0354	0.0313	0.0345	0.0299
$R_{Sh}(\Omega)$	53.206652	52.290	53.594	59.012	64.102	43.103	42.372
$I_{Ph}(A)$	0.760784	0.7608	0.7607	0.7607	0.7617	0.762	0.7619
$I_{sd}(\mu A)$	0.317032	0.3062	0.3049	0.004	0.998	0.4798	0.8087
n	1.479304	1.4758	1.4753	1.5033	1.6000	1.5172	1.5751
RMSE	9.866e-04	9.91e-4	9.95e-4	0.00139	0.01494	0.01900	0.01908
رتبه	1	2	3	4	5	6	7
درصد بهبود	-	0.443%	0.844%	29.02%	93.39%	94.807%	94.829%
متغیرهای طراحی مدل دو دیودی	NNA (مطالعه حاضر)	ABSO [28]	MFO [40]	HS [30]	GWO [39]	PS [29]	SA [19]
$R_S(\Omega)$	0.036675	0.03657	0.0345	0.03545	0.0335	0.0320	0.0345
$R_{Sh}(\Omega)$	55.376133	54.6219	60	46.8269	56.7361	81.3008	43.1034
$I_{Ph}(A)$	0.760778	0.76078	0.7609	0.76176	0.7614	0.7602	0.7623
$I_{sd1}(\mu A)$	0.237307	0.26713	0.286	0.12545	0.337	0.9889	0.4767
$I_{sd2}(\mu A)$	0.651648	0.38191	0.306	0.25470	0.246	0.0001	0.0100
n1	1.455202	1.46512	1.4906	1.49439	1.5431	1.6000	1.5172
n2	1.995709	1.98152	1.6617	1.49989	1.5442	1.1920	2.0000
RMSE	9.826e-04	4-9.834e	0.0011	0.00126	0.0014	0.01518	0.01664
رتبه	1	2	3	4	5	6	7
درصد بهبود	-	0.085%	10.67%	22.015%	29.81%	93.52%	94.09%
متغیرهای طراحی مدل سه دیودی	NNA (مطالعه حاضر)	GWO [39]	ALO [44]	MVO [43]	MFO [40]	SCA [42]	WOA [41]
$R_S(\Omega)$	0.036988	0.0346	0.0338	0.0351	0.0300	0.0302	0.0488
$R_{Sh}(\Omega)$	56.97410	58.9166	54.8311	59.1165	50	60	58.6704
$I_{Ph}(A)$	0.760778	0.7611	0.7615	0.7614	0.7605	0.7560	0.7667
$I_{sd1}(\mu A)$	0.175548	0.30297	0.3897	0.3327	0.200	0.200	0.223
$I_{sd2}(\mu A)$	1.227080	0.2238	0.3738	0.3997	0.400	0.359	0.390
$I_{sd3}(\mu A)$	3.545e-10	0.30436	0.3742	0.2217	0.399	0.400	0.390
n1	1.430222	1.9892	1.8705	1.9463	1.5863	2	1.9539
n2	1.999999	1.6676	1.5059	1.5218	2	2	1.7596
n3	1.000000	1.4925	1.9555	1.6737	1.5358	1.5081	1.5185
RMSE	9.843e-4	0.0012	0.0015	0.0030	0.0038	0.0059	0.0179
رتبه	1	2	3	4	5	6	7
درصد بهبود	-	17.97%	34.38%	67.19%	74.09%	83.31%	94.5%

جدول ۵ داده‌های تجربی و محاسبه شده جریان به همراه خطای نسبی برای یک سلول خورشیدی تجاری سیلیکونی با قطر ۵۷ میلی‌متر برای مدل تک دیودی

خطای نسبی	I_L (A) اندازه‌گیری شده	I_L (A) محاسبه شده	خطای نسبی	اندازه‌گیری	I_L (A) محاسبه شده	I_L (A) اندازه‌گیری شده	خطای نسبی
8.428e-4	0.728	0.727386	14	-1.661e-4	0.764	0.764126	1
-7.092e-4	0.7065	0.707001	15	-9.037e-4	0.762	0.762688	2
2.511e-4	0.6755	0.675330	16	-11.417e-4	0.7605	0.761368	3
18.670e-4	0.632	0.630819	17	4.530e-4	0.7605	0.760155	4
17.676e-4	0.573	0.571987	18	12.550e-4	0.760	0.759046	5
-12.996e-4	0.499	0.499648	19	12.862e-4	0.759	0.758023	6
-16.012e-4	0.413	0.413661	20	-8.534e-5	0.757	0.757064	7
-31.313e-4	0.3165	0.317491	21	11.795e-4	0.757	0.756107	8
-5.166e-4	0.212	0.212109	22	5.9915e-4	0.7555	0.755047	9
126.14e-4	0.1035	0.102194	23	5.013e-4	0.754	0.753621	10
124.14e-3	-0.01	-0.008758	24	-11.338e-4	0.7505	0.751350	11
-204.31e-4	-0.123	-0.125513	25	-11.008e-4	0.7465	0.747321	12
75.12e-4	-0.21	-0.208422	26	-21.665e-4	0.7385	0.740100	13

جدول ۶ داده‌های تجربی و محاسبه شده جریان به همراه خطای نسبی برای یک سلول خورشیدی تجاری سیلیکونی با قطر ۵۷ میلی‌متر برای مدل دو دیودی

خطای نسبی	I_L (A) اندازه‌گیری شده	I_L (A) محاسبه شده	خطای نسبی	اندازه‌گیری	I_L (A) محاسبه شده	I_L (A) اندازه‌گیری شده	خطای نسبی
10.113e-4	0.728	0.727263	14	1.639e-5	۰,۷۶۴	0.763987	1
-5.091e-4	0.7065	0.706859	15	-7.945e-4	0.762	0.762605	2
4.324e-4	0.6755	0.675207	16	-11.00e-4	0.7605	0.761336	3
19.843e-4	0.632	0.630745	17	4.332e-4	0.7605	0.760170	4
17.937e-4	0.573	0.571972	18	11.808e-4	0.76	0.759102	5
-13.695e-4	0.499	0.499683	19	11.659e-4	0.759	0.758115	6
-17.427e-4	0.413	0.413719	20	-2.403e-4	0.757	0.757181	7
-33.057e-4	0.3165	0.317546	21	10.066e-4	0.757	0.756237	8
-6.522e-4	0.212	0.212138	22	4.309e-4	0.7555	0.75517	9
126.71e-4	0.1035	0.102188	23	3.656e-4	0.754	0.753724	10
0.12274	-0.01	-0.008772	24	-12.088e-4	0.7505	0.75140	11
-0.02063	-0.123	-0.125538	25	-10.927e-4	0.7465	0.747315	12
76.263e-4	-0.21	-0.208398	26	-20.699e-4	0.7385	0.740028	13

جدول ۷ داده‌های تجربی و محاسبه شده جریان به همراه خطای نسبی برای یک سلول خورشیدی تجاری سیلیکونی با قطر ۵۷ میلی‌متر برای مدل سه دیودی

خطای نسبی	I_L (A) اندازه‌گیری شده	I_L (A) محاسبه شده	خطای نسبی	اندازه‌گیری	I_L (A) محاسبه شده	I_L (A) اندازه‌گیری شده	خطای نسبی
11.692e-4	0.728	0.764	1.390e-4	14	0.727148	0.763893	خطای نسبی
-3.607e-4	0.7065	0.762	-7.223e-4	15	0.706754	0.762550	اندازه‌گیری
5.218e-4	0.6755	0.7605	-10.742e-4	16	0.675147	0.761316	
19.823e-4	0.632	0.7605	4.169e-4	17	0.630747	0.760182	
16.952e-4	0.573	0.76	11.276e-4	18	0.572028	0.759142	
-15.401e-4	0.499	0.759	10.823e-4	19	0.499768	0.758178	
-19.201e-4	0.413	0.757	-3.449e-4	20	0.413793	0.757261	
-34.043e-4	0.3165	0.757	8.950e-4	21	0.317577	0.756322	
-5.207e-4	0.212	0.7555	3.309e-4	22	0.212110	0.755249	
134.14e-4	0.1035	0.754	3.000e-4	23	0.102111	0.753773	
1162.1e-4	-0.01	0.7505	-12.191e-4	24	-0.008837	0.751414	
-209.0e-4	-0.123	0.7465	-10.346e-4	25	-0.125570	0.747272	
80.375e-4	-0.21	0.7385	-19.484e-4	26	-0.208312	0.739938	

ارائه داده است. در معادله (۲۲)، خطای نسبی محاسبه شده برای داده‌ها آورده شده است:

خطای نسبی (RE)

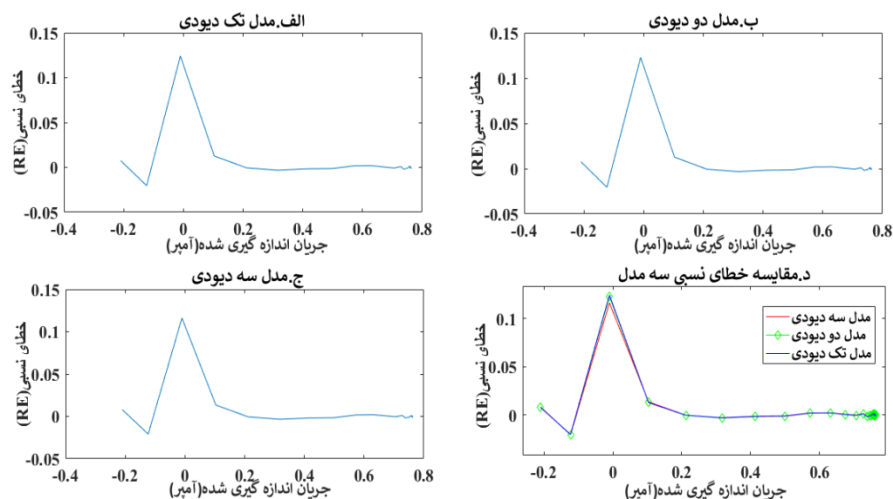
$$= \frac{I_C - I_L}{I_L} \quad \text{جریان محاسبه شده (I}_C\text{) - جریان اندازه‌گیری شده (I}_L\text{)}$$

(۲۲)

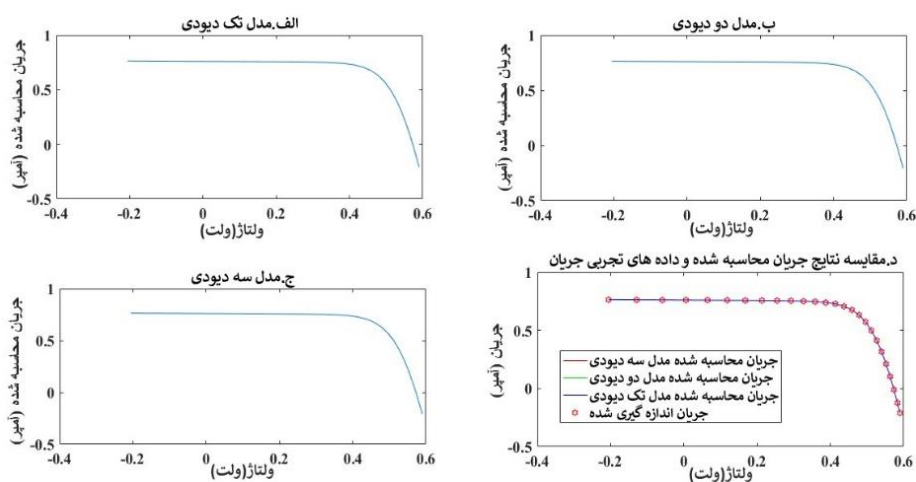
همچنین مشخصه‌های ولتاژ-جریان (I-V) و ولتاژ-توان (P-V) برای هر سه مدل تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی در قالب نمودار، به همراه نمودار مقایسه‌ای این دو مشخصه با داده‌های تجربی برای هر سه مدل (نمودارهای د-۵ و د-۶)، با استفاده از داده‌های تجربی و محاسباتی به منظور مقایسه اختلاف بین داده‌های تجربی و محاسباتی برای این دو مشخصه، به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده‌اند. همان طور که در شکل‌های (د-۵) و (د-۶) مشاهده می‌شود، مطابقت بسیار خوبی میان نتایج داده‌های تجربی و نتایج داده‌های محاسبه شده به کمک متغیرهای استخراج شده از روش الگوریتم شبکه عصبی برای هر دو مشخصه ولتاژ-جریان (V-I) و ولتاژ-توان (P-V) وجود دارد. این تطابق به این معناست که متغیرهای استخراج شده از الگوریتم شبکه عصبی برای هر سه مدل سلول خورشیدی دقت بسیار بالایی داشته و به مقادیر واقعی بسیار نزدیک می‌باشند.

همچنین می‌توان با استفاده از مقادیر به دست آمده از جریان محاسبه شده و مقادیر خطای نسبی برای هر جفت داده آزمایشگاهی که در جداول (۵) تا (۷) آورده شده‌اند، نمودار خطای نسبی برای مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای سه مدل سلول خورشیدی را ترسیم و همچنین با یکدیگر مقایسه کرد. در شکل (۴) نمودار خطای نسبی سه مدل سلول خورشیدی به همراه نمودار مقایسه‌ای آن‌ها در یک نمودار (نمودار د-۴) نمایش داده شده‌اند. همانطور که در نمودار (د-۴) دیده می‌شود، مقدار بیشینه متغیر خطای نسبی برای هر جفت داده تجربی جریان-ولتاژ و به تناظر آن هر جفت داده جریان اندازه‌گیری شده-جریان محاسبه شده در مجاورت جریان اندازه‌گیری شده صفر آمپر اتفاق می‌افتد.

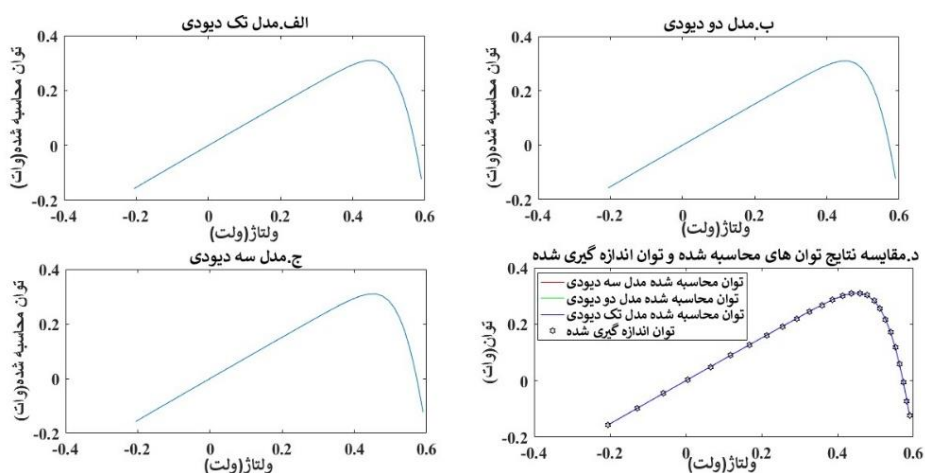
این مقدار خطای نسبی در جریان محاسبه شده برای هر سه مدل به این معناست که در مجاورت جریان صفر آمپر در عمل یا در اندازه‌گیری پدیده تکنیکی اتفاق می‌افتد و مقدار جریان محاسبه شده با جریان اندازه‌گیری شده در این محدوده بیشترین اختلاف را داراست و مدل‌ها در این محدوده نیازمند اصلاح می‌باشند. همچنین در نمودار (د-۴) مشاهده می‌شود که میزان خطای نسبی مدل سه دیودی از دو مدل دیگر در مجاورت جریان صفر آمپر پایین‌تر است و مقادیر محاسبه شده از این مدل به مقادیر واقعی یا اندازه‌گیری شده نزدیک هستند و یعنی مدل سه دیودی مدل‌سازی دقیق تری را نسبت به دو مدل دیگر



شکل ۴ نمودار خطای نسبی (RE-I) برای مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده مدل: الف) تک دیودی، ب) دو دیودی، ج) سه دیودی، و د) مقایسه خطای نسبی هر سه مدل در یک نمودار



شکل ۵ نمودارهای مشخصه ولتاژ-جریان محاسبه شده (I-V) برای الف) مدل تک دیودی، ب) مدل دو دیودی، ج) مدل سه دیودی، و د) مقایسه جریان‌های محاسبه شده هر سه مدل با جریان اندازه‌گیری شده



شکل ۶ نمودارهای مشخصه ولتاژ-توان محاسبه شده (P-V) برای الف) مدل تک دیودی، ب) مدل دو دیودی، ج) مدل سه دیودی، و د) مقایسه جریان‌های محاسبه شده هر سه مدل با جریان اندازه‌گیری شده

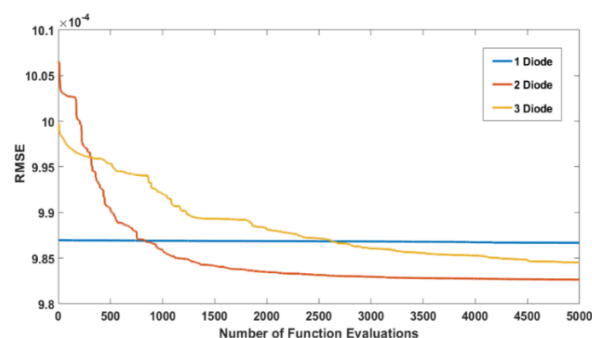
بهینه‌سازی ارائه دهد. الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای طراحی و مجهول یک سلول خورشیدی با قطر ۵۷ میلی‌متر (R.T.C. فرانسه) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی کاملاً امیدوارکننده بوده و بر نتایجی که از منابع گزارش شده است، غلبه می‌کند. در هر ۳ مدل دیودی، الگوریتم شبکه عصبی جواب‌های دقیق‌تر و بهینه‌تری را پیشنهاد داده است. این امر به ویژه در مدل دو و سه دیودی که تعداد پارامترهای مجهول طراحی بیشتر است (پیچیدگی غیرخطی مسئله بالاتر است) بارزتر است که نشان از عملکرد موفق الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل پیچیده‌تر با ماهیت غیرخطی دارد. در نتیجه، الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی می‌تواند جایگزین خوبی برای حل مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های سلول خورشیدی قلمداد شود. به عنوان تحقیقات آتی، با بهبود راندمان عملگرهای جستجوی الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی، می‌توان به دقت‌های بالاتری دست یافت. همچنین، از مدل‌های سلول خورشیدی با تعداد دیود بیشتر (پیچیده‌تر شدن مسئله بهینه‌سازی) نیز می‌توان استفاده کرد. استفاده از چندین تابع هدف علاوه بر بالا بردن دقت مدل سلول خورشیدی از قبیل کاهش مصرف انرژی، کاهش ابعاد سیستم، می‌توان مدل‌های بهینه‌سازی چند هدفه واقعی‌تر و کاربردی‌تری در این حوزه تحقیقاتی فعال و اثرگذار تعریف کرد.

واژه نامه

Solar cell	سلول خورشیدی
Optimization	بهینه‌سازی
Metaheuristics	الگوریتم‌های فراابتکاری

تقدیر و تشکر

همچنین فرایند هم‌گرایی به سمت جواب بهینه در الگوریتم شبکه عصبی (NNA) برای مدل تک، دو، و سه دیودی برای ۵۰۰۰ بار تکرار در نمودار شکل (۷) به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، سرعت بالای هم‌گرایی روش NNA در مقدار تابع در مراحل ابتدایی نشان از سرعت و دقت این روش بهینه‌سازی برای حل مسائل بهینه‌سازی در صنعت سلول‌های خورشیدی دارد. همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، در مدل تک دیودی به دلیل تعداد کم متغیرهای طراحی و ساده‌تر بودن مدل بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی در همان تکرارهای اول جواب بهینه جهانی را به دست آورده و تا انتهای تکرار تغییرات جزئی بر روی جواب بهینه اعمال کرده است. در صورتی که این روند برای مدل‌های بهینه‌سازی دو و سه دیودی دیده نمی‌شود که نشان از پیچیده‌تر شدن فضای جستجو دارد.



شکل ۷ فرایند هم‌گرایی و روند کاهشی تابع هدف توسط الگوریتم شبکه عصبی (NNA) برای شناسایی پارامترهای مجهول در مدل‌های تک دیودی، دو دیودی، و سه دیودی

نتیجه‌گیری و کارهای آتی

در این مقاله، الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی (Neural Network Algorithm, NNA) برای به دست آوردن نتایج دقیق مدل‌های تک، دو، و سه دیودی سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته است. الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی با ایده گرفتن از ساختار منحصر به فرد شبکه‌های عصبی در مغز انسان توانسته است یک مدل بهینه‌سازی کارا برای حل مسائل

مراجع

- [1] Arshad, M. "Clean and sustainable energy technologies." In *Clean energy for sustainable development*, pp. 73-89. Academic Press (2017).

- [2] Q. Li, S. Yu, A. S. Al-Sumaiti, K. Turitsyn, "Micro Water-Energy Nexus: Optimal Demand-Side Management and Quasi-Convex Hull Relaxation", *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 1313-1322, (2018).
- [3] B. Mohandes, S. Acharya, M. S. El Moursi, A. S. Al-Sumaiti, H. Doukas, S. Sgouridis, "Optimal Design of an Islanded Microgrid with Load Shifting Mechanism Between Electrical and Thermal Energy Storage Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 2642-2657, (2020).
- [4] T. Ma, H. Yang, L. Lu, "Solar Photovoltaic System Modeling and Performance Prediction", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 36, pp. 304-315, (2014).
- [5] A. Al-Sumaiti, M. H. Ahmed, S. Rivera, M. S. El Moursi, M. M. A. Salama, T. S. Alsumaiti, "A Stochastic PV Model for Power System Planning Applications", *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 16, pp. 3168-3179, (2019).
- [6] V. Lo Brano, A. Orioli, G. Ciulla, A. Di Gangi, "An Improved Five-Parameter Model for Photovoltaic Modules", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, no. 8, pp. 1358-1370, (2010).
- [7] A. S. Al-Sumaiti, M. M. A. Salama, S. Reddy, A. Kavousi-Fard, "A Guided Procedure for Governance Institutions to Regulate Funding Requirements of Solar PV Projects", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 54203-54217, (2019).
- [8] B. Amrouche, A. Guessoum, M. Belhamel, "A Simple Behavioural Model for Solar Module Electric Characteristics Based on the First Order System Step Response for MPPT study and comparison", *Applied Energy*, vol. 91, no. 1, pp. 395-404, (2012).
- [9] A. Orioli, A. Di Gangi, "A Procedure to Calculate the Five-Parameter Model of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules on the Basis of the Tabular Performance Data", *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1160-1177, (2013).
- [10] L. Sandrolini, M. Artioli, U. Reggiani, "Numerical Method for the Extraction of Photovoltaic Module Double-Diode Model Parameters Through Cluster Analysis", *Applied Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 442-451, (2010).
- [11] F. Bonanno, G. Capizzi, G. Graditi, G. Napoli, G. M. Tina, "A Radial Basis Function Neural Network Based Approach for the Electrical Characteristics Estimation of A Photovoltaic Module", *Applied Energy*, vol. 97, pp. 956-961, (2012).
- [12] V. Khanna, B. k. Das, D. Bisht, D. Singh, vandana, P. K. Singh, "A Three Diode Model for Industrial Solar Cells and Estimation of Solar Cell Parameters Using PSO Algorithm", *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 105-113, (2015).
- [13] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, C. Boutrit, "Nonlinear Minimization Algorithm for Determining the Solar Cell Parameters with Microcomputers", *International journal of Solar Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 1-12, (1986).
- [14] A. Jain, A. Kapoor, "Exact Analytical Solutions of the Parameters of Real Solar Cells Using Lambert W-Function", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 81, no. 2, pp. 269-277, (2004).
- [15] S. Haneefa, S. Karmalkar, "An Analytical Method to Extract the Physical Parameters of a Solar Cell From Four Points on the Illuminated J-V Curve", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 349-352, (2009).
- [16] D. S. H. Chan, J. R. Phillips, J. C. H. Phang, "A Comparative Study of Extraction Methods for Solar Cell Model Parameters", *Solid-State Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 329-337, (1986).
- [17] H. Wei, J. Cong, X. Lingyun, S. Deyun, "Extracting Solar Cell Model Parameters Based on Chaos Particle Swarm

- Algorithm”, *International conference on electric information and control engineering, IEEE, Wuhan*, pp. 398-402, 15-17 April, (2011).
- [18] M. R. AlRashidi, M. F. AlHajri, K. M. El-Naggar, A. K. Al-Othman, “A New Estimation Approach for Determining the I-V Characteristics of Solar Cells”, *Solar Energy*, vol. 85, no. 7, pp. 1543-1550, (2011).
- [19] K. M. El-Naggar, M. R. AlRashidi, M. F. AlHajri, A. K. Al-Othman, “Simulated Annealing Algorithm for Photovoltaic Parameters Identification”, *Solar Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 266-274, (2012).
- [20] M. Gómez, M. López, F. Jurado, “Optimal Placement and Sizing From Standpoint of the Investor of Photovoltaics Grid-Connected Systems Using Binary Particle Swarm Optimization”, *Applied Energy*, vol. 87, no. 6, pp. 1911-1918, (2010).
- [21] O. Ekren, B. Y. Ekren, “Size Optimization of A PV/Wind Hybrid Energy Conversion System with Battery Storage Using Simulated Annealing”, *Applied Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 592-598, (2010).
- [22] C. R. S. Reinoso, M. Cutrera, M. Battioni, D. Milone, R. Buitrago, “Photovoltaic Generation Model as a Function of Weather Variables Using Artificial Intelligence Techniques”, *International journal of hydrogen energy*, vol. 37, no. 19, pp. 14781-14785, (2012).
- [23] T. Niknam, S. I. Taheri, J. Aghaei, S. Tabatabaei, M. Nayeripour, “A Modified Honey Bee Mating Optimization Algorithm for Multiobjective Placement of Renewable Energy Resources”, *Applied Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4817-4830, (2011).
- [24] T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, E. E. Ekoh, “Evaluation of Numerical Algorithms Used in Extracting the Parameters of a Single-Diode Photovoltaic Model”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 13, pp. 51-59, (2016).
- [25] D. Oliva, M. Abd Elaziz, A. H. Elsheikh, A. A. Ewees, “A Review on Meta-Heuristics Methods for Estimating Parameters of Solar Cells”, *Journal of Power Sources*, vol. 435, p. 126683, (2019).
- [26] G. Xiong, J. Zhang, X. Yuan, D. Shi, Y. He, “Application of Symbiotic Organisms Search Algorithm for Parameter Extraction of Solar Cell Models”, *Applied Sciences*, vol. 8, no. 11, pp. 2155, (2018).
- [27] C. Dai, W. Chen, Y. Zhu, “Seeker Optimization Algorithm for Digital IIR Filter Design”, *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 57, no. 5, pp. 1710-1718, (2009).
- [28] A. Sadollah, H. Sayyaadi, A. Yadav, “A Dynamic Metaheuristic Optimization Model Inspired By Biological Nervous Systems: Neural Network Algorithm”, *Applied Soft Computing*, vol. 71, pp. 747-782, (2018).
- [29] J. S. Chohan, N. Mittal, R. Kumar, S. Singh, S. Sharma, J. Singh, K. V. Rao, M. Mia, D. Y. Pimenov, S. P. Dwivedi, “Mechanical Strength Enhancement of 3D Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer Components Using Neural Network Optimization Algorithm”, *Polymers*, vol. 12, no. 10, pp. 2250, (2020).
- [30] M. S. AbouOmar, H-J. Zhang, Y. Su, “Fractional Order Fuzzy PID Control of Automotive PEM Fuel Cell Air Feed System Using Neural Network Optimization Algorithm”, *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1435, (2019).
- [31] M. Fawzi, A. El-Fergany, H. M. Hasanien, “Effective Methodology Based on Neural Network Optimizer for Extracting Model Parameters of PEM Fuel Cells”, *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 14, pp. 8136-8147, (2019).

- [32] Y. Zhang, Z. Jin, Y. Chen, "Hybrid Teaching–Learning-Based Optimization and Neural Network Algorithm for Engineering Design Optimization Problems", *Knowledge-Based Systems*, vol. 187, pp. 104836, (2020).
- [33] Z. Yiying, Z. Jin, Y. Chen, "Hybridizing Grey Wolf Optimization with Neural Network Algorithm for Global Numerical Optimization Problems", *Neural Computing and Applications*, vol. 32, pp. 10451-10470, (2020).
- [34] D. Khurana, A. Yadav, A. Sadollah, "A Non-Dominated Sorting Based Multi-Objective Neural Network Algorithm", *MethodsX*, vol. 10, pp. 102152, (2023).
- [35] D. C. Montgomery, C. St, "Design and Analysis of Experiments", *John Wiley and Sons*, (2005).
- [36] A. Askarzadeh, A. Rezazadeh, "Artificial Bee Swarm Optimization Algorithm for Parameters Identification of Solar Cell Models", *Applied Energy*, vol. 102, pp. 943-949, (2013).
- [37] M. AlHajri, K. El-Naggar, M. AlRashidi, A. Al-Othman, "Optimal Extraction of Solar Cell Parameters Using Pattern Search", *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 238-245, (2012).
- [38] A. Askarzadeh, A. Rezazadeh, "Parameter Identification for Solar Cell Models Using Harmony Search-Based Algorithms", *Solar Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 3241-3249, (2012).
- [39] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer", *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, (2014).
- [40] S. Mirjalili, "Moth-Flame Optimization Algorithm: A Novel Nature-Inspired Heuristic Paradigm", *Knowledge-based systems*, vol. 89, pp. 228-249, (2015).
- [41] D. Oliva, M. Abd El Aziz, A. E. Hassanien, "Parameter Estimation of Photovoltaic Cells Using an Improved Chaotic Whale Optimization Algorithm", *Applied Energy*, vol. 200, pp. 141-154, (2017).
- [42] S. Mirjalili, "SCA: A Sine Cosine Algorithm for Solving Optimization Problems", *Knowledge-based systems*, vol. 96, pp. 120-133, (2016).
- [43] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Hatamlou, "Multi-Verse Optimizer: A Nature-Inspired Algorithm for Global Optimization", *Neural Computing and Applications*, vol. 27, pp. 495-513, (2016).
- [44] S. Mirjalili, "The Ant Lion Optimizer", *Advances in Engineering Software*, vol. 83, pp. 80-98, (2015).
- [45] E. H. Houssein, G. N. Zaki, A. A. Z. Diab, E. M. G. Younis, "An Efficient Manta Ray Foraging Optimization Algorithm for Parameter Extraction of Three-Diode Photovoltaic Model", *Computers & Electrical Engineering*, vol. 94, pp. 107304, (2021).

CONTENTS

Investigating the Effect of Process Parameters and Optimization of Bending Angle in Laser Bending	Aliakbar Asgharpour - Mohammad Bakhshi-Jooybari Hamid Gorji	1
Derivation of Aerodynamic Characteristics of a Ribbon Parachute by Truck Tow Test	Mohammad Reza Salimi - Amir Hamzeh Farajollahi Amir Hosein - Mohseni kafshgarkolae Mahmood Ayoobi	25
Investigating the Effect of Optimizing External Skins and Translucent Walls on Reducing Energy Consumption and Investment Return Time of Educational Buildings in a Temperate Climate with Dry and Very Hot Summers	Amir Yarinezhad - Abbas Mahravan	41
Experimental and Theoretical Investigation of Young's Modulus of Breast Cancer Tissue (MCF-10) Using Different Cantilevers of Atomic Force Microscope	Moein Taheri - Ali Jabbari - Zahrasadat Eghdami Hamed Faraji - Nima Rahmani	61
Implementation of Gibbs-Appell Method in Dynamic Analysis of a Novel Serial-Parallel Hybrid Robot PP-(3RSS-PS)	Seyed Nader Nabavi - Javad Enferadi	77
Design, Construction and Experimental Investigation of Parabolic Solar Cooker Performance	Nasser Baharlou-Houreh - Ali Sadeghi Saeed Golshadi	93
A High Accuracy Method for Solving the Differential-Algebraic Equations Arising in Mechanical Systems	Faezeh Kalantari - Mohammad Ali Mehrpouya Nabi Chegini	107
Parameter Optimization of Various Solar Cell Models by Neural Network Algorithm	Ali Sadollah - Javad Riazat	123



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

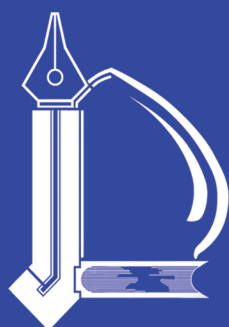
Tel: +98 51 38806024

Fax: +98 51 38763301

Email: ejour@um.ac.ir

Web site: <http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir>

Indexed in: ISC, SID, Magiran, EBSCO, DOAJ



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of
Applied and
Computational Sciences
in Mechanics

Serial No. 35

ISSN 2008 - 918X

Investigating the Effect of Process Parameters and Optimization of Bending Angle in Laser Bending Aliakbar Asgharpour - Mohammad Bakhshi-Jooybari Hamid Gorji	1
Derivation of Aerodynamic Characteristics of a Ribbon Parachute by Truck Tow Test Mohammad Reza Salimi - Amir Hamzeh Farajollahi Amir Hosein - Mohseni kafshgarkolae Mahmood Ayoobi	25
Investigating the Effect of Optimizing External Skins and Translucent Walls on Reducing Energy Consumption and Investment Return Time of Educational Buildings in a Temperate Climate with Dry and Very Hot Summers Amir Yarinezhad - Abbas Mahravan	41
Experimental and Theoretical Investigation of Young's Modulus of Breast Cancer Tissue (MCF-10) Using Different Cantilevers of Atomic Force Microscope Moein Taheri -Ali Jabbari - Zahrasadat Eghdami Hamed Faraji - Nima Rahmani	61
Implementation of Gibbs-Appell Method in Dynamic Analysis of a Novel Serial-Parallel Hybrid Robot PP-(3RSS-PS) Seyed Nader Nabavi - Javad Enferadi	77
Design, Construction and Experimental Investigation of Parabolic Solar Cooker Performance Nasser Baharlou-Houreh - Ali Sadeghi Saeed Golshadi	93
A High Accuracy Method for Solving the Differential-Algebraic Equations Arising in Mechanical Systems Faezeh Kalantari - Mohammad Ali Mehrpouya Nabi Chegini	107
Parameter Optimization of Various Solar Cell Models by Neural Network Algorithm Ali Sadollah - Javad Riazat	123

Vol. 36, No.1
Spring 2024