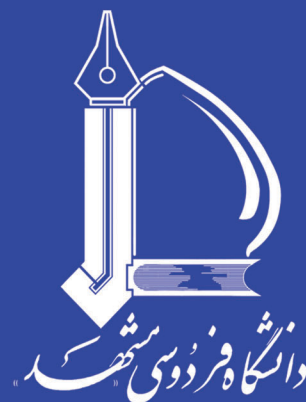




نشریه علوم کاربردی و محاسباتی

در مکانیک

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۳۹

- ۱ شبیه‌سازی عددی اثرات سرعت و هندسه ورودی
بر هیدرودینامیک جریان آشفته گاز - جامد در
یک رآکتور بستر سیالی
مرتضی رحمانپور - سینا شناور - امیر سرورالدین آبادی
- ۱۷ شبیه‌سازی عددی اختلاط سیالات ویسکوالاستیک
در یک میکرومیکسر T-Y شکل
فاطمه خلیلیان - مرتضی بیاره
- ۲۹ مدل الکترومکانیک - رشد برای شبیه‌سازی
هایپر تروپی کانستریک میوکاردیوم در افزایش
فشارخون سیستمیک
سهیلا شبانی - اکبر اللهوردی زاده - پژمان نمه شیری
- ۵۳ بهینه‌سازی مسائل مهندسی با قيود گسسته و پیوسته
به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری تطبیقی پویا
سیدمصطفی موسوی - علیرضا طلوعی - محمدحسین طلوعی
- ۷۱ شبیه‌سازی کوپلینگ لوله حرارتی - پیل سوختی
غشا پلیمری و بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر
عملکرد حرارتی پیل سوختی
ابراهیم افشاری - مهدی مرتضوی بک - الناز زهروی
- ۹۱ ارزیابی تأثیر سایه‌انداز متحرک داخلی و ثابت
خارجی بر مصرف انرژی یک ساختمان اداری در
اقلیم کرمان
سید محمدرضا موسوی مطلقیان - سید محمدحجت محمدی
ابراهیم جهانشاهی جواران
- ۱۰۷ پیاده‌سازی کنترل مقاوم مود لغزشی تطبیقی
جهت پایداری سازی خودروی الکتریکی موتور در
چرخ در شرایط اضطراری
محمد امین قماش - رضا کاظمی



نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

ISSN: 2008-918X

مدیر مسئول: دکتر حمید نیازمند

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

هیئت تحریریه:

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

ویرایش و صفحه آرایی: سیده عاطفه نوعی

ویراستار: الهام دهقان

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

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

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

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

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

فهرست مطالب

- | | | |
|-----|--|--|
| ۱ | مرتضی رحمانپور - سینا شناور - امیر سرورالدین آبادی | شبیه‌سازی عددی اثرات سرعت و هندسه ورودی بر هیدرودینامیک جریان آشفته گاز - جامد در یک رآکتور بستر سیالی |
| ۱۷ | فاطمه خلیلیان - مرتضی بیاره | شبیه‌سازی عددی اختلاط سیالات ویسکوالاستیک در یک میکرومیکسر T-Y شکل |
| ۲۹ | سهیلا شبانی - اکبر اللهوردی زاده - پژمان نمه شیرینی | مدل الکترومکانیک - رشد برای شبیه‌سازی هایپرتروفی کانستریک میوکاردیوم در افزایش فشارخون سیستمیک |
| ۵۳ | سیدمصطفی موسوی - علیرضا طلوعی
محمدحسین طلوعی | بهینه‌سازی مسائل مهندسی با قيود گسسته و پیوسته به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری تطبیقی پویا |
| ۷۱ | ابراهیم افشاری - مهدی مرتضوی بک
الناز زهروی | شبیه‌سازی کوبلینگ لوله حرارتی - پیل سوختی غشا پلیمری و بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد حرارتی پیل سوختی |
| ۹۱ | سید محمدرضا موسوی مطلقیان
سید محمدحجت محمدی - ابراهیم جهانشاهی جواران | ارزیابی تأثیر سایه‌انداز متحرک داخلی و ثابت خارجی بر مصرف انرژی یک ساختمان اداری در اقلیم کرمان |
| ۱۰۷ | محمد امین قماش - رضا کاظمی | پیاده‌سازی کنترل مقاوم مود لغزشی تطبیقی جهت پایداری خودروی الکتریکی موتور در چرخ در شرایط اضطراری |

Numerical Simulation of the Effects of Inlet Velocity and Geometry on the Hydrodynamics of Turbulent Gas-Solid Flow in a Fluidized Bed Reactor*

Research Article

Morteza Rahmanpour¹ , Sina Shenavar², Amir Sorouradin Abadi³

 [10.22067/jacsm.2024.87722.1250](https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.87722.1250)

1- Abstract

In this article, turbulent-gas two-phase in a fluidized bed is investigated and solved. In order to study the above effect, a reactor with different shapes and geometries has been considered and the effect of reactor shapes on the expansion volume of the solid bed has been investigated. The fluidized bed reactor is a type of reactors that can be used to perform multiphase chemical reactions, as well as in the field of producing gasoline and other fuels, many polymers such as rubber, vinyl chloride, polyethylene and styrene, nuclear energy units, burning coal, water purification units, The catalytic cracking process is also used as a dryer. In the inclined fluidized bed, the fluid velocity increases, which increases the product recovery and removes the dried product from the bed. The velocity of phases and particles inside the bed also increases and shows changes in the velocity profile of the solid. Increasing the column diameter decreases the axial solids velocity and smaller particle sizes have more discharge. Increasing the height of the bed reduces the static pressure and increases the frictional pressure. For this purpose, computational fluid dynamics is considered as a useful tool and the most likely method for correct prediction and optimization. In the present research, due to the expensiveness of the experimental method and the lack of equipment, numerical solutions were used.

Keyword: Multiphase flows, gas-solid, fluidized bed reactor, turbulent flow, gas dryers

2- Introduction

Gas-solid fluidized bed reactors are widely used in various biomass thermochemical processes due to their advantages, such as efficient gas-solid contact, high heat transfer rates, and uniform temperature distribution. To facilitate the fluidization of biomass particles and enhance process efficiency, an inert medium or catalyst is introduced. However, the addition of an inert medium or

catalyst can lead to complex fluid dynamics within the fluidized bed due to mixing and separation phenomena. Mixing and segregation are competing mechanisms that govern particle distribution and flow patterns. Circulating fluidized bed reactors are commonly employed for gas-solid reactions in the energy industry and are classified based on fluidization regimes. However, the concept of fluidization involving circulating gas-solid density is not well understood, which poses a challenge to its commercial application.

To improve understanding, an investigation was conducted on circulating gas-solid dual fluidization. Solids mixing in fluidized beds heavily depends on bubble movement. Bubbles formed at the bottom rise, carrying particles upward, and distribute them upon bursting. The particle transport mechanism and particle diffusion mechanism are the primary models used to quantify solids mixing in fluidized beds. However, limited research has been conducted on the effect of bubble motion on solids mixing in binary particle systems.

Various types of reactors and operating conditions can give rise to different multiphase flow behaviors. Multiphase flows involve interactions among different physical phases, such as gas, liquid, and solid, each responding to external forces and mutual interactions. For instance, solid particles of the same material but varying in size can be considered different phases, as each size group exhibits a distinct dynamic response to the flow field.

3- Basics and Methods

3-1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational fluid dynamics (CFD) has emerged as a powerful tool in fluid mechanics, enabling the prediction of fluid flow, heat transfer, and chemical reactions through mathematical modeling. As a specialized branch of fluid mechanics, CFD employs numerical methods to solve a broad spectrum of flow-related problems, providing

*Manuscript received April 21, 2024. Revised May 29, 2024, Accepted, August 9, 2024.

¹ Corresponding Author: Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran. Email: ac.rahmanpour@azaruniv.ac.ir

² MSc. Student, Mechanical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

³ Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

invaluable engineering insights for design optimization and troubleshooting.

3-2 Problem Definition, Conditions, and Solution Methods

This study aims to numerically investigate turbulent solid-gas two-phase flow in a fluidized bed. Different reactor geometries will be modeled to examine the effects of parameters such as particle size, reactor shape, inlet velocity, and initial porosity on solid bed expansion. The model assumes an incompressible solid phase and air. Initially, the particles are spherical, uniform in size, and at rest, forming an optimal height within the bed. A vertical cylindrical channel is employed, with the air phase entering from the bottom to initiate fluidization.

The utilization of three-dimensional (3D) geometry has become an integral component in the construction of

computational grids for numerical simulations. In the given context, a hexagonal structure is employed to generate a computational grid comprising 880 thousand cells. This approach is notable for its numerical solution, which remains independent of the cell number and dimensions, a desirable characteristic for ensuring reliable and consistent results.

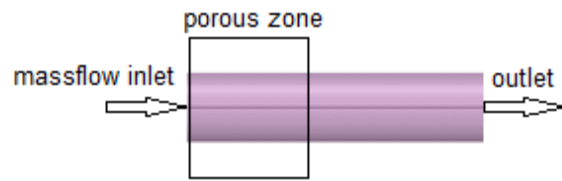


Fig. 1. Schematic geometry of the problem

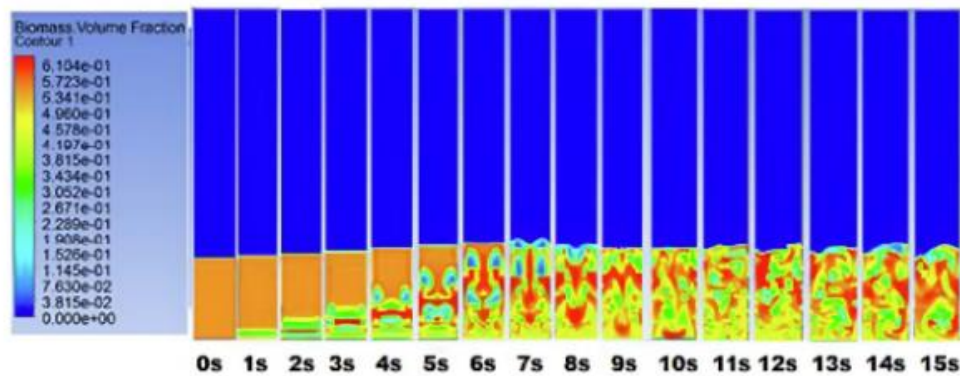


Fig.2. Volume fraction of biomass, speed 0.1 m/s, 15 seconds

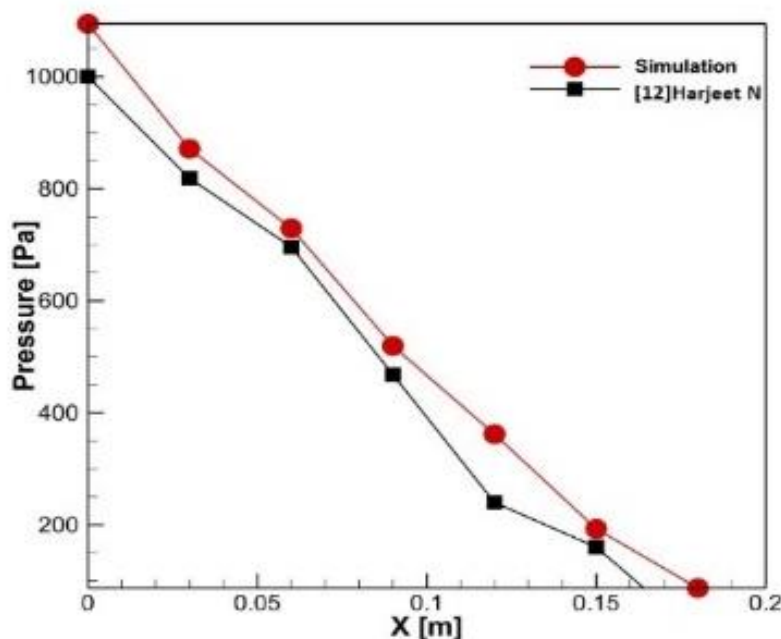


Fig.3. Comparison of bed pressure drop with fluid bed column height for inlet air velocity of 0.1 m/s

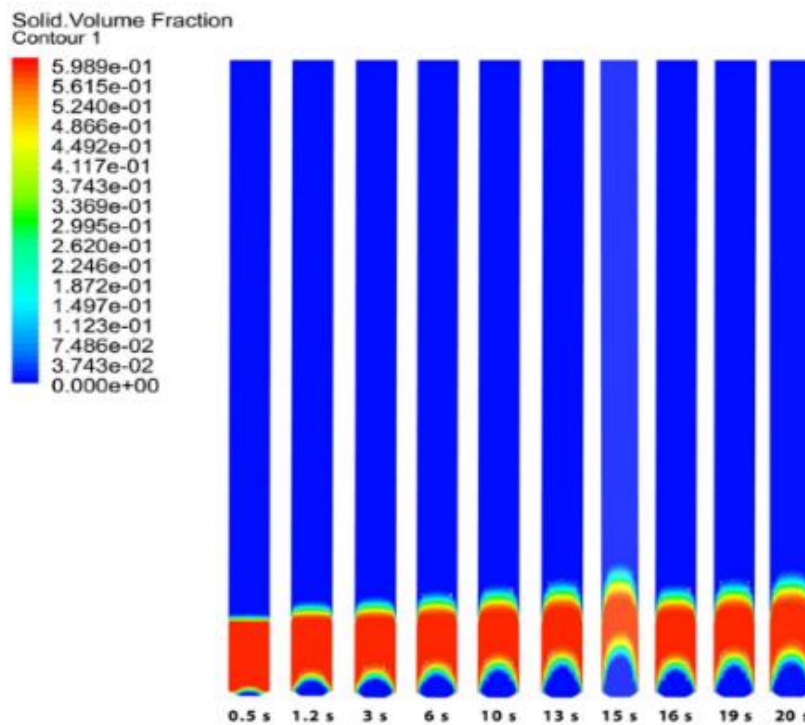


Fig.4. Volume fraction distribution in the conical inlet

4- Results

4-1- Examining the effects of different input speeds

The present study investigates the behavior of a solid gas fluid bed under varying inlet gas velocities through a hydrodynamic simulation. The Eulerian multiphase model was employed to capture the complex interactions between the gas and solid phases within the column.

The computational results with the experimental and simulated results are shown in Figure 3, which behaves according to the computational data.

4-2- Examining the effects of reactor geometry

The problem will be examined from a geometrical perspective. Factors like reactor shape and gas flow rate are crucial in fluidization reactor design. Reactor shape maintains particle-gas contact speed during fluidization. Gas flow rate affects the formation of fluid patterns. The study uses a three-dimensional cylinder reactor geometry shown in Figure 4.

5- Conclusion

It is obvious that the minimum fluidization speed has increased in steep inlet conditions. Regarding the effect of geometry, this type of fluidized bed leads to higher values of product recovery and lower values of accumulated mass because the higher air-drying speed increases the movement of particles within the bed. Increasing the erosion effect leads to the removal of the dried product from the bed. The velocity of the phases in the center area is higher than near the wall. The velocity profile of the solid in the fluidized bed increases at the beginning and then decreases with the decrease of the amplitude and shows an oscillatory behavior. This means that for a given

initial state, the velocity reaches a maximum only once after the onset of liquefaction. Compared to other phases in the cylindrical column, the velocity of the gas phase is the maximum in the column. Smaller particles move faster than larger particles under the same conditions in the fluid bed. The axial solid velocity in the small diameter column is higher than the large diameter column. Smaller particle size has more bed discharge than larger particle size. Static pressure decreases with increasing bed height. By increasing the height of the bed, the frictional pressure drop in the wall has decreased. Frictional pressure drop is a strong function of fluid velocity, as the pressure drop is greater for high fluid velocity. The energy input to the system increases with the velocity of the liquid, and the net energy difference, which must account for the energy lost in the system, increases with both the gas velocity and the liquid velocity. The axial velocity of the solid along the radial coordinate for the column has been verified by experimental work. Also, the ratio of bed expansion and liquid retention for different particle sizes is also consistent with experimental works.



شبیه‌سازی عددی اثرات سرعت و هندسه ورودی بر هیدرودینامیک جریان آشفته گاز - جامد در یک رآکتور بستر سیالی*

مقاله پژوهشی

امیر سرورالدین آبادی^(۳)

سینا شناور^(۲)

مرتضی رحمانپور^(۱)

doi 10.22067/jacsm.2024.87722.1250

چکیده در این مقاله جریان دوفازی آشفته جامد - گاز در یک بستر سیالی بررسی و حل عددی شده است. به منظور مطالعه اثر فوق یک رآکتور با شکل و هندسه‌های مختلف در نظر گرفته شده و اثر پارامترهای شکل رآکتور بر میزان انبساط حجمی بستر جامد بررسی شده است. رآکتور بستر سیال یکی از انواع رآکتور است که می‌تواند برای انجام واکنش‌های شیمیایی چند فازیه همچنین در زمینه تولید بنزین و دیگر سوخت‌ها، بسیاری از پلیمرها مانند لاستیک، کلرید وینیل، پلی‌اتیلن و استایرن، واحدهای انرژی هسته‌ای، سوزاندن زغال سنگ، واحد تصفیه آب، فرایند کراکینگ کاتالیستی و همچنین به عنوان خشک‌کن به کار رود. در بستر سیال شیب‌دار، سرعت سیال افزایش می‌یابد که باعث افزایش بازیابی محصول و حذف محصول خشک شده از بستر می‌شود. سرعت فازها و ذرات درون بستر نیز افزایش می‌یابد و تغییرات در پروفیل سرعت جامد را نشان می‌دهد. افزایش قطر ستون، سرعت جامد محوری را کاهش می‌دهد و اندازه ذرات کوچک‌تر دارای تخلیه بیشتری است. افزایش ارتفاع بستر، فشار استاتیک را کاهش و فشار اصطکاکی را افزایش می‌دهد. برای این منظور دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری مفید و محتمل‌ترین روش برای پیش‌بینی صحیح و بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر نیز به دلیل هزینه‌بر بودن روش تجربی و کمبود تجهیزات به حل عددی اکتفا شده است.

واژه‌های کلیدی جریان‌های چند فازیه، گاز - جامد، رآکتور بستر سیالی، جریان آشفته، خشک‌کن‌های گازی.

مقدمه

دست‌کاری توزیع ذرات و الگوی جریان در نظر گرفته شده است [5]. رآکتورهای بستر سیال در گردش به طور گسترده برای چانه‌زنی با پاسخ‌های گاز - جامد در صنعت انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها را می‌توان به دو دسته با توجه به ترکیبی از تجویزهای سیال‌سازی طبقه‌بندی کرد. بستر سیال در گردش معمولی جایی برای بستر متراکم رقیق دارد. دو چگالی نشان می‌دهد که ذرات به طور ضخیم در بستر بالارونده (رایزر) و در حالت سیال شدن ضخیم یا بستر متحرک در بستر لغزش (پایین) سیال می‌شوند. با این حال، سرعت گاز در بستر صعود قابل توجه‌تر از سرعت گاز در بستر افت است. در مقایسه با بستر رقیق - چگال، بستر سیال گردشی گاز - جامد با دو چگالی ساختار بسیار فشرده‌تر و توسعه کمتری دارد. در هر صورت،

رآکتورهای بستر سیال شده با گاز - جامد به دلیل مزیت‌های آن‌ها در تماس مطلوب گاز جامد، ضریب انتقال حرارت بالا و مشخصات دمای یکنواخت، به طور گسترده‌ای در فرایندهای تبدیل حرارتی شیمیایی زیست توده مانند تجزیه در اثر حرارت، گازدهی، احتراق و مایع‌سازی مستقیم استفاده شده است [1,2]. به طور کلی، یک محیط بی‌اثر یا کاتالیزور به عنوان روان‌کننده برای تسهیل سیال شدن ذرات زیست توده و تشدید انتقال فرایند معرفی می‌شود [3,4]. با این حال، زمانی که محیط بی‌اثر یا کاتالیزور اضافه می‌شود، پدیده اختلاط/جداسازی مخلوط باینری منجر به پویایی مایع پیچیده در بستر سیال می‌شود. در نیم قرن گذشته، اختلاط و تفکیک به عنوان دو مکانیزم رقیب برای

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۲/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۴/۱۸ می‌باشد.

Email: ac.rahmanpour@azaruniv.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز.

(۳) استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز.

مفهوم سیال شدن دو چگالی گاز - جامد در گردش به خوبی توسط محققان این روزها درک نشده است، که به شدت از کاربرد تجاری آن جلوگیری می‌کند. برای تعمیق/ گسترش درک مردم، یک بررسی نقطه به نقطه در چارچوب سیال شدن دوگانه گاز - جامد در گردش انجام شد [6]. اختلاط مواد جامد به شدت به حرکت حباب در بسترهای سیال بستگی دارد [7]. حباب‌هایی که در بالای توزیع‌کننده شکل گرفته‌اند، ذرات را به بالای تخت حمل می‌کنند. با رسیدن به سطح، حباب فوران می‌کند و ذرات را توزیع می‌کند. از نظر تعادل جرم، ذرات مناطق دیگر بستر به سمت پایین حرکت می‌کنند تا جریان ذرات به سمت بالا و رانش حباب‌های در حال افزایش را جبران کنند. مکانیسم حمل و نقل ذرات و حباب و مکانیسم انتشار ذرات دو نوع اصلی از مدل‌ها برای تعیین کمی مخلوط مواد جامد در بستر سیال هستند [8].

مستوفی و چایوکی الگوهای کلی و محلی را برای توصیف مواد جامد مخلوط در سیال پیشنهاد داده‌اند [9]، با این حال، کار محدودی بر تأثیر حرکت حباب در اختلاط مواد جامد در سیستم ذرات باینری متمرکز شده است. بسته به نوع رآکتور سیال و نیز خواص سیالات، می‌توان انواع مختلفی را تحت اثر شرایط مختلف داشت. تعداد زیادی از جریان‌های فرایندی، مخلوطی از فازها هستند. فازهای فیزیکی مواد شامل گاز، مایع و جامد است. اما مفهوم فاز در سیستم جریان چند فازی به معنی گسترده‌تری به کار برده می‌شود. در جریان چندفازی، یک فاز، قسمتی از جریان است که قابلیت تفکیک آن وجود دارد و نسبت به میدان پتانسیلی که در آن قرار می‌گیرد پاسخ می‌دهد و با سایر فازها برهمکنش دارد؛ مثلاً ذرات جامد با اندازه‌های مختلف از همان ماده را می‌توان به عنوان فازهای متفاوت در نظر گرفت چون هر مجموعه ذرات با اندازه یکسان دارای عکس‌العمل دینامیکی مشابه به میدان جریان خواهند بود [7].

مبانی و روش‌ها

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

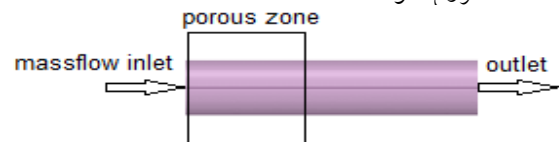
دینامیک سیالاتی محاسباتی دانش پیش‌بینی جریان سیال، انتقال گرما، انتقال جرم، واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های مربوطه با حل معادلات ریاضی حاکم بر این فرایندها با استفاده از یک فرایند عددی است. یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است که از روش‌های عددی و الگوریتم‌ها برای حل و تجزیه و تحلیل

مسائل مربوط به جریان سیال استفاده می‌کند [10]. دینامیک سیالات محاسباتی از روش‌های عددی برای حل این معادلات دیفرانسیل غیرخطی برای هندسه‌ها و شرایط مرزی از پیش تعریف شده به شکل خطی استفاده می‌کند. نتیجه برای هر منطقه‌ای است که جریان رخ می‌دهد و انبوهی از پیش‌بینی‌ها برای سرعت جریان، دما و نگر داشتن فاز، فشار و غیره است. نتیجه تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی داده‌های مهندسی مرتبط است که در مطالعات مفهومی طرح‌های جدید، توسعه دقیق محصول، عیب‌یابی و طراحی استفاده می‌شود [11]. مدل اولری پیچیده‌ترین مدل چندفازی در فلوئنت است. مجموعه‌ای از معادلات مومنتوم و پیوستگی را برای هر فاز حل می‌کند. جفت شدن از طریق ضرایب فشار و تبادل بین فاز حاصل می‌شود. نحوه کار با این مدل به نوع فازهای مربوط بستگی دارد. جریان‌های دانه‌ای (سیال - جامد) متفاوت از جریان‌های غیر دانه‌ای (سیال - سیال) اداره می‌شوند. برای جریان‌های دانه‌ای، مشخصات از تئوری جنبشی به دست می‌آیند. تبادل مومنتوم بین فازها نیز به نوع مخلوط مدل شده بستگی دارد. توابع تعریف شده توسط فلوئنت امکان شخصی‌سازی محاسبه تبادل مومنتوم را فراهم می‌کند. در کار حاضر از مدل اولری جریان دانه‌ای برای مدل‌سازی رآکتور بستر سیال استفاده شده است. این مدل پدیده‌های سیال‌سازی در بستر سیال را بهتر از سایر مدل‌های موجود توصیف می‌کند. رآکتورهای بستر سیال در گردش به طور گسترده برای چانه‌زنی با پاسخ‌های گاز - جامد در صنعت انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها را می‌توان با توجه به ترکیبی از تجویزهای سیال‌سازی، به دو دسته طبقه‌بندی کرد. بستر سیال در گردش معمولی جایی برای بستر متراکم رقیق دارد. دو چگالی نشان می‌دهد که ذرات به طور ضخیم در بستر بالارونده (رایزر) و در حالت سیال شدن ضخیم یا بستر متحرک در بستر لغزش (پایین) سیال می‌شوند. با این حال، سرعت گاز در بستر صعود قابل توجه‌تر از سرعت گاز در بستر افت است. در مقایسه با بستر رقیق - چگال، بستر سیال گردشی گاز - جامد با دو چگالی ساختار بسیار فشرده‌تر و توسعه کمتری دارد. در هر صورت، مفهوم سیال شدن دو چگالی گاز - جامد در گردش به خوبی توسط محققان این روزها درک نشده است، که به شدت از کاربرد تجاری آن جلوگیری می‌کند. برای تعمیق/ گسترش درک مردم، یک بررسی نقطه به نقطه در چارچوب سیال شدن دوگانه گاز -

جامد در گردش انجام شد.

تعریف مسئله، شرایط و روش‌های حل

هدف از مطالعه حاضر بررسی و حل عددی جریان دو فاز آشفته جامد - گاز در یک بستر سیالی می‌باشد. برای این منظور یک رآکتور با شکل‌های متفاوت مدل خواهند شد و اثر پارامترهای مختلف از جمله اندازه ذرات، شکل رآکتور، سرعت ورودی و تخلخل اولیه بر میزان انبساط حجمی بستر جامد بررسی خواهد گردید. در انجام این مدل‌سازی هر دو سیال جامد و هوا تراکم‌ناپذیر فرض شده‌اند. شکل اولیه ذرات کروی و یکنواخت و در لحظه اول در حالت سکون قرار دارد و یک ارتفاع مطلوب را در بستر تشکیل می‌دهد. کانال عمودی و استوانه‌ای شکل در نظر گرفته شده است. فاز هوا از پایین ستون وارد می‌شود تا سیال شدن شروع شود.

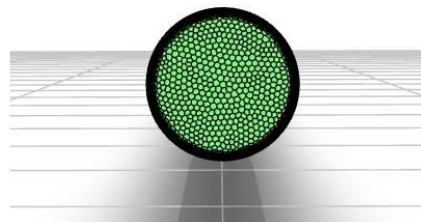


شکل ۱ هندسه شماتیک مسئله

هندسه سه‌بعدی ایجاد شده و به منظور ایجاد شبکه محاسباتی، سلول‌بندی شده است. در هندسه سه‌بعدی از شبکه‌بندی شش ضلعی با نوع عنصر hex / wedge استفاده و تعداد ۸۸۰ هزار سلول محاسباتی تولید شده است. البته لازم به ذکر است که استقلال حل عددی از تعداد و ابعاد سلول‌ها در پژوهش انجام شده و این شبکه‌بندی کفایت مطلوب را دارا بوده است.

به منظور دستیابی به یک سیستم معادلات مناسب، شرایط

مرزی منطقی برای دامنه محاسباتی باید اجرا شود. شرایط مرز ورودی سرعت یکنواخت گاز در شرایط مرز ورودی و خروجی شرایط مرزی فشار است که به صورت $1/0.13 \times 10^5$ پاسکال تنظیم شده است. شرایط مرز دیواری، شرایط مرزی بدون لغزش برای فاز جامد و لغزش آزاد برای جامد است. ضریب جریان جامد - جامد مقدار پیش فرض 0.9 گرفته شده است. برای داشتن حجمی از حجم جامد، از ماده جامد موجود در بخشی از ستون که در ابتدا دانه‌های شیشه به آن تغذیه می‌شود استفاده شده است. در شرایط اولیه از کسر حجم جامد 0.59 از ارتفاع بستر ساکن ستون استفاده شده است و کسر حجمی گاز در ورودی بر اساس موجودی موجود است. تجزیه و تحلیل تمرکز اصلی بر اساس ستون استوانه‌ای به ارتفاع $1/88$ متر است و پارامترهایی که در بستر سیال برای شبیه‌سازی و مطالعه هیدرودینامیکی موجود هستند در جدول (۱) ارائه شده است. معادلات دیفرانسیلی انتقالی حاکم قبل از اینکه حل شوند به معادلات جبری تبدیل می‌شوند. روش حجم محدود که شامل انتگرال‌گیری معادلات حاکم در مورد هر حجم کنترل است، بر معادلات گسسته شده (که بقای هر کمیت در حجم کنترل را تضمین می‌کنند) اعمال می‌شوند. معادلات حاکم توسط روش upwind گسسته می‌شوند. برای معادلات مومنتوم و از دقت مرتبه دوم و برای معادله کسر حجمی از دقت مرتبه اول استفاده شده است. محاسبات مربوط به مدل اولرین چندفازی توسط روش Phase Coupled SIMPLE انجام شده است. این روش همان الگوریتم SIMPLE است که برای جریان‌های چندفازی توسعه داده شده است. حل معادلات با استفاده از حل‌کننده Pressure Based و به صورت گذرا با گام زمانی 0.001 ثانیه انجام شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲ (الف) مش ستون استوانه‌ای نمای جانبی، (ب) بزرگ‌نمایی نمای مشبک مقطع

جدول ۱ پارامترهای فیزیکی و فرایند در ستون برای شبیه‌سازی

ارتفاع (m)	قطر (m)	چگالی جامد (kg/m ³)	میانگین اندازه ذرات (mm)	ارتفاع اولیه بستر (m)	سرعت هوای ورودی (m/s)
۱/۸۸	۰/۱	۲۴۷۰	۲/۱۸	۰/۲۱۳	۰/۲۵۴۸

معادلات حاکم

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial(\epsilon_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla(\rho_k \epsilon_k \vec{u}_k) = 0 \quad (۱)$$

که ρ_k چگالی، ϵ_k کسر حجمی فاز k و نمایانگر نوع فاز است. کسر حجمی از دو فاز بایستی شرایط روبه‌رو را برآورده کند:

$$\epsilon_g + \epsilon_s = 1 \quad (۲)$$

معادله مومنتوم برای هرفاز:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\epsilon_k \rho_k u_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_k \rho_k u_k u_k) = \\ -\epsilon_k \nabla P + \nabla \cdot (\epsilon_k \mu_{eff,k} (\nabla \vec{u}_k + (\nabla \vec{u}_k)^T)) + \rho_k \epsilon_k g + M_{i,k} \end{aligned} \quad (۳)$$

P فشار و $\mu_{eff,k}$ ویسکوزیته مؤثر و عبارت $M_{i,k}$ در معادله فوق، نشان دهنده نیروی بین فاز برای هر فاز است.

نیروی کشش بین فاز

ضریب تبادل بین فازهای سیال و جامد با استفاده از مدل درگ گیداسپو به دست می‌آید. این ترکیبی از مدل Wen و Yu و معادله Ergun است. مدل درگ بین فاز جامد - گاز با استفاده از مدل گیداسپو انجام شده است که به شکل زیر بیان شده است:

$$k_{sl} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_l) \mu_l}{\alpha_l d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_l \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s^2} \quad (۴)$$

$$\alpha_l \leq 0.8$$

مدل‌سازی آشفته‌گی

انتخاب مدل آشفته‌گی به ملاحظات فیزیکی شامل جریان، عمل ایجاد شده برای مسئله، سطح دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی موجود و مدت زمان موجود برای شبیه‌سازی بستگی دارد. در

شبیه‌سازی حاضر مدل استاندارد $k-\epsilon$ برای مدل‌سازی آشفته‌گی استفاده شده است. مدل استاندارد $k-\epsilon$ یک مدل نیمه تجربی است که بر اساس مدل معادلات انتقال برای انرژی جنبشی تلاطم (k) و میزان اتلاف آن (ϵ) ساخته شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (۶)$$

در این معادلات، G_k تولید انرژی جنبشی تلاطم را به دلیل اختلاف‌های میانگین سرعت نشان می‌دهد، G_b تولید انرژی جنبشی تلاطم به دلیل نیروی شناوری است، Y_M نشان دهنده میزان انبساط نوسان در تلاطم قابل تراکم نسبت به نرخ اتلاف کلی است، $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ و $C_{3\epsilon}$ ثابت هستند. σ_k و σ_ϵ به ترتیب اعداد آشفته پراشتل برای انرژی جنبشی تلاطم و نرخ اتلاف هستند. S_k و S_ϵ اصطلاحات منبع تعریف شده توسط کاربر هستند. همچنین گرانیوی آشفته، μ_t با ترکیب k و ϵ به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (۷)$$

که C_μ یک ضریب ثابت است.

روش عددی و تنظیم پارامترهای محاسباتی

معادلات دیفرانسیلی انتقالی حاکم قبل از اینکه حل شوند به معادلات جبری تبدیل می‌شوند. روش حجم محدود که شامل انتگرال‌گیری معادلات حاکم در مورد هر حجم کنترل است، بر معادلات گسسته شده (که بقای هر کمیت در حجم کنترل را تضمین می‌کنند) اعمال می‌شوند. معادلات حاکم توسط روش

انتقال جرم بین فازها است و همچنین فشار و چگالی هر یک از فازها ثابت در نظر گرفته شده است. سرعت گاز ورودی یکنواخت با جهت محوری در پایین بستر سیال در نظر گرفته شده است. فشار در نظر گرفته شده برای ورودی گاز تراکم ناپذیر ناچیز است، یعنی افت فشار نسبتاً کم و در خروجی فقط افت فشار بدون لغزش مشخص شده است. مدل نیروی درگ سیاملال و اوبرین برای به دست آوردن کانتور کسر حجمی در سرعت‌های مختلف استفاده شده است. تغییر سرعت ورودی گاز در دامنه‌های مختلف در شبیه‌سازی برای درک پدیده‌های سیال شدن و حداقل سرعت سیال‌سازی برای داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. شکل (۳) تا (۵) مطالعه شبیه‌سازی در سرعت‌های مختلف ورودی نشان داده شده است، با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که از تطابق خوبی برخوردار هستند. مطالعات شبیه‌سازی کانتور کسر حجمی زیست توده در ۰/۰۵ متر بر ثانیه برای بستر سیال در زمان‌های مختلف نشان داد که انبساط ارتفاع بستر با گذشت زمان تقریباً ثابت است و حباب‌های کوچکی تشکیل می‌شوند. همچنین مشاهده شده است که سطح در حال نوسان است و این پدیده به دلیل سرعت ورودی کم در بستر رخ می‌دهد. در تمامی موارد تغییرات سرعت تخلخل ثابت و برابر ۰/۵۹ به صورت Packed Bed لحاظ شده است همچنین اندازه ذرات ثابت و برابر ۲۱۸۰ میکرومتر می‌باشد. عدد رینولدز جریان ورودی برای سرعت‌های مختلف گاز طبق رابطه (۸) بین ۳۳۸-۳۷۲۰ می‌باشد:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (8)$$

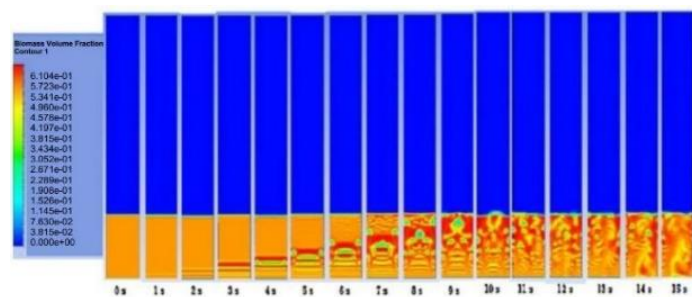
شکل (۴) نشان داد که کانتور کسر حجمی توده بستر سیال شبیه‌سازی شده با سرعت ورودی ۰/۱۰ متر بر ثانیه که در آن ذرات زیست توده در حال نوسان هستند و به سمت بالای بستر حرکت می‌کنند، در ابتدا همراه با سرعت افزایش می‌یابد، پس از افزایش در ارتفاع بستر، سقوط می‌کند و ساکن می‌شود. افت فشار و انبساط بستر از نمودارهای کانتور و جریان سریع حبابی سیال شدن که در این سرعت رخ داد، قابل درک بود و همچنین مشاهده شد که بخش‌های زیادی از زیست توده در نزدیکی منطقه دیواره با سرعت ۰/۱۰ متر بر ثانیه حلقه حلزون هستند. سرعت ورودی پایین، یک رفتار آرام زیست توده را پیش‌بینی می‌کند.

upwind گسسته می‌شوند. برای معادلات مومنتوم و $k - \varepsilon$ از دقت مرتبه دوم و برای معادله کسر حجمی از دقت مرتبه اول استفاده شده است [1]. محاسبات مربوط به مدل اولرین چندفازی توسط روش Phase Coupled SIMPLE انجام شده است. این روش همان الگوریتم SIMPLE است که برای جریان‌های چندفازی توسعه داده شده است. حل معادلات با استفاده از حل‌کننده Pressure Based و به صورت گذرا با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه انجام شده است.

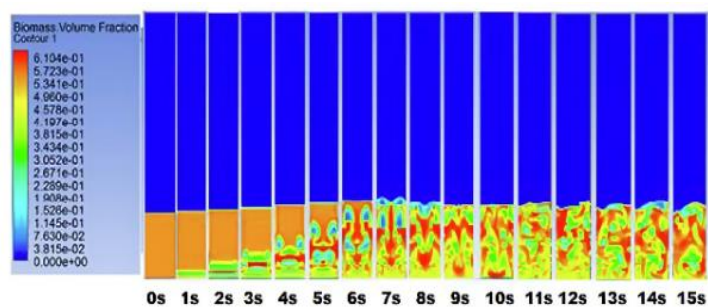
نتایج

بررسی اثرات سرعت ورودی مختلف

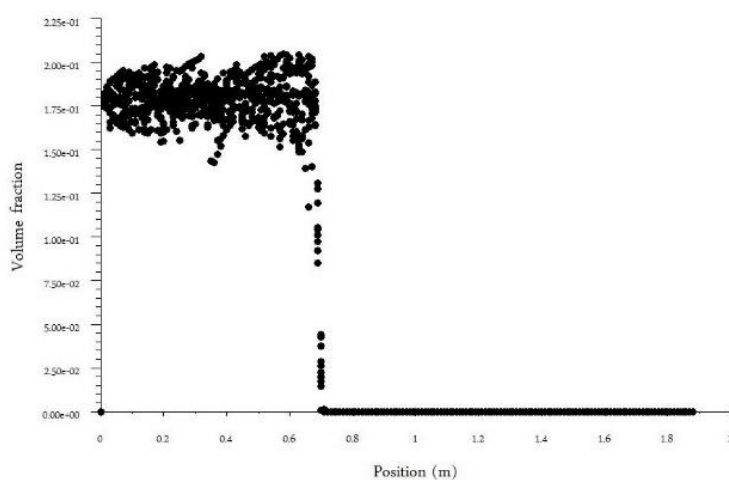
ابتدا برای اعتبارسنجی نتایج و همچنین استقلال حل مسئله از تعداد شبکه و مقدار گام زمانی، موردی را که مرجع [12] بررسی و نتایج خود را برای آن حالت به دست آورده است، در مطالعه حاضر نیز حل می‌شود. لازم به ذکر است که در مرجع [1,12] از هندسه دوبعدی استفاده شده است، در حالی که کار حاضر از هندسه سه‌بعدی در شرایط مختلف ورودی و خروجی بررسی شده است. شبیه‌سازی هیدرودینامیکی بستر سیال گاز جامد در دامنه سرعت مختلف گاز ورودی ۰/۵۵-۰/۰۵ متر بر ثانیه برای درک حالت شبه پایدار در مرجع [1,12] انجام شده است. مدل چندفازی اولری برای مدل‌سازی بستر سیال مشخص انتخاب شد، موفقیت رویکرد اولری - اولری به توصیف مناسب مانند تعامل بین فاز گاز - جامد، برخورد و تعامل اصطکاکی بین ذرات و ذرات و دیواره بستگی دارد. در حوزه محاسبات، گاز به عنوان یک فاز پیوسته و جامد به عنوان یک فاز پراکنده در داخل ستون برای نفوذ و تعامل با یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند. ابتدا هیچ جریانی در بستر مشاهده نمی‌شود، در حالی که بستر سیال شده شبیه‌سازی می‌شود، مشخصات بستر با گذشت زمان تغییر می‌کند. اما بعد از مدتی تغییر قابل توجهی در مشخصات مشاهده نمی‌شود و این نشان می‌دهد که بستر سیال شده به حالت نیمه پایدار رسیده است و تمام اطلاعات را برای نتیجه‌گیری از این امر به ارمغان می‌آورد. شبیه‌سازی‌ها تا زمانی که سیستم به حالت شبه ثابت برسد انجام شده است، یعنی متغیرهای جریان متوسط از نظر زمانی مستقل هستند. شبیه‌سازی بستر سیال شده با گاز جامد غیر واکنشی، حالت ناپایدار، بدون نیروی بالا برنده و بدون



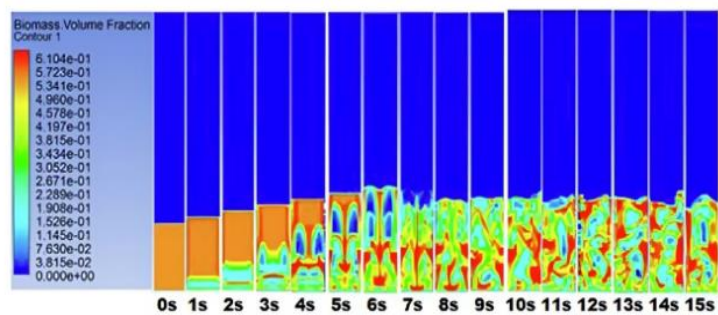
شکل ۳ کسر حجمی زیست توده سرعت ۰/۰۵ متر بر ثانیه تا ۱۵ ثانیه



شکل ۴ کسر حجمی زیست توده سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه تا ۱۵ ثانیه

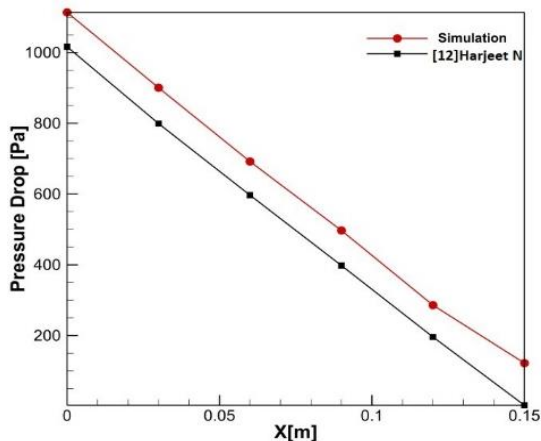


شکل ۵ توزیع کسر حجمی ذرات جامد در طول ستون بستر سیالی

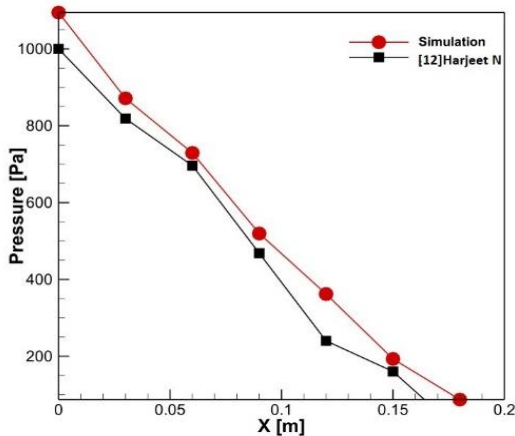


شکل ۶ کسر حجمی زیست توده سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه برای ۰ ثانیه تا ۱۵ ثانیه

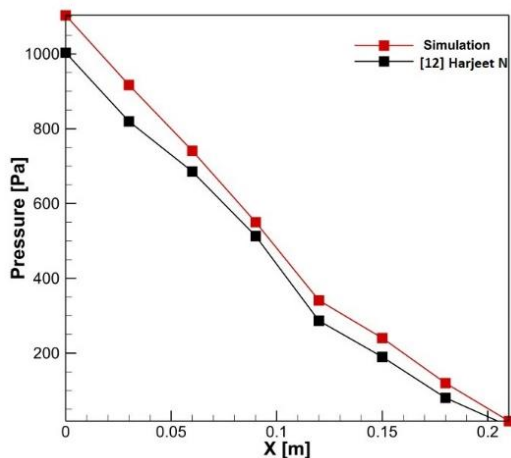
آن در پایین بستر است.



شکل ۷ مقایسه افت فشار بستر با ارتفاع ستون بستر سیال برای سرعت هوای ورودی ۰/۰۵ متر بر ثانیه [12]



شکل ۸ مقایسه افت فشار بستر با ارتفاع ستون بستر سیال برای سرعت هوای ورودی ۰/۱ متر بر ثانیه [12]



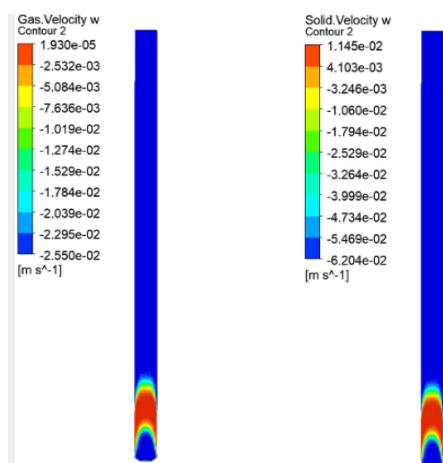
شکل ۹ مقایسه افت فشار بستر با ارتفاع ستون بستر سیال برای سرعت هوای ورودی ۰/۱۵ متر بر ثانیه [12]

ارتفاع نهایی بستر توده ذرات جامد را می‌توان با استفاده از ابزار XY Plot تعیین کرد. برای این منظور نمودار تغییرات کسر حجمی ذرات جامد در طول ستون بستر سیالی (محور Y) در شکل (۵) رسم شده است. با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که در ارتفاع حدوداً ۰/۷ متری یک کاهش بسیار شدید در مقدار کسر حجمی رخ می‌دهد. مکان وقوع این پرش بیانگر ارتفاع انبساط یافته نهایی بستر دانه‌های شیشه است. با استفاده از این نمودار می‌توان حداکثر ارتفاع پخش‌شدگی فاز جامد را تعیین کرد و در ارتفاع کلی ستون را در طراحی رآکتور لحاظ نمود.

شکل (۶) مطالعه شبیه‌سازی مدل دو فاز بستر جامد - گاز در سرعت گاز ورودی ۰/۲ متر بر ثانیه ۰/۵۵ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که سرعت گاز ورودی تأثیر بسیار زیادی در پدیده‌های سیال‌سازی دارد افت فشار، نسبت انبساط بستر و تشکیل حباب‌ها ارتباط مستقیمی با سرعت ورودی دارند. تمام مطالعات موردی نشان داد ارتفاع بستر با افزایش سرعت افزایش و با کاهش سرعت ارتفاع بستر کاهش می‌یابد. در سرعت بالاتر زیست توده داخل بستر به سمت بالای بستر حرکت می‌کند و سیال شدن آشفته رخ می‌دهد.

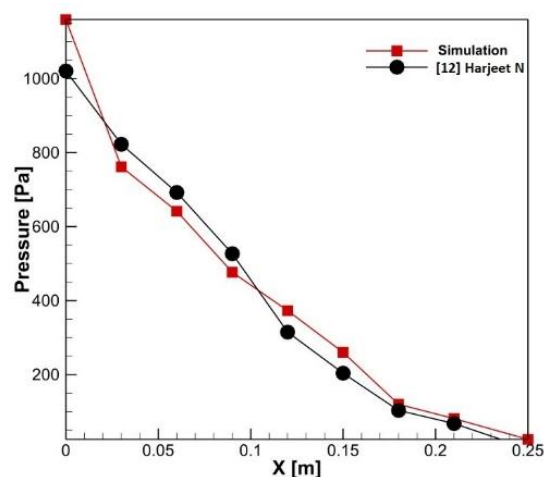
سرعت بالای ۰/۵۵ متر بر ثانیه ممکن است منجر به فرسایش بستر شود. افت فشار در پایین بستر بیشتر است در ارتفاع ستون هم‌زمان با کاهش چگالی بستر در طول ستون کاهش می‌یابد. سرعت ۰/۱۹ - ۰/۱۵ متر بر ثانیه می‌تواند به عنوان حداقل شرایط سیال‌سازی پیش‌بینی شود در حالی که انبساط بستر بسیار کمتر است و وزن ظاهری ذرات توسط نیروی کششی که توسط هوای ورودی بر روی آن‌ها وارد می‌شود متعادل می‌شوند. تشکیل حباب‌های کوچک نیز مشاهده می‌شود. بنابراین شرایط ایدئال برای عملکرد بستر سیال بین ۰/۱۹ تا ۰/۵۵ متر بر ثانیه است. نتایج محاسباتی با نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده در نمودارهای (۷) تا (۱۰) نشان داده شده است که مطابق داده‌های محاسباتی رفتار می‌کند.

همان طور که در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نیز مشخص است افزایش سرعت ورود سیال به سبب پراکندگی بیشتر بستر سیالی و به تبع آن افزایش میزان تخلخل موجب کاهش فشار خواهد شد. همچنین با افزایش سرعت ورودی شیب افت فشار افزایشی یافته است که البته به این شیب نوبه خود در بستر دوفازی که حضور ذرات جامد بیشتر است محسوس‌تر به چشم می‌خورد. لذا در طراحی چنین رآکتورهایی، یکی از عواملی که بایستی در نظر گرفته شود بررسی اثرات سرعت ورودی و پخش یکنواخت



(ب) (الف)

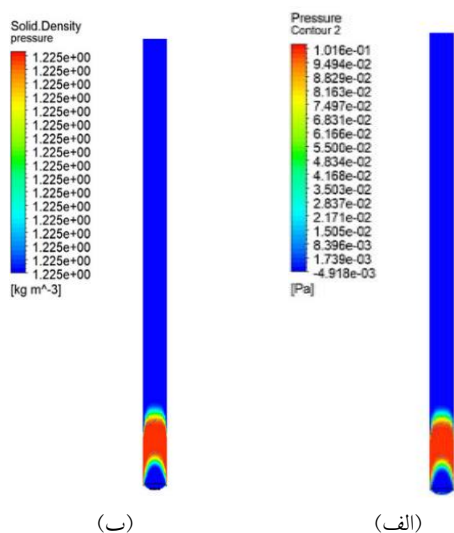
شکل ۱۲ توزیع سرعت برای هر کدام از فازها در ورودی مخروطی (الف) جامد، (ب) گاز



شکل ۱۰ مقایسه افت فشار بستر با ارتفاع ستون بستر سیال برای سرعت هوای ورودی ۰/۲ متر بر ثانیه [12]

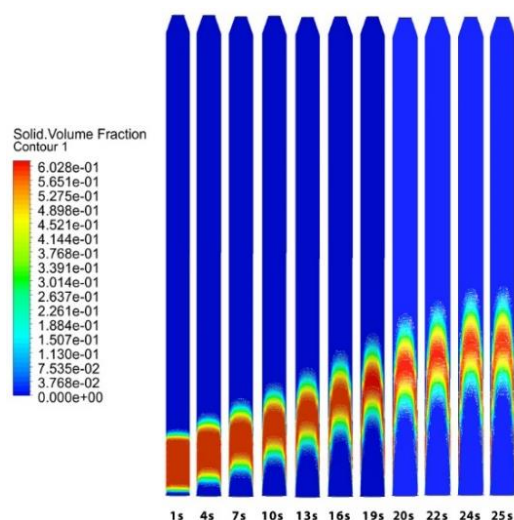
بررسی اثرات هندسه رآکتور

حال مسئله از جنبه هندسی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در طراحی رآکتور سیال‌سازی باید متغیرهایی مثل هندسه رآکتور و سرعت جریان گاز در نظر گرفته شود. هندسه رآکتور برای حفظ سرعت تماس ذرات و گازها در هنگام سیال‌سازی مهم است. به همین ترتیب، نرخ جریان گاز سیال‌سازی الگوی سیالاتی را که تشکیل می‌شود تعیین می‌کند. به این منظور در مطالعه حاضر، هندسه رآکتور به صورت استوانه سه‌بعدی است. در شکل‌های (۱۰) تا (۱۸) مطالعه شبیه‌سازی در هندسه‌های مختلف ورودی و خروجی نشان داده شده است.

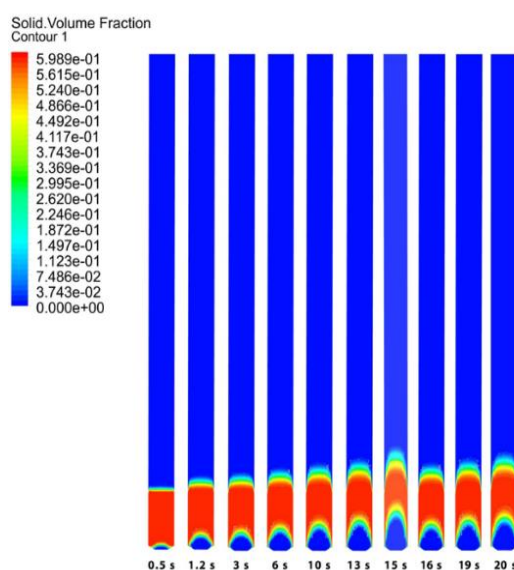


(ب) (الف)

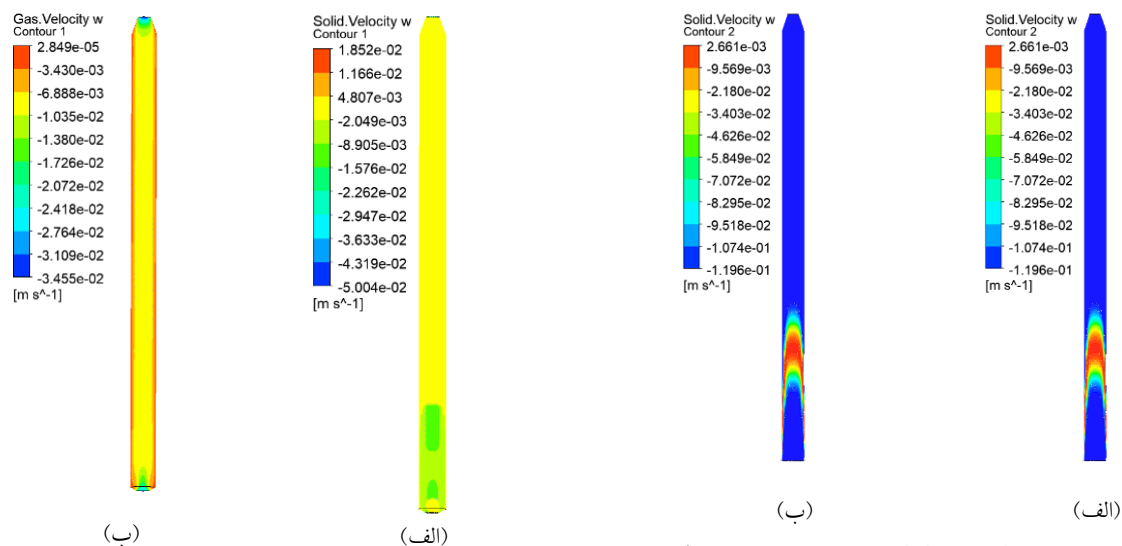
شکل ۱۳ توزیع (الف) فشار، (ب) چگالی در ورودی مخروطی



شکل ۱۴ توزیع کسر حجمی در خروجی مخروطی

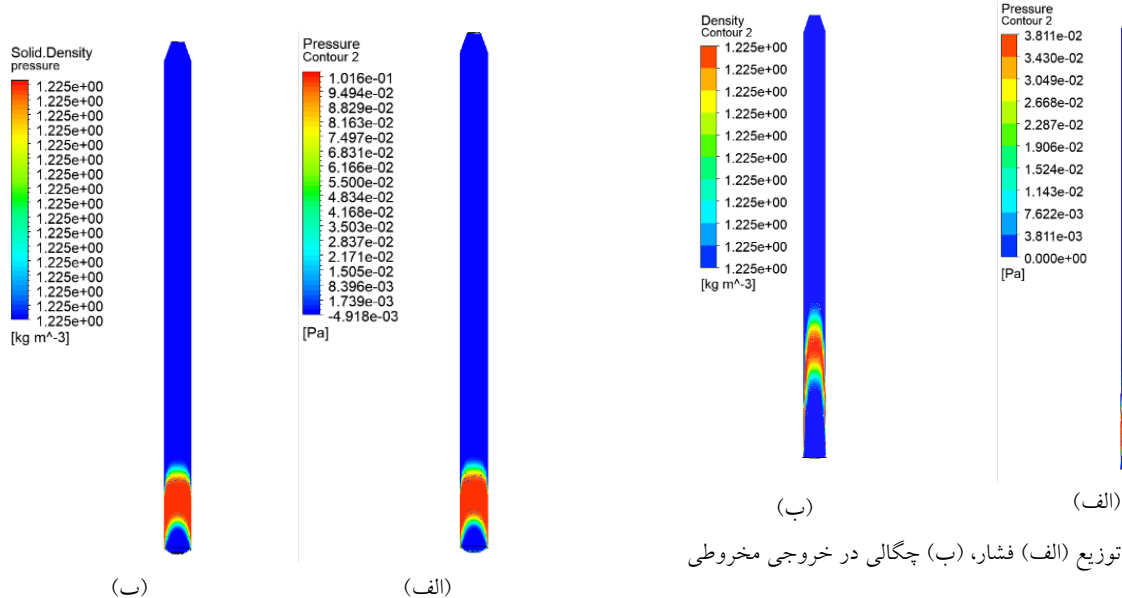


شکل ۱۱ توزیع کسر حجمی در ورودی مخروطی



شکل ۱۵ توزیع سرعت برای هر کدام از فازها در خروجی مخروطی (الف) جامد، (ب) گاز

شکل ۱۸ توزیع سرعت برای هر کدام از فازها با ورودی و خروجی مخروطی (الف) جامد، (ب) گاز

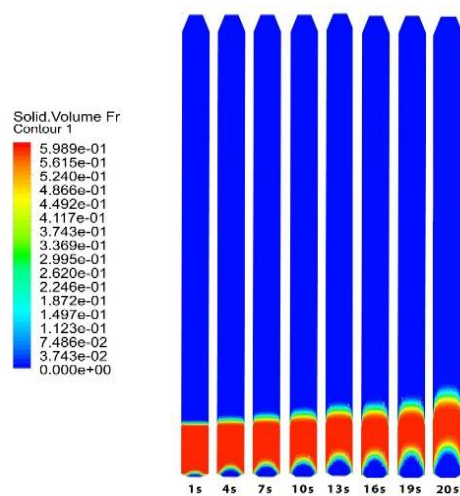


شکل ۱۶ توزیع (الف) فشار، (ب) چگالی در خروجی مخروطی

شکل ۱۹ توزیع (الف) فشار، (ب) چگالی با ورودی و خروجی مخروطی

نتیجه‌گیری

بدیهی است که در شرایط ورودی شیب‌دار حداقل سرعت سیال‌سازی افزایش یافته است. در رابطه با تأثیر هندسه، این نوع بستر سیال منجر به مقادیر بالاتر بازیابی محصول و مقادیر پایین‌تر جرم انباشته می‌شود زیرا سرعت خشک شدن بیشتر هوا باعث افزایش حرکت ذرات در داخل بستر می‌شود. افزایش اثر فرسایش منجر به حذف محصول خشک شده از بستر می‌شود. اندازه سرعت فازها در ناحیه مرکز نسبت به نزدیک دیوار بیشتر است.



شکل ۱۷ توزیع کسر حجمی با ورودی و خروجی مخروطی

هزینه‌های ساخت سازه افزایش می‌یابد که این امر مطلوب نیست، در نتیجه هدف اختلاط بیشتر در ارتفاع کم می‌باشد و به همین منظور استفاده از نازل‌های مختلف اعم از پخشی و چرخشی توصیه می‌شود که موجب افزایش اختلاط می‌شوند.

واژه‌نامه

Reactor	رآکتور
Catalytic Cracking Process	فرایند کراکینگ کاتالیستی
Multiphase	چند فازی
Vinyl Chloride	کلرید وینیل
Polyethylene	پلی اتیلن
Styrene	استایرن
دینامیک سیالات محاسباتی	
Dynamics (CFD) Computational Fluid	
Turbulent Flow	جریان آشفته
Gas Dryers	خشک‌کن‌های گازی
Catalyst	کاتالیزور
Riser	بالارونده (رایزر)
Eulerian Model	مدل اولری
معادلات مومنتوم و پیوستگی	
Momentum and Continuity Equations	
Porosity	تخلخل
Fluent	فلوئنت
Pascal	پاسکال
Buoyancy Force	نیروی شناوری
Prandtl Number	پرانتل
Contour	کانتور

تقدیر و تشکر

پروفیل سرعت جامد در بستر سیال با شروع به کار افزایش یافته و سپس با کاهش دامنه کاهش می‌یابد و رفتار نوسانی را نشان می‌دهد. این بدان معناست که برای یک حالت اولیه معین، سرعت فقط یک بار پس از شروع سیال شدن به حداکثر می‌رسد. در مقایسه با فازهای دیگر در ستون استوانه‌ای، سرعت فاز گاز حداکثر در ستون است. ذرات کوچک‌تر نسبت به ذرات بزرگ‌تر در شرایط یکسان در بستر سیال سرعت بیشتری می‌گیرند. سرعت جامد محوری در ستون با قطر کوچک بیشتر از ستون با قطر بزرگ است. اندازه ذرات کوچک نسبت به اندازه ذرات بزرگ‌تر دارای تخلیه بستر بیشتری است. فشار استاتیک با افزایش ارتفاع بستر کاهش می‌یابد. در افزایش ارتفاع بستر، افت فشار اصطکاکی در دیوار کاهش یافته است. افت فشار اصطکاکی، یک تابع قوی از سرعت مایع است، زیرا برای سرعت مایع زیاد، افت فشار بیشتر است. انرژی ورودی به سیستم با سرعت مایع بیشتر می‌شود و اختلاف انرژی خالص که باید انرژی اتلاف شده در سیستم را به همراه داشته باشد، هم با سرعت گاز و هم با سرعت مایع افزایش می‌یابد. سرعت محوری جامد در امتداد مختصات شعاعی برای ستون، با کار تجربی تأیید شده است. همچنین نسبت انبساط بستر و نگهداری مایع برای اندازه ذرات مختلف نیز با کارهای تجربی مطابقت دارد. با توجه به شکل‌های (۳) تا (۵) می‌توان نتیجه گرفت با افزایش سرعت ورودی، پخش ذرات نیز افزایش می‌یابد و این امر موجب کاهش میزان تخلخل در ارتفاع پایین و همچنین اختلاط جریان و آشفتگی در فاز جامد می‌شود که به عنوان مثال در کاربرد خشک‌کن‌ها می‌تواند منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت و بهبود عملکرد خشک‌کن‌ها شود. با توجه به شکل‌های (۱۰) تا (۱۸) می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که ناحیه ورودی بستر به صورت مخروطی باشد موجب گسترده‌گی و توزیع یکنواخت سرعت و در نتیجه موجب اختلاط جامدات در ارتفاع کم می‌شود هر چند افزایش ارتفاع رآکتور یکی از راهکارهای افزایش اختلاط می‌باشد اما با افزایش ارتفاع رآکتور

مراجع

- [1] H. Cui, J Grace, "Fluidization of biomass particles a review of experimental multiphase flow aspects", *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 1-2, Pp. 45-55, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.006>.
- [2] R.K. Mishra, K Mohanty, "Pyrolysis characteristics and kinetic parameters assessment of three waste biomass", *Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 10, No. 1, P. 013102, (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5000879>.

- [3] T. Rao, J. Bheemarasetti, "Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands", *Energy*, Vol. 26, No. 6, Pp. 633-644, (2001). [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00014-7).
- [4] F.J. Arias, "Film boiling in presence of a magnetic field in liquid metals within framework of Taylor-Helmholtz instabilities in application to fusion reactor project", *Fusion Energy*, Vol. 29, No. 2, Pp. 157-160, (2009). <https://doi.org/10.1007/s10894-009-9249-3>.
- [5] F.J. Arias, "Heat and mass transfer in transitional boiling on liquid metal in presence of magnetic field", *Fusion Energy*, Vol. 29, No. 3, Pp. 244-250, (2010). <https://doi.org/10.1007/s10894-009-9268-0>.
- [6] G. Hengjun, Y. Peiyi, "Dual-dense gas-solid circulating fluidized bed reactor", *Fuel*, Vol. 337, p. 126872, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126872>.
- [7] A. Fluent, "ANSYS FLUENT Theory Guide", V14.5, (Nov. 2012).
- [8] D. Kunii, O. Levenspiel, *Fluidization Engineering* 2nd ed. Butterworth-Heinemann, (1991).
- [9] N. Mostoufi, J. Chaouki, "Local solid mixing in gas-solid fluidized beds", *Powder Technol*, Vol. 114, No. 1-3, Pp. 23-31, (2001). [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00258-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00258-8).
- [10] A. Bakker, *Fluent introductory notes*. Fluent Inc, Lebanon, (2002).
- [11] J.D Anderson, *Computational fluid dynamics*, McGraw Hill, (1995).
- [12] D. Shubhankar, N. Harjeet, Ch. Vishal, "CFD modeling of a typical fluidized bed column", *Materials Today*, Vol. 46, No. 14, Pp. 6178-6184, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.079>.

Numerical Simulation of Viscoelastic Fluid Mixing in a T-Y Shaped Micromixer

Research Article

Fatemeh Khalilian¹, Morteza Bayareh² 

 [10.22067/jacsm.2024.87529.1248](https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.87529.1248)

Abstract

The current study analyzes the dynamics of the mixing flow of two viscoelastic fluids in a novel T-Y micromixer. An aqueous solution with 10% polyethylene glycol with a molecular weight of 8000 and 0.1% polyethylene oxide with a molecular weight of 2000000, which is a Boger fluid, is selected as a viscoelastic fluid. Using the COMSOL Multiphysics software, the mixing of two viscoelastic fluids will be investigated numerically using the Oldroyd-B constitutive equation. The effect of the inlet velocity, ratio of inlet velocities, and Weissenberg number on mixing efficiency and pressure drop will be presented. The results show that the elastic effect in viscoelastic fluid flow is the main factor in increasing mixing index. At a distance of 2800 μm from the beginning of the main channel, the mixing index reaches from about 46% for the inlet velocity of 0.002 m/s to about 38% for the inlet velocity of 0.006 m/s. With the increase of the Weissenberg number, the mixing index is increased in different cross-sections of the microchannel, because the instability of the viscoelastic fluid is enhanced at higher Weissenberg numbers. Also, it is demonstrated that the mixing index is reduced by decreasing the velocity ratio. Pressure drop is augmented with velocity, Weissenberg number, and velocity ratio.

Keywords: Microfluidics, T-Y micromixer, Viscoelastic fluid, Weissenberg number, Mixing index.

1. Introduction

Micromixers are widely used in medicine, chemical industry, drug delivery, chemical processes, such as biodiesel production, as well as in the investigation of disease-causing factors, genetic structure, isolation and diagnosis of cells, and synthesis of organic substances. Micromixers are divided into two groups of active and passive ones. In passive micromixers, mixing is done by the interaction of the flow with different structures, such as curved channels, zigzag, etc., without applying any external energy. In active micromixers, mixing is performed by external actuators, such as electric field,

magnetic field, etc. Cortes-Quiroz et al. numerically assessed mixing in a three-dimensional T-shaped micromixer at $Re = 100-500$. This study showed that the 3D micromixer provides a significant increase in mixing and a lower pressure drop compared to a conventional T-shaped micromixer over the entire range of Reynolds numbers. Ansari et al. examined mixing in a microchannel with asymmetric subchannels for $Re = 1-80$ and found that rhomboid subchannels have higher mixing efficiency when the width of the main channel is three or four times the width of the subchannel.

A review of previous papers shows that the mixing of viscoelastic fluids has rarely been the focus of researchers. In addition to introducing the T-Y shape micromixer (Fig. 1), the present work examines the mixing of two viscoelastic fluids numerically using the Oldroyd-B constitutive equation. The effect of the inlet velocity, the ratio of inlet velocities, and Weissenberg number on mixing efficiency is evaluated.

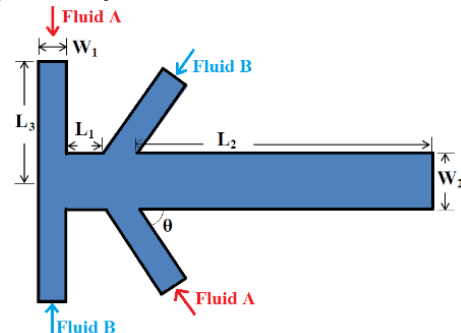


Fig. 1. Schematic of T-Y micromixer ($W_2 = 400 \mu\text{m}$, $W_1 = 200 \mu\text{m}$, $L_2 = 3600 \mu\text{m}$, and $L_3 = 1400 \mu\text{m}$).

2- Governing equations

The governing equations of the mixing process of two viscoelastic fluids, i.e., continuity and momentum equations are expressed as follows by assuming incompressible, unsteady, and laminar fluid flow:

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

*Manuscript received: August April 8, 2024. Revised, April 20, 2024, Accepted, May 8, 2024.

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

Email: m.bayareh@sku.ac.ir

² Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

where $\mathbf{u}$ is the velocity vector, ρ is the density, P is the pressure and $\boldsymbol{\tau}$ is the sum of the shear stress tensor of the solvent ($\boldsymbol{\tau}_s$) and the elastic solution ($\boldsymbol{\tau}_p$):

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_p \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = \eta_s [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (4)$$

In this equation, η_s is the dynamic viscosity of the solvent. The solution shear stress tensor is modeled using constitutive equations of viscoelastic fluids, such as Oldroyd-B:

$$\boldsymbol{\tau}_p + \lambda \left[\frac{\partial \boldsymbol{\tau}_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \boldsymbol{\tau}_p) - (\mathbf{u} \boldsymbol{\tau}_p)^T \cdot \boldsymbol{\tau}_p - \boldsymbol{\tau}_p \cdot (\nabla \mathbf{u}) \right] = \eta_p [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (5)$$

where λ is the relaxation time of the viscoelastic fluid and η_p is the dynamic viscosity of the solution.

Reynolds and Weissenberg numbers are respectively defined as follows:

$$Re = \frac{u_{in} D}{\eta_o} \quad (6)$$

$$Wi = \frac{u_{in} \lambda}{D} \quad (7)$$

The mixing index is calculated using the following relationship:

$$MI = 1 - \sqrt{\frac{\iint (c - \bar{c})^2 dA}{A \bar{c} (c_{max} - \bar{c})}} \quad (8)$$

The mixing index is the average concentration in the cross-section of the outlet channel. A is the cross-section of the outlet channel and c_{max} is the maximum sample concentration in the microchannel. The mixing index of zero and 1 indicates no mixing and complete mixing, respectively.

3- Results

The effect of inlet velocity

The simulations are carried out for the Weissenberg number equal to 0.1. According to Eq. (7), to keep the Weissenberg number constant, the relaxation time should be changed appropriately. Fig. 2(a) shows the mixing efficiency at different distances from the channel length for different inlet velocities and Fig. 2(b) shows the pressure drop values for different velocities. It can be observed that at a certain distance from the channel, the mixing efficiency decreases with the enhancement of the inlet velocity. The concentration contours confirm that the mixing quality is increased along the channel, but the amount of this enhancement is not significant for different velocities. As Fig. 2(b) shows, at a distance of 2800 micrometers from the beginning of the main channel, the mixing index is improved from about 46% for the inlet velocity of 0.002 m/s to about 38% for the inlet velocity of 0.006 m/s.

The effect of Weissenberg number

With the increase of the Weissenberg number, the mixing index is augmented in different sections of the

microchannel, because the instability of the viscoelastic fluid increases at higher Weissenberg numbers. In general, turbulent flow movements are continuously created at the junction of inlets. The turbulent flow is first created at the junction of the inlets. After that, in the straight channel, unlike the layered state in Newtonian fluids, the flow of viscoelastic fluids with different concentrations moves more irregularly.

4- Conclusion

In addition to introducing the T-Y shape micromixer, the present work examines the mixing of two viscoelastic fluids numerically using the Oldroyd-B constitutive equation. The results demonstrate that at a certain distance from the channel, due to the instability of fluid flow, the mixing efficiency is improved by reducing the inlet velocity. For example, at a distance of 2800 μm from the beginning of the main channel, the mixing index reaches from about 46% for the inlet velocity of 0.002 m/s to about 38% for the inlet velocity of 0.006 m/s. With the increase of the Weissenberg number, the mixing index augments in different sections of the microchannel, because the instability of the viscoelastic fluid is enhanced at the higher Weissenberg numbers. At a certain distance from the channel, the mixing efficiency is diminished with the increase of the inlet velocity. In general, the increase in mixing efficiency is due to the destabilization of fluid flow.

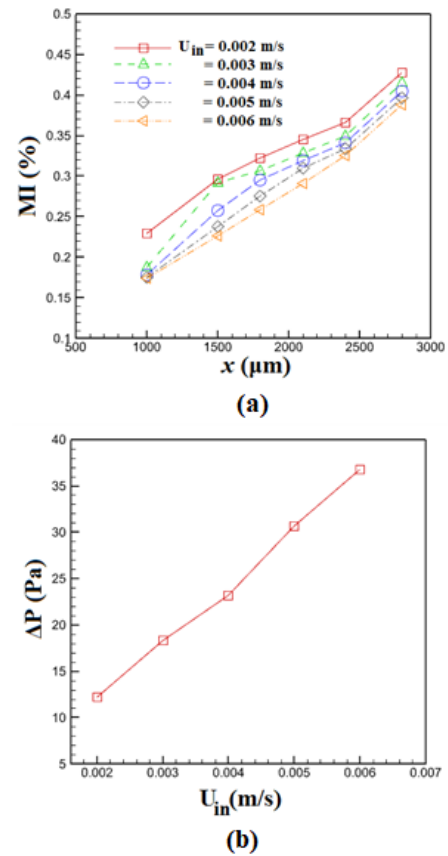


Fig. 2. The effect of the inlet velocity on (a) the mixing index and (b) pressure drop.



شبیه‌سازی عددی اختلاط سیالات ویسکوالاستیک در یک میکرومیکسر T-Y شکل *

مقاله پژوهشی

مرتضی بیاره^(۲)فاطمه خلیلیان^(۱)

10.22067/jacsm.2024.87529.1248

چکیده پژوهش حاضر، دینامیک جریان اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک یک میکرومیکسر T-Y شکل جدید را تحلیل می‌کند. محلول آبی با ۱۰٪ پلی‌اتیلن گلیکول با وزن ملکولی ۸۰۰۰ و ۱۰٪ پلی‌اتیلن اکساید با وزن ملکولی ۲۰۰۰۰۰ که یک سیال بوگراست به عنوان سیال ویسکوالاستیک انتخاب می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس، اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک به صورت عددی و با استفاده از معادله ساختاری اولدرویید - بی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تأثیر سرعت ورودی یکسان، نسبت سرعت‌های ورودی و عدد وایزنبرگ بر بازده اختلاط ارزیابی و میزان افت فشار محاسبه و ارائه خواهد شد. نتایج نشان دادند اثر الاستیک در جریان سیال ویسکوالاستیک عامل اصلی افزایش اختلاط است. در فاصله ۲۸۰۰ میکرومتری از ابتدای کانال اصلی، شاخص اختلاط از حدود ۴۶٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۲ متر بر ثانیه به حدود ۳۸٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۶ متر بر ثانیه می‌رسد. با افزایش عدد وایزنبرگ، شاخص اختلاط در مقاطع مختلف میکروکانال افزایش یافت زیرا در اعداد وایزنبرگ بزرگ‌تر، ناپایداری سیال ویسکوالاستیک بیشتر می‌شود. همچنین، نشان داده می‌شود که با کاهش نسبت سرعت، شاخص اختلاط کاهش می‌یابد. افت فشار نیز با افزایش سرعت، عدد وایزنبرگ و نسبت سرعت افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی میکروفلوئیدیک، میکرومیکسر T-Y شکل، سیال ویسکوالاستیک، عدد وایزنبرگ، بازده اختلاط.

مقدمه

محرك‌های خارجی مانند میدان الکتریکی، مغناطیسی و... صورت می‌گیرد [8]. از جمله میکرومیکسرهای غیرفعال، می‌توان میکرومیکسرهای T، Y، T-T و T-Y شکل را نام برد. نسبت به میکرومیکسرهای T و Y شکل، میکرومیکسر T-Y شکل با استفاده از دو ورودی مختلف برای هر سیال، سطح برخورد دو سیال را افزایش می‌دهد که باعث بهبود کیفیت اختلاط خواهد شد. همانند میکرومیکسرهای T-T شکل، در صورت بهره‌گیری از سرعت‌های مختلف برای ورودی‌های T و Y، دو پمپ سرنگی مورد نیاز است تا پدیده اختلاط به صورت عملی مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که میکرومیکسر ارائه شده در کار حاضر یک میکرومیکسر T-Y شکل است، ابتدا مشخصات و ویژگی‌های مکانیزم اختلاط در هندسه‌های نزدیک به آن یعنی، میکرومیکسرهای T شکل و T-T شکل، با مرور تعدادی از

میکروکانال‌ها دارای کاربردهای متعددی در زمینه انتقال حرارت، خنک‌کاری، اختلاط سیالات و... دارند [1-3]. میکرومیکسرهای از جمله تجهیزاتی هستند که در آن‌ها از میکروکانال استفاده می‌شود که در پزشکی، صنایع شیمیایی و دارورسانی [4]، در فرایندهای شیمیایی مانند تولید بیودیزل [5] و نیز بررسی عوامل ایجاد بیماری‌ها، ساختار ژنتیکی، جداسازی و تشخیص سلول‌ها و سنتز مواد آلی [6] به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. میکرومیکسرهای به دو گروه میکرومیکسرهای فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در میکرومیکسرهای غیرفعال، اختلاط از اندرکنش جریان با ساختارهای مختلف، مانند کانال‌های متقاطع، زیگزاگی و... و بدون اعمال هیچ انرژی خارجی صورت می‌گیرد [7]. در حالی که در میکرومیکسرهای فعال، اختلاط توسط

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۲/۱۹ می‌باشد.

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

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

مطالعات پیشین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کوارتز و همکاران [9] به بررسی عددی اختلاط در میکرومیکسر T شکل سه‌بعدی در اعداد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ پرداختند. این مطالعه نشان داد که میکرومیکسر سه‌بعدی افزایش قابل توجهی در اختلاط ایجاد می‌کند و افت فشار کمتر و سطح تنش برشی مشابهی را در مقایسه با یک میکرومیکسر T شکل معمولی در کل محدوده اعداد رینولدز ارائه می‌کند. انصاری و همکاران [10] اختلاط در میکروکانال همراه با کانال‌های فرعی نامتقارن در محدوده عدد رینولدز از ۱ تا ۸۰ بررسی و دریافتند کانال‌های فرعی لوزی شکل زمانی دارای بازده اختلاط بیشتری هستند که عرض کانال اصلی سه یا چهار برابر عرض کانال فرعی باشد. دندی و همکاران [11] به بررسی اختلاط میکروکانال T-T شکل و T شکل با و بدون موانع استوانه‌ای پرداختند. نتایج عددی نشان داد که میکرومیکسر T-T شکل با موانع استوانه‌ای به طور قابل توجهی عملکرد خوبی داشته و کیفیت اختلاط بسیار خوبی را نسبت به میکرومیکسر پایه T شکل برای محدوده اعداد رینولدز ۶ تا ۷۰۰ نتیجه می‌دهد. این دستگاه همچنین در مقایسه با میکرومیکسر T-T شکل بدون موانع و میکرومیکسر T شکل با موانع استوانه‌ای اختلاط بهتری نشان داد. به دلیل وجود موانع استوانه‌ای در محل اتصال، یک جفت گردابه بزرگ‌تر در ناحیه سکون ایجاد شد. موانع استوانه‌ای در پایین‌دست باعث افزایش قابل توجهی در بازده اختلاط به دلیل جدایش و بازترکیب جریان شدند. آن‌ها اندازه موانع استوانه‌ای در میکرومیکسر T-T شکل را برای به دست آوردن عملکرد اختلاط بهتر بهینه کردند. نجی و همکاران [12] به بررسی توزیع غلظت در میکروکانال شکل Y همراه با مانع مربعی شکل برای افزایش بازده اختلاط با ایجاد جریان آشوبناک پرداختند. ویژگی‌های اختلاط با تغییر نرخ جریان از میکروپمپ‌ها و تغییر عرض کانال میکرومیکسر اندازه‌گیری شد. درصد اختلاط به آرامی با افزایش سرعت جریان افزایش یافت، اما به سرعت با کاهش عرض میکروکانال کاهش پیدا کرد. کیم و همکاران [13] به بررسی پدیده اختلاط در یک میکروکانال T شکل همراه با دندانه‌های زبر پرداختند و نشان دادند با افزایش فاصله آن‌ها بازده اختلاط افزایش می‌یابد. میلتن و همکاران [14] کیفیت اختلاط آب و متانول را در سه نوع میکروکانال در اعداد رینولدز ۰/۲ تا ۹۱ مقایسه کردند. دو میکرومیکسر دارای چهار پره بودند که منافذی با نصف و یک چهارم سطح مقطع کانال را

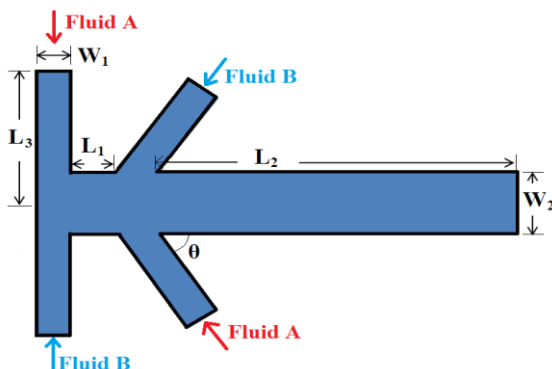
ایجاد می‌کردند و عملکرد آن‌ها با میکرولوله ساده مقایسه شد. میکرومیکسرهای دارای چهار مقطع ورودی بودند. آن‌ها نشان دادند که بیشترین اختلاط مربوط به میکرولوله‌هایی است که شکاف‌های به اندازه یک چهارم سطح مقطع دارند. سولهاتی و همکاران [15] به شبیه‌سازی عددی اختلاط در میکروکانال T شکل ساده و میکروکانال موج‌دار در اعداد رینولدز صفر تا ۱۰۰ پرداختند و نشان دادند با افزایش عدد رینولدز شاخص اختلاط برای میکروکانال ساده کاهش و برای میکروکانال موج‌دار افزایش می‌یابد. نتایج عددی نشان داد که کیفیت اختلاط به طور قابل توجهی برای اتصال میکروکانال T شکل با ساختار موج‌دار، به ویژه در اعداد رینولدز بالا، بهبود می‌یابد. وانگ و همکاران [۱۶] یک میکرومیکسر T شکل را برای بررسی اختلاط سریع با یک بستر سیلیکونی ساخته و به صفحه شیشه‌ای پیرکس متصل کردند تا عملکرد اختلاط آن‌ها مشاهده شود. فشارهای مختلف بر روی ورودی میکرومیکسر اعمال گردید و عملکرد اختلاط با میکروسکوپ نوری در محدوده اعداد رینولدز بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ مشاهده شد. نشان داده شد که میکرومیکسر T شکل با قطر هیدرولیکی ۶۷ میکرومتر و فشار اعمالی ۵/۵ بار برای ایجاد اختلاط کامل در کمتر از یک میلی‌ثانیه پس از تماس دو مایع کافی است.

از سوی دیگر، سیالات ویسکوالاستیک به دلیل داشتن معادلات ساختاری متفاوت با سیالات نیوتنی، دارای رفتار هیدرودینامیکی کاملاً متفاوتی هستند [17,18]. نسبت به پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص اختلاط سیالات نیوتنی، تعداد اندکی از محققان به بررسی مکانیزم اختلاط سیالات ویسکوالاستیک پرداخته‌اند. وی‌هوا و همکاران [19] یک میکرومیکسر کارآمد برای اختلاط سیالات ویسکوالاستیک طراحی کردند که با تعبیه چند مانع لوزی شکل، می‌توانست هم نیروی برشی و هم نیروی کششی قوی را القا کند تا جریان سیال ویسکوالاستیک را ناپایا کند. مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی مستقیم فرایند اختلاط برای ارزیابی عملکرد اختلاط انجام شد. با افزودن ذرات فلورسنت سبز به سیالات، افزایش اختلاط ظاهری برای جریان سیال ویسکوالاستیک هنگامی که سرعت جریان از یک آستانه فراتر رفت، مشاهده شد. نتایج نشان دادند که وقتی الاستیسیته به اندازه کافی قوی باشد، جریان سیال ویسکوالاستیک

شد.

معرفی مسئله

در پژوهش حاضر اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک با غلظت‌های متفاوت در یک میکرومیکسر T-Y شکل بررسی می‌شود. شکل (۱) هندسه میکرومیکسر مورد اشاره را نشان می‌دهد. دو سیال از ورودی‌های مقابل یکدیگر وارد می‌شوند و اختلاط آن‌ها در کانال اصلی و نیز در اتصال بین ورودی‌ها صورت می‌گیرد. از آنجا که اثر زاویه بین کانال اصلی و ورودی Y شکل (زاویه θ) و نیز فاصله بین ورودی‌های T شکل و Y شکل (L_1) در بخش نتایج بررسی خواهد شد، این مقادیر به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. طبق داده‌های تجربی وی‌هوا و همکاران [۱۹]، محلول آبی با ۱۰٪ پلی‌اتیلن گلیکول با وزن ملکولی ۸۰۰۰ و ۰/۱٪ پلی‌اتیلن اکساید با وزن ملکولی ۲۰۰۰۰۰ که یک سیال بوگر با لزجت دینامیکی 0.1094 Pa.s و چگالی $1204/8 \text{ kg/m}^3$ است به عنوان سیال ویسکوالاستیک انتخاب می‌شود. همچنین، مقدار زمان تخفیف برای این محلول آبی برابر با ۰/۵۲ ثانیه است.



شکل ۱ طرح‌واره میکرومیکسر T-Y شکل

($L_3 = 1400 \mu\text{m}$ و $L_2 = 3600 \mu\text{m}$, $W_1 = 200 \mu\text{m}$, $W_2 = 400 \mu\text{m}$)

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر فرایند اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک، معادلات پیوستگی، مومنتوم و پخش جابه‌جایی با فرض جریان به صورت تراکم‌ناپذیر، غیردائم و آرام به صورت زیر بیان می‌شوند [16]:

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

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

به طور نامنظم در کانال می‌پیچد و نوسان می‌کند و در نتیجه اختلاط سیالات با غلظت‌های مختلف با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران [20] اختلاط محلول‌های پلی‌آکریل‌آمید را که توسط میدان الکتریکی در یک میکرومیکسر هدایت می‌شدند به صورت عددی بررسی کردند. میکرومیکسر مجهز به موانع تعبیه شده روی دیواره میکرومیکسر و ناهمگنی پتانسیل سطحی بود. شبیه‌سازی با حل معادله لاپلاس، معادله پواسون - بولتزمن، معادلات ناویر - استوکس، معادله ساختاری اولدروید - بی و معادله انتقال اجزا انجام شد. با افزایش پتانسیل زتای سطح مانع از ۲۰ به ۸۰ میلی‌ولت، بازده اختلاط از ۶۳/۹٪ به ۹۷/۶٪ افزایش یافت. با این حال، هنگامی که پتانسیل زتا از ۸۰ میلی‌ولت به ۱۲۰ میلی‌ولت افزایش یافت، بازده اختلاط کاهش پیدا کرد. چن و همکاران [21] اختلاط سیالات ویسکوالاستیک با معادله ساختاری اولدروید - بی را در یک میکرومیکسر شامل یک استوانه رسا به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. اثرات غلظت پلیمر و شدت میدان الکتریکی اعمال شده بر اختلاط محلول‌های پلی‌آکریل‌آمید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش غلظت پلیمر، سرعت کاهش و بازده اختلاط افزایش می‌یابد. بازده اختلاط محلول‌های ۲۰ تا ۴۰٪ پلی‌آکریل‌آمید بیشتر از اختلاط مایع نیوتنی بود. هنگامی که توان الکتریکی از ۱۰۰ ولت بر سانتی‌متر به ۲۰۰ ولت بر سانتی‌متر افزایش یافت، بازده اختلاط ابتدا کاهش و سپس به طور قابل توجهی برای محلول‌های پلی‌آکریل‌آمید ۱۰۰ تا ۴۰۰ پی‌پی‌ام افزایش پیدا کرد، اما بازده اختلاط برای محلول پلی‌آکریل‌آمید ۵۰۰ پی‌پی‌ام همچنان روند افزایشی داشت. وقتی که شدت میدان الکتریکی ۲۰۰ ولت بر سانتی‌متر بود، بازده اختلاط محلول پلی‌آکریل‌آمید ۵۰۰ پی‌پی‌ام به بیش از ۹۹ درصد رسید.

مطالعه مروری منابع پیشین نشان می‌دهد که اختلاط سیالات ویسکوالاستیک به ندرت مورد توجه محققان واقع شده است. کار حاضر علاوه بر معرفی میکرومیکسر T-Y شکل، اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک را به صورت عددی و با استفاده از معادله ساختاری اولدروید - بی مورد بررسی قرار می‌دهد. تأثیر سرعت ورودی یکسان، نسبت سرعت‌های ورودی و عدد وایزنبرگ بر بازده اختلاط ارزیابی و میزان افت فشار محاسبه و ارائه خواهد

صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Re = \frac{u_{in} D}{\eta_o} \quad (12)$$

$$Wi = \frac{u_{in} \lambda}{D} \quad (13)$$

$$Sc = \frac{\eta_o}{D_d} \quad (14)$$

و β نسبت لزجت حلال به لزجت کل η_o و c بیانگر غلظت است.

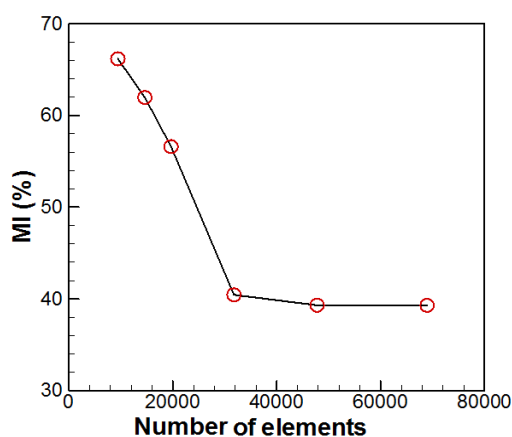
در نهایت، شاخص اختلاط با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$MI = 1 - \frac{\iint (c - \bar{c})^2 dA}{A \bar{c} (c_{max} - \bar{c})} \quad (15)$$

شاخص اختلاط میانگین غلظت در مقطع کانال خروجی است. A سطح مقطع کانال خروجی و c_{max} حداکثر غلظت نمونه در میکروکانال است. شاخص اختلاط صفر و ۱ به ترتیب نشان دهنده عدم اختلاط و اختلاط کامل است.

مطالعه شبکه

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، پنج شبکه مختلف با عناصر مثلی تولید شده است. شکل (۲) بازده اختلاط را برای حالتی که سرعت ورودی‌ها یکسان و برابر با ۰/۰۴ متر بر ثانیه و عدد وایزنبرگ برابر با ۰/۱ برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بازده اختلاط با افزایش تعداد المان‌ها از ۳۱۷۴۶ به ۴۶۷۶۳ تغییر چندانی نمی‌کند؛ بنابراین، این شبکه را می‌توان برای ادامه شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار داد.



شکل ۲ شاخص اختلاط بر حسب تعداد المان

که u بردار سرعت، ρ چگالی، P فشار و τ مجموع تنسور تنش برشی حلال (τ_s) و محلول الاستیک (τ_p) است [19]:

$$\tau = \tau_s + \tau_p \quad (3)$$

که

$$\tau_s = \eta_s [\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (4)$$

در این معادله، η_s لزجت دینامیکی حلال است. تنسور تنش برشی محلول با استفاده از معادلات ساختاری سیال ویسکوالاستیک مانند اولدروید - بی مدل می‌شود [19]:

$$\tau_p + \lambda \left[\frac{\partial \tau_p}{\partial t} + \nabla \cdot (u \tau_p) - (u \tau_p)^T \cdot \tau_p - \tau_p \cdot (\nabla u) \right] = \eta_p [\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (5)$$

که λ زمان تخفیف سیال ویسکوالاستیک و η_p لزجت دینامیکی محلول است. معادله ساختاری اولدروید - بی به شکل تنسوری به صورت زیر است:

$$\tau_p = \frac{\eta_p}{\lambda} [C - I] \quad (6)$$

که C و I به ترتیب، تنسور متقارن ساختاری و تنسور واحد هستند. با جاگذاری معادله (۶) در معادله (۵)، معادله (۵) به صورت زیر در می‌آید [16]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \nabla \cdot C - (\nabla u)^T \cdot C - C \cdot (\nabla u) = \frac{1}{\lambda} [I - C] \quad (7)$$

حال با استفاده از کمیات بدون بعد $\nabla^+ = D \cdot \nabla$ و $u^+ = u / u_{in}$ ، $t^+ = t u_{in} / D$ و $p^+ = p / (\rho u_{in}^2)$ معادلات بدون بعد به صورت زیر درخواهد آمد [19]:

$$\nabla^+ \cdot u^+ = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u^+}{\partial t^+} + u^+ \cdot \nabla^+ u^+ = -\nabla^+ p^+ + \frac{\beta}{Re} \nabla^{+2} u^+ + \frac{1 - \beta}{Re Wi} \nabla^+ \cdot C \quad (9)$$

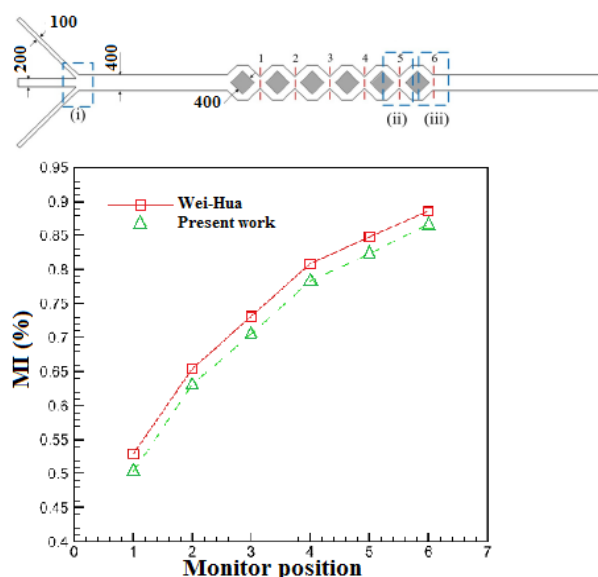
$$\frac{\partial C}{\partial t^+} + u^+ \nabla^+ \cdot C - (\nabla^+ u^+)^T \cdot C - C \cdot (\nabla^+ u^+) = \frac{1}{Wi} [I - C] \quad (10)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t^+} + u^+ \nabla^+ \cdot c = \frac{1}{Re Sc} \nabla^{+2} c \quad (11)$$

که اعداد بدون بعد رینولدز، وایزنبرگ و اشمیت به ترتیب به

اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از درستی روش عددی مورد استفاده، نتایج حاضر با داده‌های تجربی گزارش شده توسط وی‌هوا و همکاران [19] مقایسه می‌گردد. میکرومیکسر مورد مطالعه ایشان دارای سه ورودی بود که سیال اول از ورودی‌های جانبی و سیال دوم از ورودی میانی به درون میکروکانال اصلی تزریق می‌شدند (شکل ۳). موانع لوزی شکل تعبیه شده در کانال اصلی جهت افزایش بازده اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک به کار گرفته شدند. آن‌ها بازده اختلاط را به صورت عددی و آزمایشگاهی در فواصل مختلف از موانع لوزی شکل برای حالات مختلف به دست آوردند. در بخش شبیه‌سازی عددی، تعداد ۵۲۲۳۰ المان مورد استفاده قرار گرفت. مسأله فوق‌الذکر به صورت مشابه و با تعداد المان مساوی ایجاد و شبیه‌سازی برای حالتی که عدد رینولدز برابر با یک و عدد وایزنبرگ برابر با ۵ است صورت گرفت. شکل (۳) نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج برقرار است؛ بنابراین، روش عددی مورد استفاده دارای دقت قابل قبول برای انجام سایر شبیه‌سازی‌ها است. اختلاف موجود بین نتایج ناشی از تفاوت بین شرایط آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی است. به عنوان مثال، خطا در تزریق مایعات به صورت تجربی، ساده‌سازی‌های انجام شده در کار عددی و... لازم به ذکر است که مقطعی که در آن‌ها بازده اختلاط محاسبه شده، در شکل مشخص شده است.

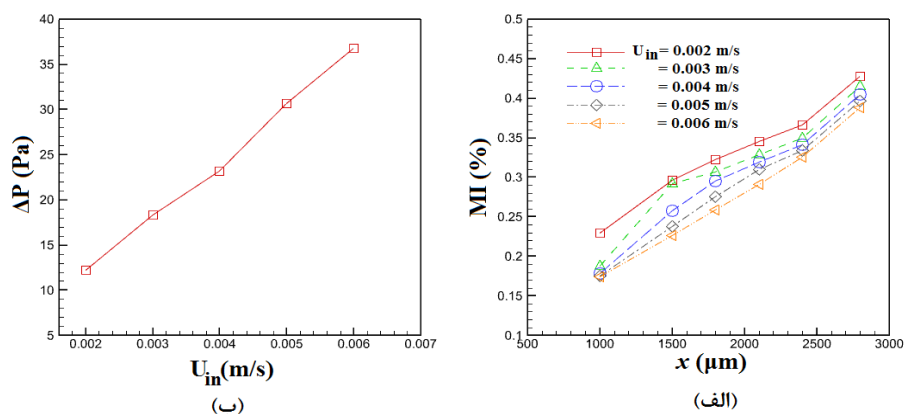


شکل ۳ طرح‌واره میکرومیکسر مورد مطالعه وی‌هوا و همکاران [19] و مقایسه شاخص اختلاط به دست آمده از کار حاضر و نتایج آزمایشگاهی وی‌هوا و همکاران [19]

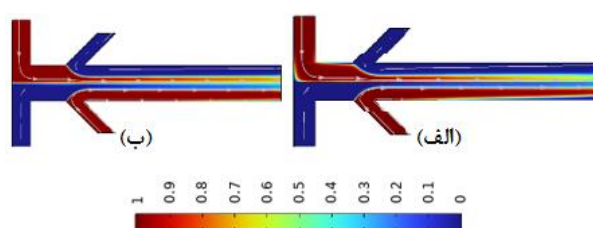
نتایج

بررسی اثر سرعت ورودی یکسان

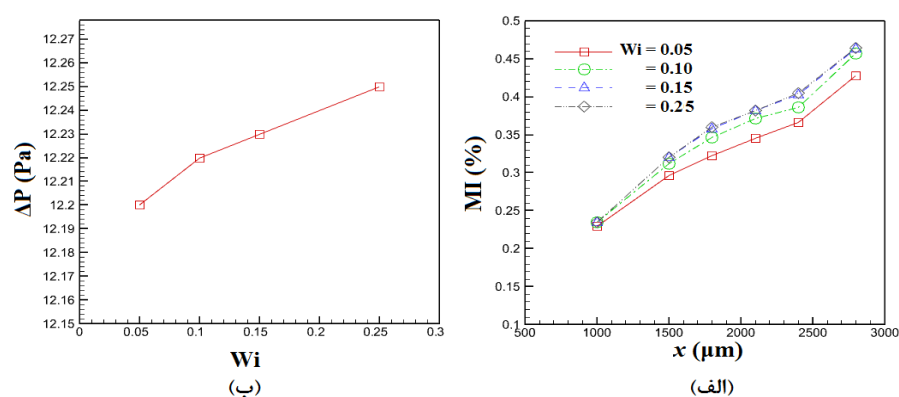
میکرومیکسر پیشنهادی دارای چهار ورودی است که دو سیال ویسکوالاستیک می‌توانند با سرعت‌های مختلف از طریق این ورودی‌ها تزریق شوند. مطابق شکل (۱)، از آنجا که به طور عملی از پمپ سرنگی جهت تزریق سیالات استفاده می‌شود، سرعت هر سیال باید یکسان باشد. در این بخش، سرعت‌های یکسان برای هر دو سیال در نظر گرفته می‌شود. در واقع، از لحاظ عملی، یک پمپ سرنگی برای تزریق سیالات کافی است. شبیه‌سازی‌ها در عدد وایزنبرگ برابر با ۱/۱ صورت گرفته است. طبق معادله (۱۳)، برای ثابت ماندن عدد وایزنبرگ و با تغییر سرعت، زمان تخفیف باید به طور مناسب تغییر پیدا کند. شکل (۴-الف) بازده اختلاط را در فواصل مختلف از طول کانال به ازای سرعت‌های ورودی مختلف و شکل (۴-ب) مقادیر افت فشار را برای سرعت‌های گوناگون نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در یک فاصله معین از کانال، بازده اختلاط با افزایش سرعت ورودی کاهش می‌یابد. به طور کلی، افزایش بازده اختلاط به دلیل ناپایدار شدن حرکت جریان سیالات است. سیالات ویسکوالاستیک نظیر پلیمرها، برخلاف سیالات نیوتنی، قادر به ذخیره انرژی هستند که می‌توانند نیروی برشی قوی‌تری ایجاد کنند و تحت کشش متناوب قرار گیرند که باعث ناپایداری الاستیک می‌شود. برای مقادیر یکسان عدد وایزنبرگ، اختلاط با افزایش سرعت ورودی تضعیف می‌شود، که به معنای اثر تضعیف‌کننده اینرسی در القای ناپایداری‌های الاستیک است. از آنجا که عدد رینولدز آن‌قدر کم است که نیروی اینرسی بسیار ضعیفی را نتیجه می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که اثر الاستیک در جریان سیال ویسکوالاستیک عامل اصلی افزایش اختلاط است. همچنین، مشاهده می‌شود که افت فشار با افزایش سرعت افزایش یافته است، زیرا افت فشار میزان مصرف انرژی را مشخص می‌کند و انتظار می‌رود با افزایش سرعت، میزان مصرف انرژی افزایش یابد. شکل (۵) کانتور غلظت را برای دو مقدار سرعت ورودی حداقل و حداکثر در کار حاضر نشان می‌دهد. این شکل تأیید می‌کند که کیفیت اختلاط در طول کانال افزایش یافته است اما میزان این افزایش برای دو سرعت مختلف چندان قابل توجه نیست. همان گونه که شکل (۴-ب) نیز نشان می‌دهد در فاصله ۲۸۰۰ میکرومتری از ابتدای کانال اصلی، شاخص اختلاط از حدود ۴۶٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۲ متر بر ثانیه به حدود ۳۸٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۶ متر بر ثانیه رسیده است.



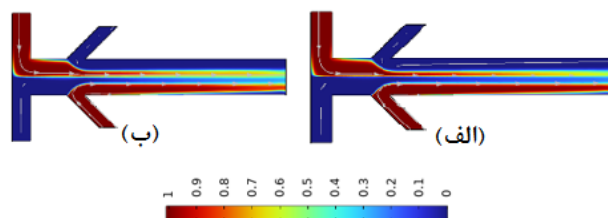
شکل ۴ (الف) شاخص اختلاط در طول کانال و (ب) افت فشار به ازای $Wi = 0.1$ و مقادیر مختلف سرعت ورودی



شکل ۵ کانتور غلظت برای $Wi = 0.1$ و (الف) $U_{in} = 0.002$ m/s و (ب) $U_{in} = 0.006$ m/s



شکل ۶ (الف) شاخص اختلاط در طول کانال و (ب) افت فشار به ازای $U_{in} = 0.002$ m/s و مقادیر مختلف عدد وایزنبرگ



شکل ۷ کانتور غلظت برای $U_{in} = 0.002$ m/s و (الف) $Wi = 0.05$ و (ب) $Wi = 0.25$

بررسی اثر عدد وایزنبرگ

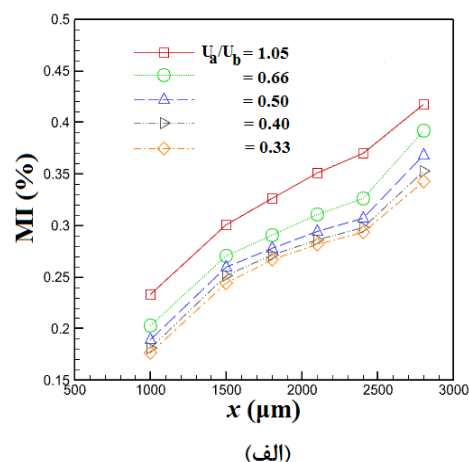
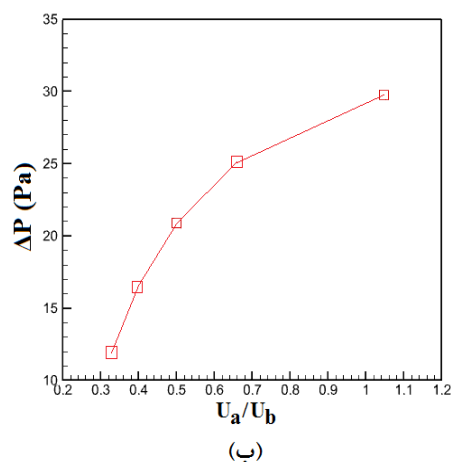
می‌دهد با افزایش عدد وایزنبرگ، شاخص اختلاط در مقاطع مختلف میکروکانال افزایش می‌یابد زیرا در اعداد وایزنبرگ بزرگ‌تر، ناپایداری سیال ویسکوالاستیک بیشتر می‌شود. به طور

در این بخش، اثر عدد وایزنبرگ بر شاخص اختلاط و توزیع فشار در یک سرعت معین بررسی می‌شود. شکل (۶-الف) نشان

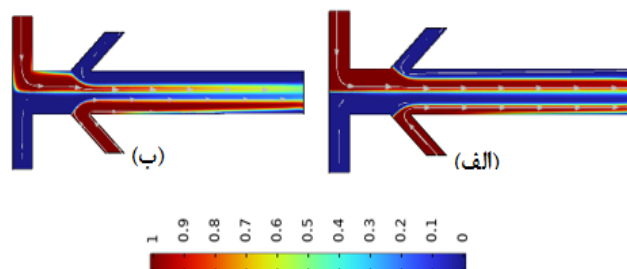
بررسی اثر نسبت سرعت

از آنجا که میکرومیکسر پیشنهادی دارای دو ورودی برای هر سیال است، می‌توان با تغییر نسبت سرعت‌ها، شاخص اختلاط را ارزیابی کرد. در عمل، استفاده از دو پمپ سرنگی برای نسبت سرعت‌های متفاوت الزامی است. در این بخش، اثر نسبت سرعت بر شاخص اختلاط و افت فشار دو سیال ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۸-الف) نشان می‌دهد که با کاهش نسبت سرعت، شاخص اختلاط کاهش می‌یابد. جریان آشوبناک ایجاد شده در محل اتصال ورودی‌ها با کاهش نسبت سرعت تضعیف می‌شود و همین کاهش انتقال جرم موجب کاهش کیفیت اختلاط می‌گردد. انتظار می‌رود که با کاهش نسبت سرعت و کم شدن نیروی اینرسی، افت فشار کاهش یابد که شکل (۸-ب) مؤید این مطلب است. با افزایش کانتور غلظت ارائه شده در شکل (۹) نیز به وضوح نشان می‌دهد با افزایش نسبت سرعت ورودی‌ها، شاخص اختلاط افزایش پیدا می‌کند.

کلی، حرکات جریان آشوبناک به طور مداوم در محل اتصال ورودی‌ها ایجاد می‌شود. جریان آشوبناک ابتدا در محل اتصال ورودی‌ها ایجاد می‌شود. پس از آن، در کانال مستقیم، بر خلاف حالت لایه‌ای در سیالات نیوتنی، جریان سیالات ویسکوالاستیک با غلظت‌های مختلف به صورت نامنظم‌تری حرکت می‌کنند. در نتیجه، انتقال جرم سیالات و کیفیت اختلاط آن‌ها بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش عدد وایزنبرگ به معنی افزایش انتقال جرم لایه‌های سیال است. در محدوده اعداد وایزنبرگ بررسی شده در کار حاضر، افزایش شاخص اختلاط چشم‌گیر نیست. وی‌هوا و همکاران [19] به طور تجربی نشان دادند که سیالات ویسکوالاستیک در اعداد وایزنبرگ مرتبه ۱۰ نوسانات بسیار بزرگ‌تری را نشان می‌دهند. شکل (۶-ب) نیز نشان می‌دهد افت فشار با افزایش عدد وایزنبرگ یا به عبارتی افزایش زمان تخفیف زیاد می‌شود، اگر چه که این افزایش بسیار ناچیز است. کانتورهای غلظت نشان داده شده در شکل (۷) نیز تأیید می‌کند افزایش عدد وایزنبرگ از ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ تأثیر چندانی بر کیفیت اختلاط ندارد.



شکل ۸ (الف) شاخص اختلاط در طول کانال و (ب) افت فشار به ازای $\lambda = 0.025$ s و مقادیر مختلف نسبت سرعت



شکل ۹ کانتور غلظت برای $\lambda = 0.025$ s و (الف) $U_a/U_b = 0.33$ و (ب) $U_a/U_b = 1.05$

نتیجه‌گیری

کار حاضر علاوه بر معرفی میکرومیکسر T-Y شکل، اختلاط دو سیال ویسکوالاستیک را به صورت عددی و با استفاده از معادله ساختاری اولدروید - بی مورد بررسی قرار داده است. تأثیر سرعت ورودی یکسان، نسبت سرعت‌های ورودی و عدد وایزنبرگ بر بازده اختلاط ارزیابی و میزان افت فشار محاسبه و نتایج زیر به دست آمد:

۱. در یک فاصله معین از کانال، به دلیل ناپایدار شدن حرکت جریان سیالات بازده اختلاط با کاهش سرعت ورودی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در فاصله ۲۸۰۰ میکرومتری از ابتدای کانال اصلی، شاخص اختلاط از حدود ۴۶٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۲ متر بر ثانیه به حدود ۳۸٪ برای سرعت ورودی ۰/۰۰۶ متر بر ثانیه رسیده است.
۲. با افزایش عدد وایزنبرگ، شاخص اختلاط در مقاطع مختلف میکروکانال افزایش می‌یابد زیرا در اعداد وایزنبرگ بزرگ‌تر، ناپایداری سیال ویسکوالاستیک بیشتر می‌شود.
۳. در یک فاصله معین از کانال، بازده اختلاط با افزایش سرعت

ورودی کاهش می‌یابد. به طور کلی، افزایش بازده اختلاط به دلیل ناپایدار شدن حرکت جریان سیالات است.

۴. افت فشار نیز با افزایش سرعت، عدد وایزنبرگ و نسبت سرعت افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌نامه

Microfluidics	میکروفلوئیدیک
Micrmixer	میکرومیکسر
Weissenberg number	عدد وایزنبرگ
Reynolds number	عدد رینولدز
Navier-Stokes Equations	معادلات ناویر - استوکس
Oldroyd-B	اولدروید - بی
Mixing index	شاخص اختلاط
Viscoelastic fluid	سیال ویسکوالاستیک

تقدیر و تشکر

مراجع

- [1] F. Moradi, P. Pournadri, "Simulation of nanofluid flow at low Reynolds number in a microchannel with one-way source expansion under the effect of magnetic field," *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, Oct., pp. 85-100, 2023. (In Persian) 10.22067/jacsm.2023.79298.1143.
- [2] A. Jahanbakhshi, A. Ahmadi Nadushan, M. Bayareh, "Effect of adding microtube on thermal and hydrodynamic behavior of a heatsink microchannel for nanofluid flow," *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 1, Jan., pp. 21-36, 2022. (In Persian) 10.22067/jacsm.2022.75344.1100.
- [3] A. Jahanbakhshi, A. Ahmadi Nadushan, D. Bahrami, M. Bayareh, "Numerical investigation of forced displacement in a microchannel Numerical investigation of forced convection in a microchannel in the presence of the slip condition and nanofluid," *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 4, Dec., pp. 53-64, 2022. (In Persian) 10.22067/jacsm.2022.77928.1133.
- [4] M. Bayareh, M.N. Ashani, A. Usefian, "Active and passive micromixers: A comprehensive review," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 147, p. 107771, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107771>.
- [5] N. Kockmann, T. Kiefer, M. Engler, P. Woias, "Convective mixing and chemical reactions in microchannel with high flow rates," *Sensors Actuators B Chemical*, vol. 117, no. 2, pp. 495-508, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.01.004>.
- [6] G. S. Jeong, S. Chung, C. B. Kim, S. H. Lee, "Applications of Micromixing Technology," *Analyst*, vol. 135, no. 3,

- pp. 460–473, 2010. <https://doi.org/10.1039/B921430E>.
- [7] Y. K. Suh, S. Kang, “A Review on mixing in microfluidics,” *Micromachines*, vol. 1, no. 3, pp. 82-111, 2010. <https://doi.org/10.3390/mi1030082>.
- [8] N. T. Nguyen, Z. Wu, “Micromixers A review,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 15, no. 2, p. R1, 2004. 10.1088/0960-1317/15/2/R01.
- [9] C. A. Cortes-Quiroz, A. Azarbadegan, M. Zangeneh, “Evaluation of flow characteristics that give higher mixing performance in the 3-D T-mixer versus the typical T-mixer,” *Sensors Actuators B Chemical*, vol. 202, pp. 1209-1219, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.06.042>.
- [10] M. A. Ansari, K.Y. Kim, “Mixing performance of unbalanced split and recombine mixromixers with circular and rhombic sub-channels,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 162, no. 2, pp. 760-767, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.068>.
- [11] T. M. Dundi, V. R. K. Raju, V. P. Chandramohan, “Characterization of mixing in an optimized designed T-T mixer with cylindrical elements,” *Chinese Journal of chemical Engineering*, vol. 27, no. 10, pp. 2337-2351, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.01.030>.
- [12] T. N. T. Nguyen, M. C. Kim, J. S. Park, N. E. Lee, “An effective passive microfluidic mixer utilizing chaotic advection,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 132, pp. 172-181, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.01.022>.
- [13] B. S. Kim, B. S. Kwak, S. Shin, S. Lee, K. M. Kim, H. I. Jung, “Optimization of microscale vortex generators in a microchannel using advanced response surface method,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 1-3, pp. 118-125, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.061>.
- [14] R. Milotin, D. Lelea, “The Passive Mixing Phenomena in Microtubes with baffle Configuration,” *Procedia Technology*, vol. 22, pp. 243-250, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.075>.
- [15] N. Solehati, J. Bae, A. P. Sasmito, “Numerical investigation of mixing performance in microchannel T-junction with wavy structure,” *Computers & Fluids*, vol. 96, pp. 10-19, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.03.003>.
- [16] S. Wong, M. Ward, C. Wharton, “Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 100, no. 3, pp. 359–379, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.02.008>.
- [17] W. Yuan, M. Zhang, B. C. Khoo, N. P. Thien, “On peculiar behaviours at critical volumns of a three-dimensional bubble rising in viscoelastic fluids,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 293, p. 104568, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2021.104568>.
- [18] L. Moreno, R. Codina, J. Baiges, “Numerical simulation of non-isothermal viscoelastic fluid flows using a VMS stabilized finite element formulation,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 296, p. 104640, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2021.104640>.
- [19] C.W. Hua, L. Y. Yao, Z. H. Na, L. Y. Ke, C. J-Ping, L. X. Bin, “An efficient micro-mixer by elastic instabilities of viscoelastic fluids: Mixing performance and mechanistic analysis,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 74, pp. 130-143, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.09.006>.
- [20] J. Yang, Y. Chen, C. Du, X. Guan, J. Li, “Numerical simulation of electroosmotic mixing of non-Newtonian fluids

- in a micromixer with zeta potential heterogeneity,” *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 186, p. 109339, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109339>.
- [21] Y. Chen, J. Li, Z. Lv, Y. Wei, C. Li, “Mixing performance of viscoelastic fluids in an induced charge electroosmotic micromixer with a conductive cylinder,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 317, p. 105047, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2023.105047>.

Electromechanical-Growth Model for Simulating Myocardial Concentric Hypertrophy in Systemic Hypertension

Research Article

Soheila Shabani¹, Akbar Allahverdzadeh², Pezhman Namashiri³ 

 [10.22067/jacsm.2024.87993.1255](https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.87993.1255)

Abstract

Computational modeling of cardiovascular system is one of the important research areas that can be used to analyze the response of the heart in healthy and disease states. In this study, an integrated electromechanical-growth biventricular model has been developed to simulate concentric hypertrophy caused by systemic hypertension. By using Windkessel three-element blood circulation model and expanding the heart pressure model from previous studies, the pressure of the left and right ventricles was modeled. The implementation of concentric growth kinematics equations was developed from previous studies to be integrated with the electromechanical model. The model was fully implemented in COMSOL commercial finite element software and the validation was performed with previous studies. Results showed that the tissue grows to deal with critical stresses and reduces maximum stress magnitude. Furthermore, it was observed that the thickness of the left ventricular walls increases significantly in this disease and the ejection fraction decreases along with the end-diastolic volume of the heart. The presented model can be improved in future by including Purkinje fibers or using an extracted cardiac geometry from medical images.

Keywords: Cardiac Electromechanics, Growth, Hypertrophy, Systemic Hypertension, Finite Element Analysis.

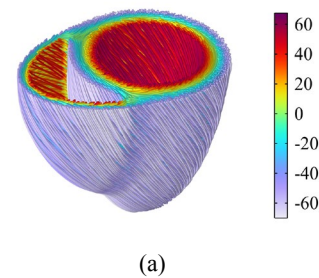
1- Introduction

Increased left ventricular blood pressure can occur in various diseases, such as aortic valve stenosis. Since, in systemic hypertension, the heart is under critical stress, concentric hypertrophy occurs, and tissue stiffness increases. These changes ultimately affect the behavior of the heart, causing disturbance in pump function. Concentric hypertrophy occurs in response to critical stress, and the heart grows and changes its structure to adapt to these conditions. In patients with pressure overload, the ratio of wall thickness to ventricular radius increases in response to increased pressure, and the heart

mainly reacts to systolic stress. In fact, the heart begins the growth and remodeling process in order to compensate for mechanical demands. In this study, a biventricular electromechanical model of the heart has been developed by including finite growth kinematic equations to simulate growth in systemic hypertension. The electrophysiology and active stress models are of a phenomenological type, and blood pressure is based on the Windkessel circulation. The blood pressure model has been developed in a way that can simultaneously calculate the pressure of the left and right ventricles. The equations of finite growth kinematics for concentric growth were defined in COMSOL Multiphysics software, and the implementation of the model was developed in such a way that the growth equations are integrated with the electromechanical model, allowing for the heart's growth to take place during the cardiac cycle.

2- Methods

An idealized biventricular geometry was used in this study and the orientation of cardiac fibers was defined using a rule-based method. The orientation of the fibers was considered as -70 degrees in the epicardium and +70 degrees in the endocardium. Myocardial sheet vector was defined in a way that they were parallel to the radial orientation of the heart and perpendicular to endocardial and epicardial surfaces. The orientation of fibers and sheets are shown in part (a) and (b) of Figure 1, respectively.



*Manuscript received: August . Revised, , Accepted, .

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

² Corresponding author. Assistant professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: allahverdzadeh@tabrizu.ac.ir

³ MSc, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

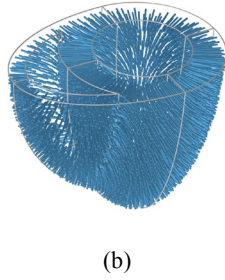


Fig. 1. Myocardial fiber orientation with color bar of fiber angle (a) and sheet orientation (b)

The formulation of electrophysiology was defined as monodomain by which the myocardial membrane potential was determined as:

$$\chi_m \left(C_m \frac{\partial \Phi}{\partial t} + I_{ion} \right) + \nabla \cdot (-D \nabla \Phi) = 0 \quad (1)$$

In equation (1), Φ represents the transmembrane potential. C_m and χ_m represent the capacitance of myocardial membrane and the ratio of membrane surface to the cardiomyocyte volume, respectively. D is a second-order tensor and represents the electrical conductivity of the myocardium. I_{ion} models ion current at cellular scale and is described by a set of ordinary differential equations. The ion current in this study was defined using a two-variable model that was dependent on the membrane potential and the recovery of the myocardium, each of these variables was determined by an ordinary differential equation. The electrical conductivity tensor was determined according to equation (2) in such a way that electrical conductivity along the fibers was faster than in other directions:

$$D = d_{iso} I + d_{ani} f_0 \otimes f_0 \quad (2)$$

In this equation, d_{iso} is the isotropic conduction speed of the tissue and d_{ani} describes the electrical conduction speed in the direction of myocardial fibers. $\otimes$ is dyadic product and I is the identity tensor. A phenomenological model was used to model the active stress of myocardium as follows:

$$\frac{\partial S_a}{\partial t} = \epsilon(\Phi) \left(K_{Sa} \left[\frac{\Phi - B}{A} \right] - S_a \right) \quad (3)$$

In equation (3), S_a is the active stress and K_{Sa} , A and B are constant parameters. $\epsilon(\Phi)$ is called the delay function and describes the rate of active stress. To describe myocardial concentric growth using finite growth kinematics approach, the deformation gradient tensor F was decomposed into the elastic F^e and F^g growth components. This approach can be imagined in a way that the small components of a continuous medium first grow in place and reach an intermediate configuration. These changes are described by F^g . Then, these components from the intermediate configuration attain to the secondary form in the deformed configuration by F^e , in which the calculations are performed as:

$$F^e = F F^{g-1} \quad (4)$$

In equation (4), F^{g-1} represents the inverse of the growth deformation tensor. In concentric growth investigated in this study, the growth deformation tensor

was defined in a way that tissue growth takes place along myocardial sheets. The evolution equation of growth $\dot{F}^g$ was adopted in a way that was dependent on the stress and speed of the growth τ_v , according to:

$$\dot{F}^g = \frac{1}{\tau_v} \langle \text{tr}(\tau) - p^h \rangle \quad (5)$$

In which the expression inside the Macaulay parentheses $\langle \text{tr}(\tau) - p^h \rangle$, is the growth criterion and shows that the growth takes place only when the trace of Kirchhoff stress $\text{tr}(\tau)$ is greater than the homeostatic stress p^h of the myocardium. To make the homeostatic stress of the tissue realistic, first the growth equations were separated from the model and three cycles of the electromechanical model of the heart were simulated and at the end of the third cycle, the trace Kirchhoff stress was extracted for the entire myocardium and defined as homeostatic stress for each point of the tissue. In fact, from the beginning of the fourth cycle, the growth caused by the pressure overload was simulated, and the coupling between the physics of growth and electromechanics of the heart was included in the model. Since systemic hypertension is related to the left ventricle, the growth equations were only attributed to that ventricle and growth was not considered for the right ventricle. This was done by using a step function with smooth transition in equation (5). Myocardial passive mechanics were considered as transversely isotropic and dependent on fiber orientations. To implement the equations of growth and coupling with the electromechanics of the heart, the second Piola-Kirchhoff stress tensor in COMSOL was modified as follows:

$$S = J^g F^{g-1} \left(\frac{\partial \Psi_{vol}}{\partial E^e} + \frac{\partial \Psi_{iso}}{\partial E^e} \right) F^{g-T} \quad (6)$$

where $E = \frac{1}{2} (F^{eT} F^e - I)$, is the elastic Green-Lagrange strain tensor and J^g is the determinant of the growth deformation tensor. $\bar{\Psi}_{iso}$ and Ψ_{vol} are the isochoric and volumetric parts of the strain energy function, respectively, which describe the passive mechanics of the tissue.

Ventricular pressure in this study was determined according to equation (7) in such a way that the volume of the chambers was equal to inflow and outflow of Windkessel models:

$$P_{BIV} = \omega (\Omega_{cur} - \Omega_{div}) \quad (7)$$

where Ω_{div} calculates the volume of the ventricle from the divergence theorem and Ω_{cur} is the blood volume calculated according to the flows of each ventricle using Windkessel circulation. A large value was considered for ω to regulate the ventricular pressure based on the calculated volumes. Two types of equation (8), one for the left ventricle and the other type for the right ventricle, were used so that the pressure of the left and right ventricles can be calculated according to inflow and outflow.

3- Verification

In order to verify growth equations, the Neo-Hookean model was used for passive mechanics, and the growth were considered stress-dependent. As a boundary condition, a clinical pressure was applied to the

endocardium. The verification is shown in Figure 2, which shows maximum growth in the myocardium, and despite the fact that the geometry of this study is different from the reference study, results show a good agreement. The major difference occurs in about 400 ms. However, the results are consistent at the end of the simulation and converge to the same value.

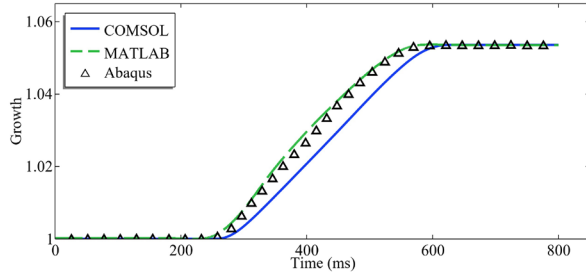


Fig. 2. Verification of growth in present study (solid blue line) with reference study that used Abaqus and MATLAB

4- Results and Discussion

Figure 3 shows the changes of ventricular pressures in the first three cycles related to the normal case of the heart. It can be seen that both ventricles go through cardiac phases simultaneously and perform heart pumping function. The maximum left and right ventricular pressures in normal case was 120 and 25.24 mmHg, respectively.

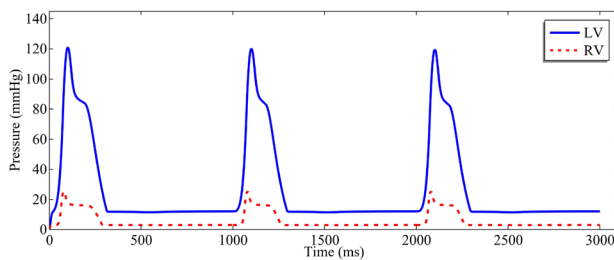


Fig. 3. Pressure of left (LV) and right (RV) ventricles in first three cycles of normal case in electromechanical model

Figure 4 shows concentric hypertrophic growth in response to systemic hypertension in anterior and posterior views along with the magnitude of displacement at the end of the third and seventeenth cycle. A growth multiplier with a value of 1 means that the cardiac cardiomyocyte has not grown, and a value of 1.5 indicates that 50% has been added to the number of sarcomeres in transverse direction of the cell. On a macroscopic scale, systemic hypertension showed a thickening of the left ventricular wall in radial direction of the heart in order to enable the heart to withstand the pressure and the resulting high stresses. At the time of third cycle, which is the end of the third cycle, the myocardium does not grow and the heart is in a normal state. At the end of the seventeenth cycle, the heart showed a significant growth of approximately 1.5 in the posterior view. It can be observed from Figure 4 that the thickness of the left ventricle was increased significantly, but the size of the heart was remained relatively constant.

In part (c) and (d) of Figure 4, the negative sign in the displacement color bar means that the longitudinal displacement of the heart towards the apex has occurred.

A positive sign indicates a longitudinal shift towards the upper surface of the heart. At the end of 3000 ms, the heart has shown some displacement, and it should be noted that the displacement shown is relative to the stress-free configuration and initial geometry of the model. Since at the end of the third cycle, the inner wall of the heart is under the end-diastolic pressure, this pressure has caused the displacement of the heart in the longitudinal direction. At the end of seventeenth cycle, the growth of the tissue caused a displacement in the longitudinal direction of the heart by an amount of approximately 0.25 cm towards the apex.

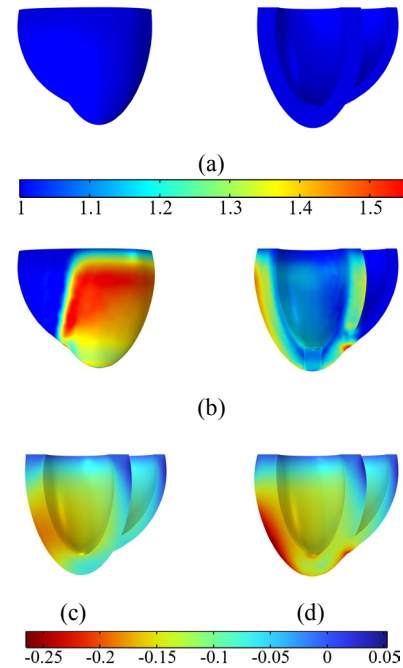


Fig. 4. Myocardium in normal state of third cycle (a) and after growth in seventeenth cycle (b) (color bar indicate growth multiplier) along with the magnitude of displacement at the end of the third (c) and seventeenth (d) cycles (the color bar is the magnitude of displacement in cm)

The increase in the thickness of left ventricular free wall and the septal wall in this study was 30% and 22%, which are shown in parts (a) and (b) of Figure 5, respectively. This increase in thickness has been calculated and normalized with respect to the thickness of myocardial wall at the end of the third cycle, when it is under end-diastolic pressure. Since the septal wall is constrained by the right ventricle, it experiences less stress and therefore less growth than the left ventricular free wall. A 30% increase in the thickness of left ventricular free wall meant that the thickness of the wall reached an approximate value of 1.5 cm at the end of the seventeenth cycle. It is noteworthy that at the beginning of each cycle, the thickness of the walls underwent an abrupt change due to the current pulse applied for myocardial activation. An increase in the thickness of the wall during cardiac cycle means that the wall is contracted and the heart is pumping blood into the body. Decrease in thickness indicate that heart enters the diastolic phase and the blood applies pressure on the inner layer of the heart, causing wall thickness to decrease.

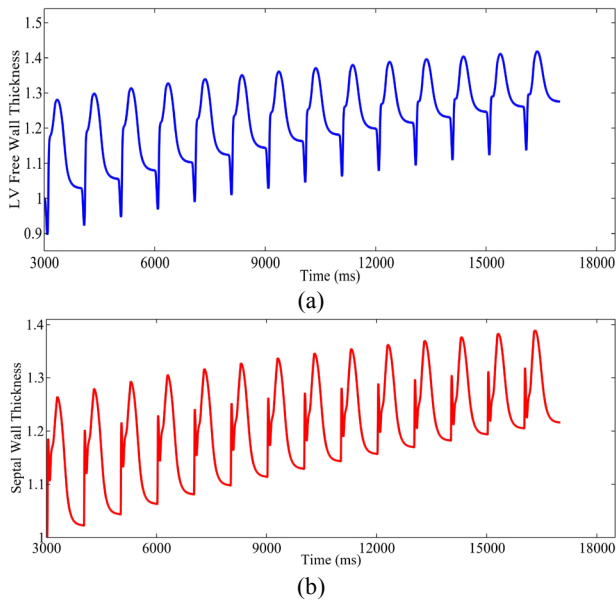


Fig. 5. Increase of left ventricular free wall (a) and septal wall (b) thicknesses from the fourth to seventeenth cycle during growth

Changes of growth multiplier in different cycles for two points at a distance of one-third from the upper surface of the heart in the epicardium of the left ventricular free wall and septal wall are shown in Figure 6. In third cycle (between 2000 and 3000 ms), the growth multiplier was equal to 1, and at the end of the seventeenth cycle, was about 1.48 and 1.36 for the left ventricular free wall and the septal wall, respectively. From the fourth cycle onwards, both walls started to grow. The increase in the growth multiplier was gradual since in each cycle, the heart contracts and the stress increases, and after the contraction, the heart enters the diastolic phase and the amount of stress and as a result the growth of the tissue decreases. Since the stress of the septal wall was lower than the left ventricular free wall, the growth at the point associated with the septal wall, due to the direct dependency of growth multiplier to the stress based on equation (5), was also lower than the left ventricular free wall.

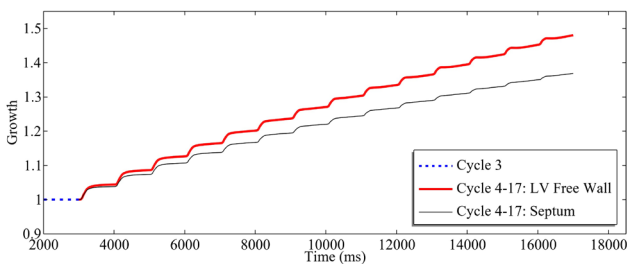


Fig. 6. Growth multiplier in the epicardium of the left ventricular free wall and septal wall for cycles 3 to 17

Figure 7 shows the pressure-volume loop of the left ventricle in normal case of the third cycle and concentric growth caused by systemic hypertension in the seventeenth cycle. Compared to the normal case, the ventricular pressure in growth case was significantly reduced. The simulation performed in this study is related to the second and third phases of systemic hypertension and its structural changes. The process of ventricular

pressure reduction in the present model can be justified from two physiological and mathematical perspectives. Physiologically, the heart grows to be able to withstand high pressure and stress, as a result, the pressure decreases due to the increase in wall thickness and tissue stiffness. Based on Laplace's law, the wall stress decreases with the increase of thickness and thus leads to a decrease in ventricular pressure. Mathematically, according to equation (7), the ventricular pressure is dependent on the volume change of the ventricles. Since the wall of the ventricle has grown and become thicker, the volume change of the ventricle during cardiac cycle has decreased, causing the reduction of ventricular pressure. According to Figure 7, the end-diastolic volume of the heart decreased in seventeenth cycle, compared to the normal state. Furthermore, since the blood flows were reduced, the ejection fraction in the disease was reduced. The amount of ejection fraction in normal case was 51.46% and in the seventeenth cycle of concentric growth was equal to 42.47%. Moreover, the end-diastolic volume of normal case and concentric growth were equal to 55.78 and 52.46 ml, respectively.

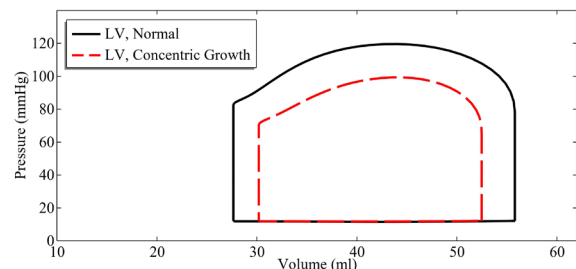


Fig. 7. The pressure-volume loop of the left ventricle in the normal case of the third cycle and the growth caused by the systemic hypertension in seventeenth cycle

5- Conclusion

In this study, an electromechanical model of the heart was coupled with the finite growth kinematic equations and was utilized to simulate the structural changes caused by systemic hypertension. In this model, an idealized biventricular geometry and phenomenological models for the electrical response and active stress of the heart were used, and the blood pressure of each ventricle was simulated using Windkessel circulation. The approach adopted for modeling the ventricular pressure was developed in such a way that left and right ventricular pressures can be calculated simultaneously. Coupling electromechanical physics and growth equations provided the advantage that growth occurs during the cardiac cycle, taking into account the electromechanical and circulatory behavior of the heart. This realistic approach integrated electrophysiology and passive mechanics with the growth equations. The results of the model showed that the thickness of the left ventricular free wall and the septal wall increases significantly due to the growth caused by the systemic hypertension disease. Furthermore, the ejection fraction and end-diastolic volume of the heart decreased due to this disease. Moreover, the results showed that the heart grows and adapts to critical conditions in order to cope with maximum stress and pressure. The presented model was entirely implemented in COMSOL commercial finite element software, and in the future, the model can be expanded by including Purkinje fibers, heart valves, and blood circulation of other cardiac compartments.



مدل الکترومکانیک - رشد برای شبیه سازی هایپر تروپی کانستریک میو کاردیوم در افزایش فشار خون سیستمیک*

مقاله پژوهشی



پژمان نمه شیر (۳)

اکبر اللهوردی زاده (۲)

سهیلا شبانی (۱)

doi 10.22067/jacsm.2024.87993.1255

چکیده مدل سازی محاسباتی سیستم قلبی - عروقی یکی از حوزه های تحقیقاتی مهم هست که به کمک آن می توان پاسخ قلب را در حالت های سالم و بیماری مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در این پژوهش یک مدل دوبطنی یکپارچه الکترومکانیک - رشد برای شبیه سازی هایپر تروپی کانستریک ناشی از افزایش فشارخون سیستمیک توسعه داده شده است. با به کارگیری مدل گردش خون سه المان و بند کسل و بسط دادن مدل فشار قلب از پژوهش های پیشین، فشار بطن های چپ و راست مدل سازی شد. پیاده سازی روابط سینماتیک رشد کانستریک برای یکپارچه سازی با مدل الکترومکانیکی از مطالعات پیشین توسعه داده شد. مدل به طور کامل در نرم افزار المان محدود تجاری کامسول پیاده سازی شد و اعتبارسنجی آن با پژوهش های پیشین انجام گرفت. نتایج نشان داد که بافت برای مقابله با تنش های بحرانی رشد پیدا کرده و مقادیر بیشینه تنش را کاهش می دهد. همچنین، مشاهده شد که ضخامت دیواره های بطن چپ به طور قابل توجهی در این بیماری افزایش پیدا می کنند و کسر تخلیه به همراه حجم انتهای دیاستول قلب نیز کاهش پیدا می کند. مدل ارائه شده می تواند در آینده با گنجاندن فیبرهای پورکیتری و یا استفاده از هندسه قلبی استخراج شده از تصاویر پزشکی بهبود یابد.

واژه های کلیدی الکترومکانیک قلب، رشد، هایپر تروپی، افزایش فشارخون سیستمیک، تحلیل المان محدود.

مقدمه

پیدا می کند و منجر به اختلال در خونریزی بافت قلب، افزایش سفتی و در نتیجه کاهش عملکرد پمپی قلب می شود [3]. رشدی که در پاسخ به تغییرات بحرانی در بافت ها و اندام ها رخ می دهد، رشد تطبیقی نامیده می شود و برای سازگاری با شرایط بحرانی صورت می گیرد. رشد تطبیقی و بازسازی قلب به طور کلی به عنوان هایپر تروپی قلبی طبقه بندی می شود. هایپر تروپی قلبی زمانی که با عملکرد طبیعی قلب همراه باشد به عنوان فیزیولوژیک و هنگامی که با اختلال عملکرد قلب همراه باشد به عنوان پاتولوژیک دسته بندی می شود [2]. هایپر تروپی پاتولوژیک توسط عواملی مانند تنش همودینامیک طولانی مدت و غیرطبیعی ناشی از فشارخون بالا و یا انفارکتوس میو کاردیوم ایجاد می شود [4]. با توجه به مشاهدات بالینی، فشارخون

مدل سازی محاسباتی و استفاده از روش المان محدود رویکردی است که به کمک آن می توان شناخت بهتری از پدیده ها و بافت های مختلف موجودات زنده پیدا کرد و مدل های ساختاری متفاوتی را برای آن ها ارائه داد تا بتوانند رفتار آن ها را در شرایط مختلف توصیف کنند [1]. افزایش فشارخون بطن چپ می تواند در بیماری های مختلف همانند تنگی آئورت، انسداد جزئی مجرای خروجی بطن چپ و باریک شدن شریان ها به وجود آید. در این شرایط، قلب چپ دچار تغییرات بنیادی می شود تا بتواند نیازهای مکانیکی خود را جبران کند [2]. هنگام افزایش فشارخون سیستمیک، هایپر تروپی کانستریک قلب به دلیل تنش بحرانی ناشی از فشارخون بالا رخ می دهد و ضخامت دیواره قلبی افزایش

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۲/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۵/۳۰ می باشد.

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

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

Email: allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

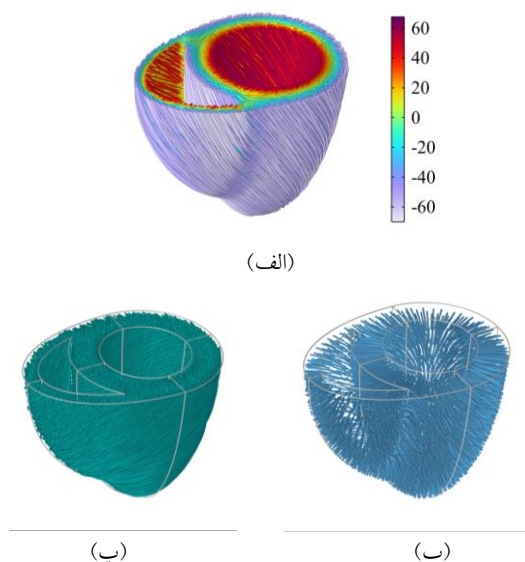
(۳) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

سیستولیک ۱۴۰ میلی‌متر جیوه و یا بیشتر از آن به عنوان افزایش بیش از حد فشار در نظر گرفته می‌شود [5]. گروسمن و همکاران [6] تغییرات میزان هایپرتروپی قلبی بیمارانی را که دچار افزایش بیش از حد فشار و حجم شده بودند مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که در بیماران مبتلا به افزایش بیش از حد فشار، نسبت ضخامت دیواره به شعاع بطن، در پاسخ به فشارهای افزایش یافته بیشتر می‌شود. از این مشاهده این فرضیه بیان شد که قلب عمدتاً به تنش سیستولیک واکنش نشان می‌دهد و در بیمارانی که افزایش بیش از حد فشار را تجربه کرده‌اند، قلب برای جبران نیازهای مکانیکی خود شروع به رشد و بازسازی می‌کند. اولین مدل برای رشد حجمی در بافت‌های بیولوژیکی حدود دو دهه پیش توسط رودیگر و همکاران [7] معرفی شد این مدل از مفهوم پیکربندی رشد ناسازگار استفاده کرد که تجزیه ضربی گرادیان تغییر شکل را به یک بخش الاستیک و یک بخش رشد انجام می‌دهد. رشد در آنجا به عنوان تغییر در شکل و اندازه بافت با استفاده از تانسور تغییر شکل رشد مدل‌سازی می‌شود. گوکتپ و همکاران [8] برای نخستین بار مدل‌سازی هایپرتروپی کانستریک را به کمک تئوری رشد محدود بر اساس تجزیه ضربی تانسور گرادیان تغییر شکل انجام دادند که تابع انرژی کرنش استفاده شده در بخش الاستیک از نوع همسانگرد نئوهوکن بود و رشد حجمی محدود با محرک مکانیکی مدل شده بود. راوش و همکاران [9] روشی برای توضیح و پیش‌بینی تغییرات شکل و عملکرد قلب در پاسخ به افزایش فشارخون سیستمیک و ریوی با استفاده از نظریه مکانیک محیط پیوسته ارائه دادند. فشار اعمالی به بطن چپ و راست در مدل آن‌ها واقع‌گرایانه نبود و در یک بازه زمانی، فشار ثابتی را به لایه داخلی قلب اعمال نمودند. بربراولو و همکاران [10] برای کوپل رفتار الکترومکانیکی، از مدل هیل تعمیم‌یافته استفاده کردند که بر اساس تجزیه ضربی گرادیان تغییر شکل به بخش‌های فعال و منفعل و تجزیه اضافی تابع انرژی کرنش بود. از مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی حالت‌های پاتولوژیکی هایپرتروپی کانستریک و اکستریک استفاده کردند.

دل بیانکو و همکاران [11] طی مطالعه‌ای چگونگی تأثیر هایپرتروپی بر الکتروفیزیولوژی قلب را بررسی کردند. آن‌ها هایپرتروپی کانستریک ناشی از تنگی آئورت را در یک مدل هندسی بطن چپ شبیه‌سازی کردند و فرض کردند که رشد هر

نقطه از بافت متفاوت است و تنها یک پارامتر کلی برای سرتاسر قلب نمی‌تواند شرایط بحرانی بافت را توصیف کند. لام و همکاران [12] یک رویکرد جدید برای توصیف رشد حجمی مبتنی بر تنش ایجاد کردند که در آن رفتار رشد همسانگرد و ناهمسانگرد را بدون استفاده از یک تانسور رشد از پیش تعیین شده شبیه‌سازی می‌کرد و تابع انرژی کرنش در مدل از دو جزء انرژی ذخیره شده الاستیک و انرژی مربوط به رشد تشکیل شده بود. میلیچوی و همکاران [13] مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی را ارائه دادند که برای ردیابی هایپرتروپی قلب استفاده می‌شوند. داده‌ها را از چندین بیمار جمع‌آوری کردند و سپس مدل با استفاده از سابقه پزشکی بیمار و سطح فعلی سلامت قلب آموزش داده شد. همچنین یک مدل را با استفاده از روش المان محدود برای شبیه‌سازی هایپرتروپی قلبی ارائه دادند. نتایج نشان داد که مدل المان محدود بسیار کندتر است، اما در مقایسه با مدل یادگیری ماشین دقیق‌تر است، زیرا بر اساس قوانین فیزیکی است که فرایند هایپرتروپی را توصیف می‌کنند. از سوی دیگر، مدل یادگیری ماشین با اینکه سریع است اما نتایج در برخی از آن‌ها کمتر قابل اعتماد است. ناردینوچی و ترسی [14] رشد را در ساختارهای استوانه‌ای دارای لایه‌های مختلف مدل‌سازی کردند و به بررسی رابطه بین رشد ناهمسانگرد و انرژی الاستیک ذخیره شده در بافت‌های نرم فیبردار پرداختند و تمرکز انرژی الاستیک را در محل رابط لایه‌ها نشان دادند. نم‌شیری و همکاران [15] رویکردی برای مدل‌سازی سینماتیک رشد محدود در بیماری نارسایی قلبی دیاستولیک با استفاده از نرم‌افزار کامسول ارائه دادند. آن‌ها از هندسه دوبطنی ایدئال و تعریف ریزساختار قلب با روش ریاضی و مدل مادی همسانگرد عرضی برای مکانیک منفعل بافت قلب استفاده کردند و پاسخ الکترومکانیکی میوکاردیوم را در مدل‌سازی لحاظ نکرده بودند و پارامتر محرک رشد به صورت سرتاسری برای قلب تعریف شده بود و برای هر نقطه متفاوت نبود. نتایج آن‌ها نشان داد که ضخامت دیواره‌های بطن چپ و راست در پاسخ به تنش‌های بحرانی در بیماری افزایش پیدا می‌کنند و مدل توانست از منظر کیفی و کمی رشد را در نارسایی قلبی دیاستولیک شبیه‌سازی کند. کامسول یک نرم‌افزار تجاری مبتنی بر روش المان محدود است که علاوه بر استفاده در مدل‌سازی قلب، در تحقیقات مختلفی همانند شبیه‌سازی سرطان‌های کبد و پوست به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است و توانایی آن در حل معادلات غیرخطی نشان داده شده است [16,17].

اندوکاردیوم فرض شد [10]. شیت‌ها به صورت عمود بر لایه‌های داخلی و خارجی میوکاردیوم و در جهت شعاعی قلب تعریف شدند [18]. جهت‌گیری عمود بر شیت‌ها نیز از ضرب خارجی بردار فیبر و شیت تعیین شد. جهت‌گیری‌های هر سه بردار فیبر f_0 ، شیت s_0 ، و عمود بر شیت n_0 ، در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ (الف) جهت‌گیری فیبرها با نوار رنگ درجه آن‌ها نسبت به سطح مقطع عرضی میوکاردیوم، (ب) جهت‌گیری شیت‌ها و (پ) عمود بر شیت‌ها

پاسخ الکتریکی

فرمول‌بندی پتانسیل غشای میوکاردیوم بر اساس مدل پدیدارشناختی نش و پانفیلوف [22] به صورت زیر تعریف شد:

$$\chi_m \left(C_m \frac{\partial \Phi}{\partial t} + I_{ion} \right) + \nabla \cdot (-D \nabla \Phi) = 0 \quad (1)$$

معادله (۱) دینامیک پتانسیل غشا را کنترل می‌کند و در آن، متغیر Φ نشان‌دهنده پتانسیل غشای میوکاردیوم است. پارامترهای χ_m و C_m به ترتیب ظرفیت‌پذیری غشای میوکاردیوم و نرخ سطح غشا بر حجم کاردیومیوسیت را نشان می‌دهند. I_{ion} ، جریان یونی در مقیاس سلولی را مدل می‌کند و توسط مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل توصیف می‌شود و عملگر ∇ در پیکربندی مادی (X, Y, Z) تعریف شد $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial X}, \frac{\partial}{\partial Y}, \frac{\partial}{\partial Z} \right)^T$. جریان یونی الکتریکی در مقیاس سلولی در این پژوهش وابسته به پتانسیل غشا و بازیابی میوکاردیوم به صورت معادله (۲) تعریف شد:

$$I_{ion} = \hat{I}_e^\Phi(\Phi, r) \quad (2)$$

که در آن $\hat{I}_e^\Phi$ عبارت منع جریان است که مسئول تغییرات میدان الکتریکی با متغیر بازیابی r ، در طول یک سیکل کامل قلبی

در این پژوهش، یک مدل الکترومکانیکی دوبطنی قلب با گنجاندن روابط سینماتیک رشد محدود برای شبیه‌سازی رشد در بیماری افزایش فشارخون سیستمیک توسعه داده شده است. روابط الکتروفیزیولوژی و تنش فعال از نوع پدیدارشناختی می‌باشند و روابط گردش خون بر اساس مدل ویندکسل بوده که معادلات فشارهای بطن چپ و راست تعریف شده و رویکرد محاسبه فشار بطنی از پژوهش نهمه‌شیری و همکاران [18] توسعه داده شده است. روابط سینماتیک رشد محدود برای بیماری مذکور به صورت کانستریک در نظر گرفته شده است و کوپل بین رشد و الکترومکانیک قلب در مدل گنجانده شده است تا رشد میوکاردیوم به صورت واقع‌گرایانه‌تر و در خلال رفتار واقعی قلب شبیه‌سازی شود. مدل رشد در نرم‌افزار کامسول پیاده‌سازی شده است که رویکرد پیاده‌سازی این روابط از پژوهش پیشین نهمه‌شیری و همکاران [15] اتخاذ شده و در این پژوهش با گنجاندن رفتار الکترومکانیکی قلب بسط داده شده است. اعتبارسنجی بخش‌های مختلف مدل نیز با پژوهش‌های پیشین صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها ریزساختار قلب

هندسه دوبطنی با استفاده از ابزارهای داخلی کامسول، با برش دادن دو بیضی متحدالمركز، مطابق با ابعاد هندسه دوبطنی ایدئال معرفی شده توسط بربراولو و همکاران [10] ایجاد شد. برای برقراری فرض رأس همسانگرد، مشابه کار اعظم [19] یک ناحیه استوانه‌ای کوچک به قطر ۱ سانتی‌متر تعریف شد با توجه به این فرض، هدایت الکتریکی و خواص مکانیکی میوکاردیوم در رأس به صورت همسانگرد تعریف شدند. به دلیل عدم اطلاع از ویژگی‌های دقیق فیبر و برای جلوگیری از تکینگی در قسمت رأس فرض مشابهی نیز توسط الحاربی و همکاران [20] به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که برای ساده‌سازی از الیاف پورکنزی، دریچه‌های بطنی و عضلات پاپیلاری در طراحی هندسه صرف نظر شد [21]. برای آنکه خاصیت ناهمسانگرد میوکاردیوم در مدل‌سازی لحاظ شود، لازم بود تا ریزساختار آن تعریف شود و برای این کار، ابتدا فاصله بین لایه‌های داخلی و خارجی میوکاردیوم محاسبه شد و به کمک آن متغیری برای تعیین زاویه فیبرها در داخل دیواره تعریف شد تا زاویه آن‌ها از لایه خارجی به سمت لایه داخلی به صورت خطی تغییر کند [15]. جهت‌گیری فیبرها از -70° درجه در اپیکاردیوم تا $+70^\circ$ درجه در

تنش فعال میوکاردیوم

مدل تنش فعال از پژوهش نش و پانیلوف [22] گرفته شد و برای آنکه سازگاری واحدها در مدل لحاظ شود، معادلات مطابق رویکرد اعظم و همکاران [24] اصلاح شدند:

$$\frac{\partial S_a}{\partial t} = \epsilon(\Phi) \left(K_{Sa} \left[\frac{\Phi - B}{A} \right] - S_a \right) \quad (5)$$

که در آن S_a تنش فعال و K_{Sa} و A و B پارامترهای ثابت هستند و تابع تأخیر $\epsilon(\Phi)$ مطابق معادله (۶) تعریف شد [24]:

$$\epsilon(\Phi) = \epsilon_0 + (\epsilon_\infty - \epsilon_0) \exp \left(- \exp(-\xi(\Phi - \Phi_{\text{threshold}})) \right) \quad (6)$$

که در آن ϵ_0 ، ϵ_∞ ، ξ و $\Phi_{\text{threshold}}$ پارامترهای مدل می باشند. مقادیر پارامترهای مدل تنش فعال در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای مدل تنش فعال به همراه شرایط اولیه [19]

پارامتر	مقدار	واحد
K_{Sa}	۱۲۰	kPa
A	۰/۱	V
B	-۰/۰۸	V
ϵ_0	۴/۵	s^{-1}
ϵ_∞	۳۰	s^{-1}
ξ	۱۰	V^{-1}
$\Phi_{\text{threshold}}$	-۰/۰۳	V
شرایط اولیه		
S_a	۰	kPa

مکانیک قلب و سینماتیک رشد

برای مدل سازی رشد قلب در بیماری افزایش فشارخون سیستمیک از رویکرد سینماتیک رشد محدود استفاده شد [7]. مطابق این رویکرد، گرادیان تغییر شکل F مطابق معادله (۷) به دو بخش الاستیک F^e و رشد F^g به صورت ضربی تجزیه می شود. تجزیه ضربی تانسور گرادیان تغییر شکل در رشد محدود را این گونه می توان تصور کرد که اجزای کوچک سازنده یک محیط پیوسته، ابتدا در همان جای خود رشد می کنند و به یک پیکربندی میانی می رسند و این تغییرات توسط F^g توصیف می شود. سپس این اجزا از پیکربندی میانی توسط تانسور تغییر شکل الاستیک

است. در این پژوهش از مدل وابسته به دو متغیر آلیو و پانیلوف [23] برای توصیف الکتروفیزیولوژی میوکاردیوم در مقیاس سلولی استفاده شد:

$$\begin{aligned} \partial_t \phi &= \hat{i}^\phi(\phi, r) = c\phi(\phi - \alpha)(\phi - 1) + r\phi \\ \partial_t r &= \hat{i}^r(\phi, r) = \gamma + \frac{\mu_1 r}{(\mu_2 + \phi)} [-r - c\phi(\phi - b - 1)] \end{aligned} \quad (3)$$

α ، b و c پارامترهای مدل هستند و $\gamma + \frac{\mu_1 r}{(\mu_2 + \phi)}$ خواص بازیابی پتانسیل غشا را کنترل می کند. ϕ و r ، نیز به ترتیب متغیر بدون بعد پتانسیل غشا و زمان می باشند. روابط لازم برای تبدیل این متغیرهای بدون بعد به حالت دارای بعد، در پژوهش های پیشین اشاره شده است [10, 21]. این پارامترها دارای توصیف فیزیولوژیکی واضحی نیستند و مدل از نوع پدیدارشناختی می باشد. در معادله (۱)، D تانسور هدایت الکتریکی میوکاردیوم است و به صورت معادله (۴) تعریف می شود [21]:

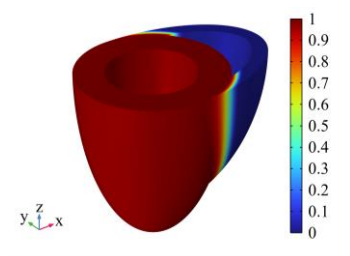
$$D = d_{\text{iso}} I + d_{\text{ani}} f_0 \otimes f_0 \quad (4)$$

که در آن، d_{iso} سرعت هدایت الکتریکی همسانگرد بافت است و d_{ani} سرعت هدایت الکتریکی در جهت فیبرهای میوکاردیوم را توصیف می کند. $\otimes$ ، ضرب دایادیک بوده و I نیز تانسور همانی می باشد. مقادیر پارامترهای مدل الکتروفیزیولوژی مطابق با جدول (۱) اتخاذ شد.

جدول ۱ مقادیر پارامترهای مدل الکتروفیزیولوژی به همراه شرایط اولیه (به جز موارد اشاره شده، سایر مقادیر از کانسیز و همکاران [21] اتخاذ شد)

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
χ_m	۱۶۰۰۰۰	m^{-1}	[24]
C_m	۰/۰۱	$F m^{-2}$	[24]
c	۸	-	-
α	۰/۰۱	-	-
b	۰/۱۵	-	-
γ	۰/۰۰۰۵	-	-
μ_1	۰/۱۲	-	-
μ_2	۰/۳	-	-
d_{iso}	۰/۴	$mm^2 ms^{-1}$	-
d_{ani}	۴	$mm^2 ms^{-1}$	-
شرایط اولیه			
Φ	-۰/۰۸	V	-
r	۰	-	-

تنش کیرشهف برای سرتاسر میوکاردیوم استخراج شد و برای هر نقطه از بافت به صورت تنش هومئوستاتیک تعریف شد. در واقع از ابتدای سیکل چهارم رشد ناشی از فشارخون بیش از حد فشار خون شبیه سازی شد و کوپل بین فیزیک رشد و الکترومکانیک قلب در شبیه سازی گنجانده شد. این رویکرد یکی از نوآوری های این پژوهش است و نسبت به مدل های پیشین رشد که تنش هومئوستاتیک را به صورت یک پارامتر کلی برای بافت در نظر می گرفتند، واقع گرایانه تر می باشد [15,27]. شایان ذکر است که این روش برای برخی مدل های رشد نیز اتخاذ شده است اما این مدل ها یا رفتار الکترومکانیکی قلب را لحاظ نکرده بودند و یا از هندسه تک بطنی در شبیه سازی استفاده نمودند [11,26]. از آنجایی که در این پژوهش بر روی رشد فشارخون افزایش فشارخون سیستمیک تمرکز شده است و این بیماری مرتبط با رشد بطن چپ قلب است، رشد فقط برای بطن چپ در نظر گرفته شد و ضریب رشد در معادلات بطن راست لحاظ نشد [9,11]. به منظور جلوگیری از ایجاد ناپیوستگی احتمالی در معادلات مکانیک قلب، از یک تابع پله مطابق با رویکرد ارائه شده توسط اعظم و همکاران [24] استفاده شد تا مقدار ضریب رشد و تغییرات آن به نرمی در بطن راست غیرفعال شود و رشدی در آن صورت نگیرد. مطابق با روش پژوهش مذکور، ابتدا تغییری بر اساس ابعاد مدل هندسی و معادله بیضی تعریف شد سپس این متغیر به عنوان ورودی در تابع در نظر گرفته شد تا بطن چپ و راست را مطابق شکل ۲) به نرمی از هم جدا کند که در آن عدد ۱ برای بطن چپ و مقدار صفر برای بطن راست می باشد. این تابع پله در معادله (۱۱) استفاده شد تا رشدی برای بطن راست صورت نگیرد و رشد فقط در بطن چپ فعال باشد.



شکل ۲ تفکیک بطن چپ (مقدار ۱) و راست (مقدار صفر) با استفاده از یک تابع پله برای غیرفعال کردن رشد در بطن راست

برای پاسخ منفعل میوکاردیوم در این پژوهش، از مدل

به فرم ثانویه در پیکربندی تغییر شکل یافته می رسند:

$$F = F^e F^g \quad (7)$$

در معادله بالا F^e تانسور تغییر شکل الاستیک بافت است که توسط آن اجزای کوچک رشد یافته در پیکربندی میانی، از جای خود حرکت می کنند و در انتها یک مجموعه منظم و رشد یافته را در پیکربندی تغییر شکل یافته تشکیل می دهند و محاسبات رشد بر مبنای آن به صورت زیر انجام می گیرد:

$$F^e = F F^g^{-1} \quad (8)$$

که در آن F^g بیانگر معکوس تانسور تغییر شکل رشد است. تانسور تغییر شکل رشد در این پژوهش به صورت معادله (۹) به نحوی تعریف شد که رشد از نوع کانستریک بوده و در جهت شیت های میوکاردیوم صورت گیرد [11]:

$$F^g = I + (\vartheta^g - 1) s_0 \otimes s_0 \quad (9)$$

که در آن ϑ^g ضریب رشد بافت بوده و تکامل آن توسط معادله دیفرانسیل مرتبه اول توصیف می شود. در رأس میوکاردیوم رشد به صورت همسانگرد فرض شد [15]:

$$F^g = \vartheta^g I \quad (10)$$

در این پژوهش معادله تکامل رشد به صورت وابسته به تنش در نظر گرفته شد و نسخه ای ساده شده از معادله تکاملی ارائه شده توسط بربراوغلو و همکاران [10] اتخاذ شد تا حجم محاسبات کاهش یابد. این رویکرد مطابق با روش های جدید مدل سازی رشد می باشد که در آن معادله تکاملی رشد ϑ^g وابسته به سرعت رشد τ_v و محرک رشد در نظر گرفته می شود [25,26]:

$$\dot{\vartheta}^g = \frac{1}{\tau_v} \langle \text{tr}(\tau) - p^h \rangle \quad (11)$$

عبارت $\langle \text{tr}(\tau) - p^h \rangle$ ، محرک رشد بوده و بیان می کند که رشد میوکاردیوم زمانی رخ می دهد که اثر تانسور تنش کیرشهف $\text{tr}(\tau)$ ، بزرگ تر از تنش هومئوستاتیک p^h بافت باشد ($\text{tr}(\tau) > p^h$)، در غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد بود و رشد صورت نمی گیرد [15]. مقدار پارامتر سرعت رشد با توجه به پژوهش بربراوغلو و همکاران [10] برابر 0.1 مگاپاسکال بر ثانیه اتخاذ شد. برای واقع گرایانه بودن مقدار تنش هومئوستاتیک بافت، ابتدا روابط رشد از مدل جدا شدند و سه سیکل رفتار الکترومکانیکی قلب شبیه سازی شد و در انتهای سیکل سوم، اثر

می‌باشد که در خلال این روند، مدل مادی تعریف شده باید بر مبنای تانسور تغییر شکل الاستیک یعنی معادله (۸) باشد. معادله (۸) وابسته به تانسور تغییر شکل رشد است که تغییر و تحولات ضریب رشد موجود در تانسور رشد در خلال زمان بر اساس معادله (۱۱) توصیف می‌شود. با توجه به معادلات (۱۲) تا (۱۴) می‌توان دریافت که تمامی متغیرهای اساسی تابع انرژی کرنش، مانند ناورداها و همچنین دترمینان، بر مبنای تانسور الاستیک می‌باشد و کوپل مدل الکترومکانیکی با سینماتیک رشد به وضوح در آنجا خود را نشان داده است. برای آنکه بتوان فرایند رشد را در کامسول شبیه‌سازی نمود، تنش دوم پیولاکیرشیف به صورت معادله (۱۵) تعریف شد [15]:

$$S = J^g F^{g-1} \left(\frac{\partial \Psi_{vol}}{\partial E^e} + \frac{\partial \bar{\Psi}_{iso}}{\partial E^e} \right) F^{g-T} \quad (15)$$

که در آن $E^e = \frac{1}{2} (F^{eT} F^e - I)$ ، تانسور کرنش گرین - لاگرانژ الاستیک و J^g دترمینان تانسور تغییر شکل رشد است.

گردش خون مدل دوبطنی و تحلیل همگرایی مش در مدل

برای شبیه‌سازی جریان خون در بطن‌ها از دو مدل سه عنصری ویندکسل برای نشان دادن مدارهای سیستمیک و ریوی استفاده شد. سیکل‌های چندگانه برای به دست آوردن حالت پایدار اجرا شد و حلقه‌های فشار - حجم در سه سیکل به پایداری رسیدند. جریان‌های ورودی و خروجی برای هر بطن به صورت زیر تعریف شدند که بر مبنای گرادیان فشار در داخل بطن‌ها می‌باشد [31]. برای بطن چپ:

$$\begin{aligned} Q_{in,lv} &= \frac{(P_{LA} - P_{LV})}{R_{mt}}, \text{ if } P_{LA} > P_{LV} \\ Q_{in,lv} &= 0, \text{ if } P_{LA} \leq P_{LV} \\ Q_{out,lv} &= \frac{(P_{LV} - P_{sys})}{R_{ao}}, \text{ if } P_{LV} > P_{sys} \\ Q_{out,lv} &= 0, \text{ if } P_{LV} \leq P_{sys} \end{aligned} \quad (16)$$

و برای بطن راست:

$$\begin{aligned} Q_{in,rv} &= \frac{(P_{RA} - P_{RV})}{R_{tri}}, \text{ if } P_{RA} > P_{RV} \\ Q_{in,rv} &= 0, \text{ if } P_{RA} \leq P_{RV} \end{aligned}$$

هایپرالاستیک همسانگرد عرضی پیشنهاد شده توسط هولزافیل و اگدن [28] استفاده شد. با فرض تقریباً تراکم‌ناپذیری میوکاردیوم، تابع انرژی کرنش به بخش‌های حجم ثابت و حجمی تجزیه شد. بخش حجم ثابت شامل یک عبارت همسانگرد مبتنی بر $\bar{I}_1^e$ و یک عبارت ناهمسانگرد در جهت فیبر $\bar{I}_{4f}^e = f_0 \cdot (\bar{C}^e f_0)$ بود. بخش حجمی، فرض تقریباً تراکم‌ناپذیری میوکاردیوم را از طریق مدول حجمی k ، اعمال می‌کند و مطابق پژوهش الحاربی و همکاران [20] برابر ۲۵۰ کیلوپاسکال اتخاذ شد. در مدل مکانیک منفعل برای نشان دادن رفتار سفتی بافت قلب در جهت فیبرهای عضلانی از یک تابع نمایی در عبارت ناهمسانگرد استفاده شده است. با این حال، وقتی بافت تحت تنش فشاری است سهم فیبرها در تغییر شکل میوکاردیوم ناچیز است و به همین دلیل عبارت ناهمسانگرد فقط زمانی که $\bar{I}_{4f}^e > 1$ باشد در تابع انرژی کرنش لحاظ می‌شود [29]. تابع انرژی کرنش رأس به دلیل فرض رأس همسانگرد، صرفاً توسط تابع انرژی کرنش همسانگرد رابطه (۱۲) مدل شد [29]:

$$\psi_{e, isotropic} = \frac{a_i}{2b_i} \exp(b_i(\bar{I}_1^e - 3)) \quad (12)$$

$$\psi_{e, fiber} = \frac{a_f}{2b_f} \left(\exp(b_f(\bar{I}_{4f}^e - 1)^2) - 1 \right) \quad (13)$$

$$\psi_{e, vol} = \frac{k(J^e - 1) \ln(J^e)}{2} \quad (14)$$

$\bar{I}_1^e$ در معادله (۱۲) نشان دهنده اولین ناوردای تانسور کوشی - گرین راست حجم ثابت الاستیک $\bar{C}^e = J^{e-2/3} (F^{eT} F^e)$ است و J^e دترمینان تانسور تغییر شکل الاستیک است. a_i, b_i, a_f, b_f پارامترهای مدل می‌باشند و مقادیر آن‌ها بر اساس پژوهش هولزافیل و اگدن [28] به ترتیب برابر با ۲/۲۸۰ کیلوپاسکال، ۹/۷۲۶، ۱/۶۸۵ کیلوپاسکال و ۱۵/۷۷۹ اتخاذ شد. جزئیات بیشتر نحوه تعریف روابط رشد در کامسول، در پژوهش نهم‌شیری و همکاران [15] موجود می‌باشد. به منظور کوپل کردن رفتارهای الکتریکی و مکانیکی، تنش فعال محاسبه شده در معادله (۵) به تنش دوم پیولاکیرشیف در امتداد جهت فیبر، شیت و عمود بر شیت به نحوی اضافه شد که مقدار آن در جهت شیت و عمود بر شیت، ۴۰٪ مقدار آن در امتداد جهت فیبر باشد [30]. در ادامه برای یکپارچه‌سازی و کوپل مدل الکترومکانیکی توضیحاتی لازم است. به طور خلاصه، انجام تجزیه ضریبی گرادیان تغییر شکل به بخش‌های الاستیک و رشد برای شبیه‌سازی فرایند رشد لازم

اینکه بتواند فشار و تنش بالای به وجود آمده را تحمل کند، رشد پیدا می‌کند و ساختار دیواره‌ها و بافت میوکاردیوم تغییر می‌یابد تا فشار را کاهش دهد [35]. بعد از آن که فشار کاهش پیدا کرد قلب به مرور زمان و با انجام درمان مناسب، به حالت نرمال خود نزدیک می‌شود. با گذشت زمان اگر بیماری درمان نشود، بیماری وارد فاز سوم خود شده و رشد غیرقابل برگشت میوکاردیوم موجب اختلال در عملکرد پمپی قلب شده و در نهایت منجر به سکته یا ایست قلبی و یا نارسایی قلبی در فرد می‌شود [36]. شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش در فاز دوم و سوم بیماری افزایش فشارخون سیستمیک رخ می‌دهد و در نتیجه تغییرات ساختاری ناشی از فشارخون بالا در میوکاردیوم شبیه‌سازی می‌شوند و اثر آن بر روی عملکرد پمپی قلب مطالعه می‌شود. مطابق پژوهش‌های دل بیانکو و همکاران [11] و جنت و همکاران [25] فرض شده است که قلب فرد تا زمانی که مدل نرمال به پایداری می‌رسد در حالت سالم بوده و بعد از آن، شخص وارد فاز دوم بیماری افزایش فشارخون سیستمیک شده و قلب برای اینکه بتواند تنش‌های بالای وارده و فشارخون بالا را تحمل کند رشد پیدا می‌کند. در این پژوهش، در سیکل سوم مدل به پایداری رسید و از سیکل چهارم رشد بافت شروع شد و تا سیکل هفدهم ادامه پیدا کرد. برای حل مدل، جابه‌جایی‌ها در سطح بالایی قلب ثابت فرض شدند تا از حرکت سطح قلب در همه جهات جلوگیری شود [10,15]. سطح بیرونی قلب بدون شارالکتریکی فرض شد و زمان هر سیکل قلبی ۱ ثانیه در نظر گرفته شد و حلگر نرم‌افزار کامسول مطابق پژوهش‌های پیشین تنظیم شد که در آن گام زمانی استخراج نتایج بر روی ۲ میلی‌ثانیه تنظیم شد تا نمودارها دارای کیفیت مناسبی باشند و گام زمانی بیشینه حلگر بر روی ۱۰ میلی‌ثانیه قرار داده شد تا کامسول گام‌های بسیار بزرگ را مورد استفاده قرار ندهد و حل مسئله با مشکل مواجه نشود [18,29]. برای تحریک میوکاردیوم، پالس تحریک به گره دهلیزی - بطنی در سطح بالایی مدل اعمال شد [37]. در این پژوهش از المان‌های چهاروجهی برای مش زدن مدل استفاده شد و برای انجام تحلیل همگرایی مش از سه تعداد مختلف المان با اندازه‌های درشت، ریز و بسیار ریز با تعداد ۱۷۴۶۷، ۲۸۲۶۱ و ۴۴۸۸۱ عدد استفاده شد که در شکل (۳)

$$Q_{out,rv} = \frac{(P_{RV} - P_{Pul})}{R_{pu}}, \text{ if } P_{RV} > P_{Pul}$$

$$Q_{out,rv} = 0, \text{ if } P_{RV} \leq P_{Pul}$$
(۱۷)

که در آن R_{pu} ، R_{tri} ، P_{RA} ، R_{ao} ، R_{mt} ، P_{LA} به ترتیب پارامترهای فشار دهلیز چپ، مقاومت دریچه میترال، مقاومت دریچه آئورتی، فشار دهلیز راست، مقاومت دریچه سه‌لته و دریچه ریوی هستند. P_{RV} و P_{LV} فشار بطن چپ و راست هستند و متغیرهای P_{Pul} و P_{Sys} نیز به ترتیب فشار سیستمیک و ریوی قلب می‌باشند که توسط مدل سه المان ویندکسل محاسبه شدند [32].

فشار بطنی در این پژوهش به نحوی تعیین شد که حجم محفظه‌ها برابر با حجم جریان‌های خون ورودی و خروجی از مدل‌های ویندکسل باشد. فشار بطن‌ها مطابق رابطه (۱۸) محاسبه شد [18]:

$$P_{BiV} = \omega(\Omega_{cur} - \Omega_{div})$$
(۱۸)

که در آن Ω_{div} حجم بطن را از قضیه دیورژانس محاسبه می‌کند و Ω_{cur} حجم خونی است که با توجه به جریان‌های روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شود. مقدار پارامتر ω بزرگ و برابر ۱۰۰۰ میلی‌متر جیوه بر میلی‌لیتر در نظر گرفته شد تا فشار بطنی را بر اساس حجم‌های محاسبه شده کنترل کند [19]. برخلاف پژوهش پیشین که از یک نوع رابطه (۱۸) برای محاسبه فشار بطن چپ استفاده کرده بود، در این پژوهش دو نوع از رابطه (۱۸)، یک نوع برای بطن چپ و نوع دیگر برای بطن راست استفاده شد تا فشار بطن چپ و راست را بتوان متناسب با جریان‌های ورودی و خروجی محاسبه نمود. پارامترها و شرایط اولیه مدل فشارخون مطابق با جدول (۳) تنظیم شدند.

لازم است این نکته مورد توجه قرار بگیرد که در این پژوهش بر روی رشد ناشی از افزایش فشارخون سیستمیک تمرکز شده است. در واقع، بیماری فشارخون شامل سه فاز می‌باشد؛ در فاز اول تغییرات عملکردی ناشی از این بیماری به وجود می‌آیند و مقاومت عروق افزایش پیدا کرده و قلب باید توان بیشتری را به کار گیرد تا بتواند خون را به داخل بدن پمپ کند و به همین دلیل فشار بطنی را افزایش می‌دهد [5]. در فاز دوم بیماری، قلب برای

نمایش داده شده‌اند.

برای مقایسه تفاوت مش‌ها و اطمینان از مستقل بودن نتایج از مش انتخاب شده، مقادیر فشار و حجم بطن چپ و راست و همچنین میانگین تنش مایزس در سرتاسر میوکاردیوم در زمان بیشینه فشار سیکل سوم بطن چپ (۲۱۰۰ میلی‌ثانیه) با یکدیگر مقایسه شد که در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که تفاوت بین مش‌های ریز و بسیار ریز برای تمامی کمیت‌ها کمتر از ۵ درصد است و مش ریز برای شبیه‌سازی مدل مناسب می‌باشد. شایان ذکر است که تفاوت بین مش‌های درشت و ریز در کمیت‌های بطن راست بیشتر از ۵ درصد بوده و نشان می‌دهد که انتخاب مش در نتایج بطن راست تأثیر به‌سزایی دارد.

جدول ۳ مقادیر پارامترهای مدل گردش خون به همراه شرایط اولیه

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
P_{LA}	۱۲	mmHg	[19]
R_{mt}	۰/۰۰۵۴	mmHg s ml ⁻¹	[24]
R_{ao}	۰/۰۴۲	mmHg s ml ⁻¹	[24]
P_{RA}	۳	mmHg	[33]
R_{tri}	۰/۰۰۴۲	mmHg s ml ⁻¹	[24]
R_{pu}	۰/۰۲۵	mmHg s ml ⁻¹	[24]
شرایط اولیه			
P_{LV}	۰	mmHg	-
P_{RV}	۰	mmHg	-
P_{Sys}	۸۰	mmHg	[19]
P_{Pul}	۱۵	mmHg	[34]

شکل ۳ مش‌های درشت (الف) ریز (ب) و بسیار ریز (پ)
که برای انجام تحلیل همگرایی مش استفاده شدند

با توجه به نتایج می‌توان دریافت که تفاوت بین مش‌های ریز و بسیار ریز برای تمامی کمیت‌ها کمتر از ۵ درصد است و مش ریز برای شبیه‌سازی مدل مناسب می‌باشد. شایان ذکر است که تفاوت بین مش‌های درشت و ریز در کمیت‌های بطن راست بیشتر از ۵ درصد بوده و نشان می‌دهد که انتخاب مش در نتایج بطن راست تأثیر به‌سزایی دارد.

جدول ۴ تحلیل همگرایی مش در مدل بر اساس کمیت‌های فشار بر حسب میلی‌متر جیوه، حجم بر حسب میلی‌لیتر و تنش بر حسب کیلوپاسکال

کمیت		مقدار کمیت در انواع اندازه مش				اختلاف (%)	
کمیت		درشت		بسیار ریز		درشت - ریز	
		درشت	ریز	بسیار ریز	ریز	درشت - ریز	ریز - بسیار ریز
فشار بطن چپ		۱۱۷/۷۲	۱۲۰	۱۲۰/۱۲	۱/۹۳۶	۰/۱	
فشار بطن راست		۱۸/۹۶۵	۱۸/۰۲۹	۱۸/۰۰۸	۵/۱۹۱	۰/۱۱۶	
حجم بطن چپ		۴۳/۰۰۱	۴۴/۰۸۲	۴۴/۱۵۸	۲/۵۱۳	۰/۱۷۲	
حجم بطن راست		۸/۰۵۳	۸/۹۵۶	۸/۹۶۷	۱۱/۲۱۳	۰/۱۲۲	
میانگین تنش مایزس		۳۶/۱۳۷	۳۵/۲۶۴	۳۵/۴۹۲	۲/۴۷۵	۰/۶۴۶	

زیرا فشار بطن راست نیز وابسته به جریان‌های ورودی و خروجی از دریچه‌های آن است [5] برای اعتبارسنجی بهتر مدل الکترومکانیکی، برخی کمیت‌های گردش خون با داده‌های بالینی مقایسه شد که نتایج مربوطه در جدول (۵) قرار داده شده است. نتایج به دست آمده تطابق خوبی با نتایج گزارش شده از داده‌های قلب انسان داشتند.

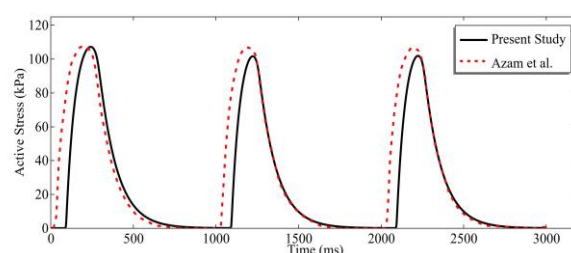
جدول ۵ مقایسه نتایج کمیت‌های گردش خون نرمال با داده‌های بالینی

کمیت	مقدار در این پژوهش	محدوده نرمال بالینی
کسر تخلیه بطن چپ (درصد)	۵۱/۴۶	میانگین ۵۷ با انحراف معیار ۶ درصد [38]
بیشینه فشار بطن چپ (میلی مترجیوه)	۱۲۰	میانگین ۱۱۳ با انحراف معیار ۱۸ میلی مترجیوه [39]
کسر تخلیه بطن راست (درصد)	۵۰/۹۴	۴۷-۷۳٪ [40]
بیشینه فشار بطن راست (میلی مترجیوه)	۲۵/۲۴	میانگین ۲۸ با انحراف معیار ۷ میلی مترجیوه [41]

برای اعتبارسنجی پیاده‌سازی روابط رشد، نوع همسانگرد رشد با به‌کارگیری هندسه این پژوهش با نتایج پژوهش تربتی و همکاران [42] که در نرم‌افزارهای متلب و آباکس با هندسه‌ای متفاوت شبیه‌سازی کرده بودند، مقایسه شد. برای این اعتبارسنجی از مدل نئوهوکی برای مکانیک منفعل استفاده شد و روابط رشد به صورت وابسته به تنش در نظر گرفته شدند و یک فشار بالینی بر اندوکاردیوم اعمال شد [8]. شکل (۵) بیشترین میزان رشد را در میوکاردیوم نشان می‌دهد و با وجود متفاوت بودن ابعاد هندسه‌های دو پژوهش، نتایج مطابقت خوبی را نشان می‌دهند. بیشترین اختلاف در حدود ۴۰۰ میلی‌ثانیه یعنی میانه سیکل اتفاق می‌افتد اما نتایج بعد از همگرایی در انتهای سیکل بر هم منطبق هستند. در واقع تفاوت کامل سه روش حل در نرم‌افزارهای متلب، آباکس و کامسول در نتیجه نهایی تغییر زیادی ایجاد نکرد که نشان از درستی پیاده‌سازی فرایند رشد در این نرم‌افزار دارد. شایان ذکر است که اعتبارسنجی پیاده‌سازی روابط رشد در پژوهش پیشین نمه‌شیری و همکاران [15] با مراجع دیگر نیز انجام شده است که جزئیات بیشتر این اعتبارسنجی در آنجا قید شده است.

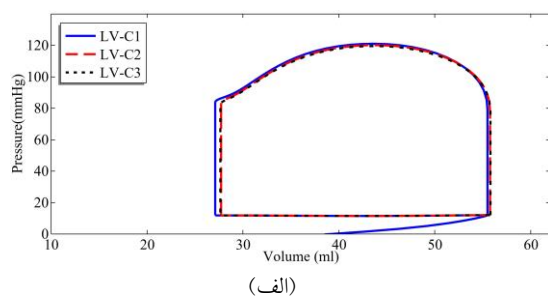
اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل الکترومکانیکی، نتایج تنش فعال میوکاردیوم برای نقطه‌ای در فاصله میانی مدل در سطح بیرونی بطن چپ با نتایج اعظم [19] مقایسه شد و در شکل ۴ نمایش داده شده است. نتایج مدل منطبق بر پژوهش پیشین است و اختلاف اندک بین نتایج می‌تواند به دلیل هندسه و رویکرد متفاوت تعریف ریزساختار قلب باشد. با این حال، در انتهای هر سیکل قلبی تنش فعال در هر دو پژوهش به یک مقدار مشابه منتهی می‌شوند و این رفتار نشان از تطابق کلی مدل با پژوهش پیشین دارد.

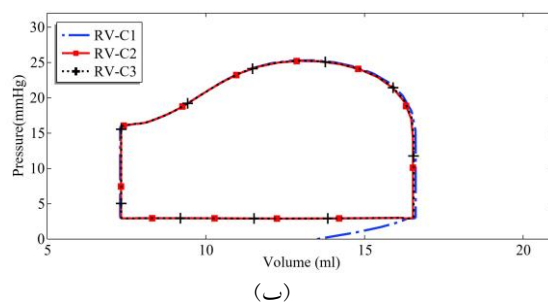


شکل ۴ اعتبارسنجی تنش فعال با نتایج اعظم [19]

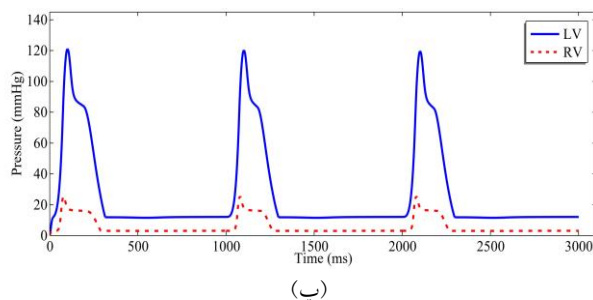
کسر تخلیه، درصد خونی را نشان می‌دهد که قلب در هر ضربه به داخل بدن پمپ می‌کند. مقدار کسر تخلیه بطن چپ در این پژوهش برابر با ۵۱/۴۶٪ بود و در مقایسه با مدل برابراغلو و همکاران [10] که ابعاد هندسه از آن اتخاذ شده بود و کسر تخلیه برابر ۴۶٪ بود، نتیجه بهتری به دست آمده است زیرا بر اساس مشاهدات بالینی مقدار کسر تخلیه بطن چپ در قلب انسان سالم به طور میانگین ۵۷ با انحراف معیار ۶ درصد می‌باشد [38]. در نتیجه، کسر تخلیه بطن چپ در این پژوهش نسبت به پژوهش برابراغلو و همکاران [10] به مقدار مربوطه نزدیک‌تر می‌باشد و مدل بهبود یافته است. شایان ذکر است که این اختلاف در نتایج می‌تواند به دلایل مختلف مانند استفاده از رویکرد متفاوت برای تعیین ریزساختار قلب، مدل مادی متفاوت، نحوه کوپل رفتار الکتریکی و مکانیکی قلب، نحوه شبیه‌سازی فشار بطنی و شرایط مرزی متفاوت باشد. تفاوت بسیار مهم بین دو مدل در نحوه شبیه‌سازی فشار بطنی می‌باشد. در مدل برابراغلو و همکاران [10] فشار هر بطن به طور جداگانه محاسبه نمی‌شد بلکه با استفاده از یک مدل سه عنصری ویندکسل ابتدا فشار بطن چپ محاسبه و یک‌پنجم آن به بطن راست اعمال می‌شد که این نوع شبیه‌سازی، رفتار واقع‌گرایانه و فیزیولوژیک قلب را بیان نمی‌کند.



(الف)



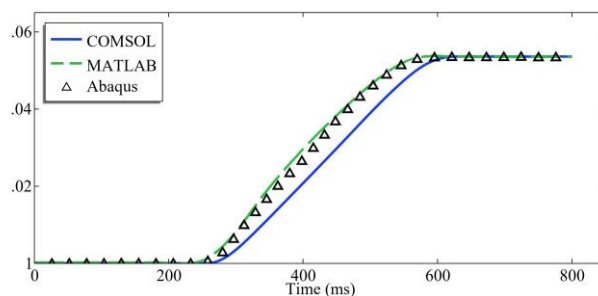
(ب)



(پ)

شکل ۶ (الف) سیکل‌های اول تا سوم حلقه فشار - حجم بطن چپ و (ب) راست، (پ) به همراه فشار هر بطن در سه سیکل ابتدایی مدل الکترومکانیکی

شکل (۷) رشد هایپرتروفی کانستریک را در پاسخ به افزایش فشارخون بطن چپ در نماهای قدامی و خلفی قلب به همراه میزان جابه‌جایی در جهت طولی قلب (جهت z در شکل (۲)) نشان می‌دهد. ضریب رشد با مقدار ۱ یعنی کاردیومیوست قلبی دچار رشد نشده است و ضریب رشد ۱/۵ نشان می‌دهد که ۵۰ درصد به تعداد سارکومرها در جهت عرضی سلول اضافه شده است. در مقیاس ماکروسکوپی، افزایش فشارخون سیستمیک خود را به صورت ضخیم شدن دیواره بطن چپ در جهت عرض دیواره نشان داد تا قلب را قادر سازد در فشار و در نتیجه تنش‌های بالا مقاومت کرده و خون را به داخل بدن ارسال کند و این رفتار در مشاهدات بالینی نیز دیده شده است [45]. با توجه به شکل (۷)، در زمان ۳۰۰۰ میلی‌ثانیه که انتهای سیکل سوم است،



شکل ۵ اعتبارسنجی پیاده‌سازی روابط رشد در پژوهش حاضر با پژوهش پیشین [42]

در شکل (۵) مقدار ضریب رشد در انتهای شبیه‌سازی به یک عدد ثابت میل می‌کند که این نشان از این موضوع دارد که رشد شبیه‌سازی شده از نوع برگشت‌ناپذیر بوده و تحولات ضریب رشد فقط در صورت بیشتر بودن تنش از مقدار بحرانی صورت می‌گیرد و در هنگام کمتر شدن آن از مقدار تنش بحرانی، ضریب رشد بدون رشد خواهد بود و مقدار آن به حالت اولیه برنمی‌گردد زیرا قلب وارد فاز درمان نشده است. در واقع رشد برگشت‌پذیر معمولاً در قلب ورزشکاران دیده می‌شود که در اثر تمرینات زیاد به وجود می‌آید و با حذف تمرینات، مقدار رشد قلب به حالت اولیه خود باز می‌گردد [43,44].

نتایج و بحث

قسمت‌های (الف) و (ب) شکل (۶) به ترتیب نمودارهای حلقه فشار - حجم بطن چپ و راست را نمایش می‌دهند. با توجه به شکل می‌توان دید که در انتهای سیکل سوم، فشار و حجم بطنی در هر دو بطن به پایداری لازم می‌رسد و میزان تغییرات بین سیکل‌ها ناچیز می‌شود. این نکته مورد توجه قرار گیرد که در زمان شروع شبیه‌سازی (زمان ۰ میلی‌ثانیه) فشار بطنی ۰ میلی‌متر جیوه بوده و معادله (۱۸) فشار را با توجه به جریان‌های خون محاسبه کرده و به سطح داخلی بطن‌ها اعمال می‌کند تا حجم آن‌ها از حالت اولیه به حالت انتهای دیاستول تغییر کند. به همین دلیل حلقه فشار - حجم بطن‌ها در سیکل اول اندکی متفاوت از سیکل‌های دوم و سوم بود. بخش (پ) از شکل مذکور نیز تغییرات فشارهای بطنی را در سه سیکل اول نمایش می‌دهد. با توجه به شکل هر دو بطن تقریباً به طور همزمان فازهای قلبی را طی می‌کنند و عملیات پمپی قلب را انجام می‌دهند.

وارد فاز بیماری می‌شود، به دلیل بیشتر بودن مقدار تنش از حد بحرانی رشد پیدا کرده و جابه‌جایی دیواره‌ها افزایش پیدا می‌کند. با افزایش ضریب رشد، دیواره‌ها نیز ضخیم‌تر شده و لایه‌های درونی و بیرونی قلب جابه‌جا می‌شوند، به همین دلیل در هر سیکل ضخامت دیواره‌ها بیشتر شده و جابه‌جایی متناسب با آن به صورت مداوم افزایش پیدا می‌کند.

رشد بافت باعث شد که در انتهای سیکل هفدهم دیواره آزاد بطن چپ جابه‌جایی در جهت طولی قلب به مقدار تقریبی ۰/۲۵ سانتی‌متر به سمت رأس قلب تجربه کند. همچنین، برخی قسمت‌ها مانند قسمت بالایی دیواره بین‌بطنی که به مقدار ۰/۰۵ سانتی‌متر جابه‌جا شده است، به دلیل رشد و همچنین وجود فشار انتهای دیاستول، نسبت به موقعیت اولیه آن‌ها در حالت بدون تنش، به سمت صفحه بالایی مدل جابه‌جا شده‌اند. صفحه بالایی مدل به دلیل شرط مرزی استفاده شده، جابه‌جایی از خود نشان نداد.

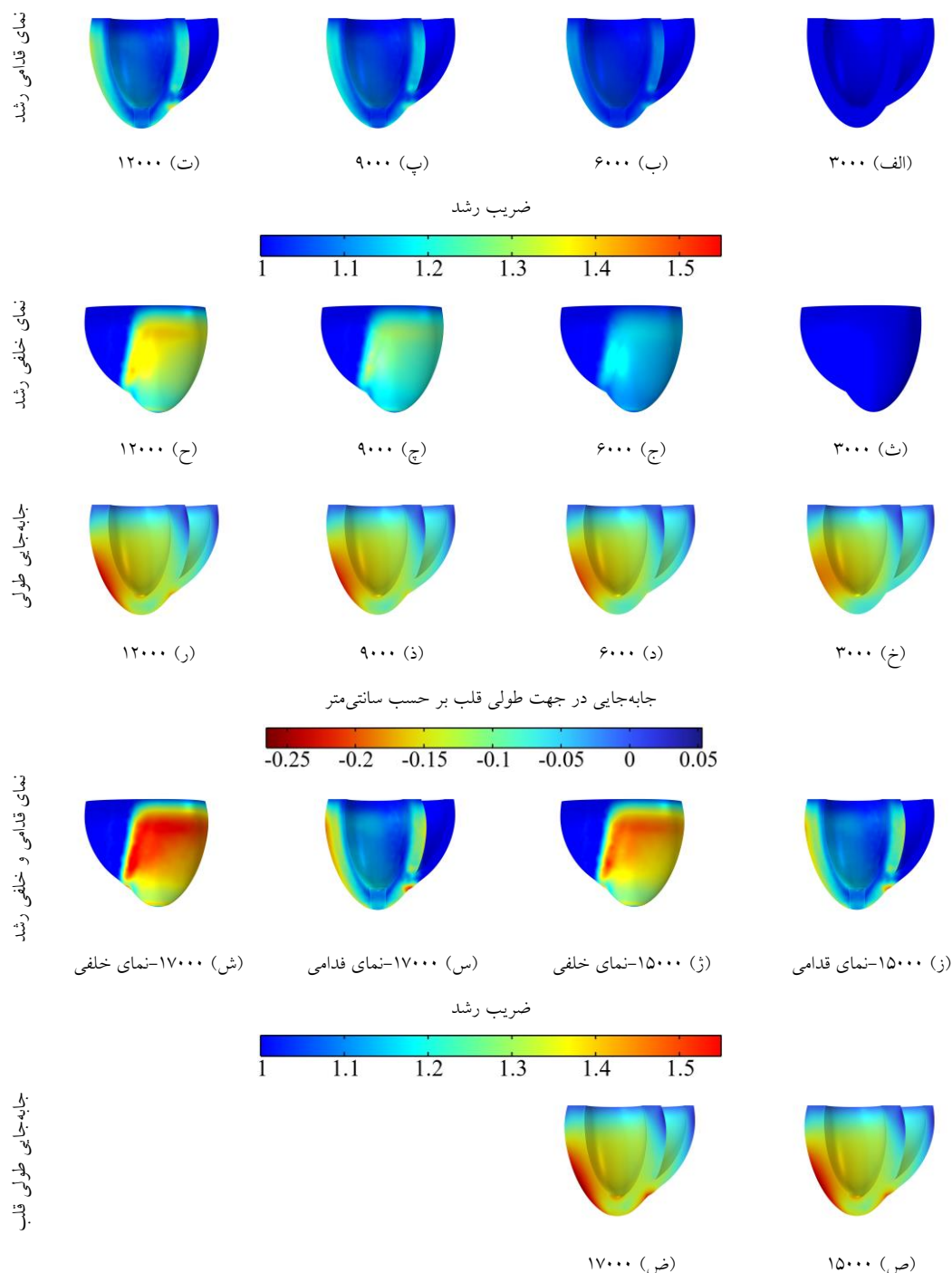
میزان افزایش ضخامت دیواره آزاد بطن چپ و دیواره بین‌بطنی در این پژوهش به ترتیب برابر با ۳۰ و ۲۲ درصد بود که به ترتیب در قسمت‌های (الف) و (ب) شکل (۸) نمایش داده شده‌اند. این افزایش ضخامت نسبت به ضخامت دیواره میوکاردیوم در انتهای سیکل سوم و زمانی که تحت فشار دیاستولیک قرار دارد، محاسبه و نرمالیزه شده است؛ این به معنی آن است که مقدار عدد ۱ در نمودار مربوطه ضخامت دیواره‌ها را در انتهای سیکل سوم حالت نرمال نشان می‌دهد. همچنین، ضخامت دیواره‌ها در فاصله یک‌سوم از سطح بالایی قلب محاسبه شد. از آنجایی که دیواره بین‌بطنی توسط بطن راست مقید شده است، تنش کمتر و در نتیجه رشد کمتری را نسبت به دیواره آزاد بطن چپ تجربه کرده است. افزایش ضخامت ۳۰ درصد دیواره آزاد بطن چپ به منزله رسیدن ضخامت دیواره در انتهای سیکل هفدهم به مقدار تقریبی ۱/۵ سانتی‌متر بود که این مقدار در مشاهدات بالینی برای بیماران دارای افزایش فشارخون سیستمیک دیده شده است [46]. در ابتدای هر سیکل ضخامت دیواره‌ها تحت یک تغییر شکل ناگهانی قرار می‌گیرد که دلیل آن پالس اعمالی بر قلب برای تحریک جریان الکتریکی می‌باشد [19]. این تغییر ناگهانی در دیواره آزاد بطن چپ به دلیل دور بودن از محل تحریک (گره دهلیزی - بطنی) به صورت کاهش ضخامت و

میوکاردیوم رشدی ندارد و قلب در حالت نرمال می‌باشد. در ابتدای سیکل چهارم بافت وارد فاز بیماری شده و مقداری رشد پیدا می‌کند. از آنجایی که تنش تجربه شده در سیکل‌های ابتدایی بیماری بسیار زیاد نبود، در زمان ۹۰۰۰ میلی‌ثانیه لایه درونی و بیرونی قلب به مقدار تقریبی ۱/۱۷ رشد را تجربه کردند. با پیشرفت بیماری، قلب بیشتر تلاش می‌کند تا تنش‌های بیشینه را خنثی کند و همین امر منجر شد که در انتهای سیکل‌های پانزده و هفدهم به ترتیب رشد قابل توجهی به مقدار تقریبی ۱/۴ و ۱/۵ را در نمای خلفی از خود نشان دهد. با مقایسه زمان‌های ۳۰۰۰ و ۱۷۰۰۰ میلی‌ثانیه در شکل (۷) می‌توان دید که ضخامت دیواره‌های بطن چپ به طور چشم‌گیری افزایش پیدا کرده‌اند ولی اندازه قلب تقریباً بدون تغییر مانده است. رفتار مذکور منطبق بر مشاهدات بالینی هایپرتروفی کانستریک ناشی از افزایش فشارخون سیستمیک بوده و مدل توانسته است این پدیده را شبیه‌سازی کند [3].

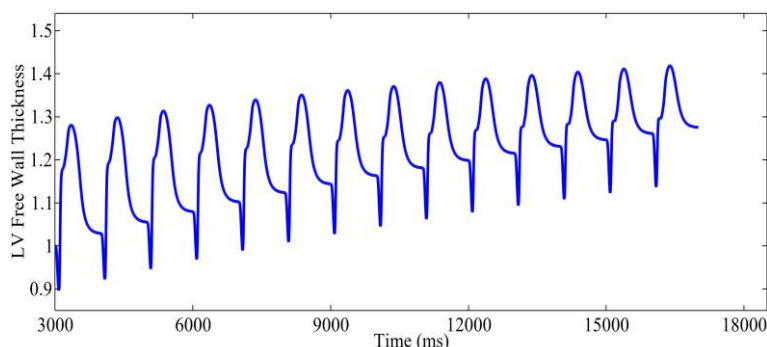
در شکل (۷) مقدار جابه‌جایی در جهت طولی قلب متناسب با زمان‌های رشد، قرار داده شده است. علامت منفی در نوار رنگ جابه‌جایی به منزله آن است که جابه‌جایی طولی قلب به سمت رأس رخ داده است و علامت مثبت نشان‌دهنده جابه‌جایی طولی به سمت سطح بالایی قلب است. در انتهای ۳۰۰۰ میلی‌ثانیه، قلب مقداری جابه‌جایی از خود نشان داده است و باید این نکته مورد توجه قرار گیرد که جابه‌جایی نشان داده شده نسبت به حالت بدون تنش و هندسه اولیه رسم شده است و از آنجایی که در انتهای سیکل سوم، دیواره درونی قلب تحت فشار انتهای دیاستول قرار دارد و فشار اعمالی بر آن صفر نمی‌باشد، این فشار باعث جابه‌جایی قلب در جهت طولی شده است. همچنین، در زمان مذکور اگرچه بافت رشدی پیدا نکرده است اما قسمت بالایی دیواره بین‌بطنی جابه‌جایی مثبت از خود نشان داده است. کانتور ارائه شده، جابه‌جایی را در جهت طولی قلب نشان می‌دهد و از آنجایی که دیواره بین‌بطنی توسط بطن راست مقید شده است، توانایی جابه‌جایی بیشتری را به سمت صفحه بالایی مدل (جهت مثبت) نسبت به سایر جهت‌ها داشته است ولی دیواره آزاد بطن چپ چون مقید نشده است، جابه‌جایی آن آزادتر بوده و به سمت رأس (جهت منفی) حرکت کرده است. زمانی که قلب

تحریک شده و قلب در حال پمپ کردن خون به داخل بدن است و کاهش ضخامت یعنی قلب وارد فاز دیاستول شده و خون، لایه داخلی قلب را تحت فشار قرار داده و ضخامت آن را کاهش داده است.

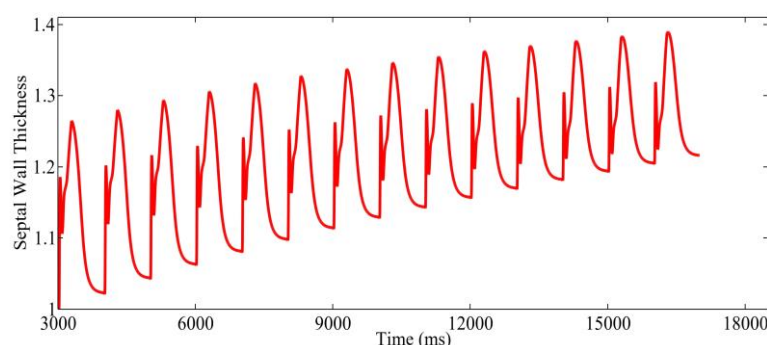
سپس افزایش آن می‌باشد. در دیواره بین‌بطنی به دلیل نزدیک بودن به ناحیه اعمال پالس تحریک، ابتدا به صورت افزایش ضخامت و سپس کاهش و در نهایت دوباره با رسیدن موج تحریک با افزایش ضخامت خود را نشان می‌دهد. افزایش ضخامت دیواره در خلال سیکل قلبی به منزله آن است که دیواره



شکل ۷ رشد میوکاردیوم در سیکل‌های مختلف به همراه جابه‌جایی آن در جهت طولی قلب (نوار رنگ‌ها ضریب رشد و جابه‌جایی را نشان می‌دهند و (الف - ض) نمایانگر زمان‌های مختلف شبیه‌سازی هستند).



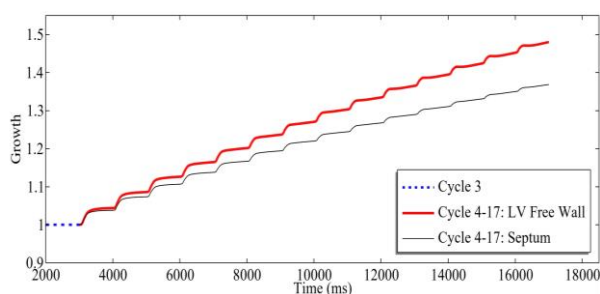
(الف)



(ب)

شکل ۸ میزان افزایش ضخامت دیواره بطن چپ (الف) و بین‌بطنی (ب) برای سیکل‌های چهارم تا هفدهم در خلال رشد

بطن چپ و دیواره بین‌بطنی به ترتیب حدود $1/48$ و $1/36$ بود. از سیکل چهارم به بعد هر دو دیواره شروع به رشد کردند. افزایش ضریب رشد به صورت پلکانی می‌باشد زیرا در هر سیکل، قلب منقبض شده و تنش افزایش می‌یابد و بعد از انقباض، قلب وارد فاز دیاستول شده و مقدار تنش‌ها و در نتیجه رشد بافت کاهش می‌یابد.

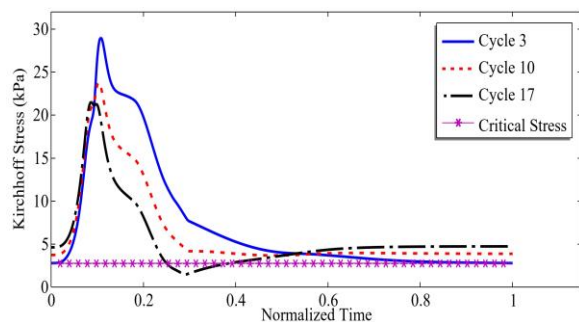


شکل ۹ ضریب رشد در لایه‌های بیرونی دیواره‌های آزاد بطن چپ (قرمز ضخیم) و بین‌بطنی (مشکی نازک) برای سیکل‌های ۳ تا ۱۷

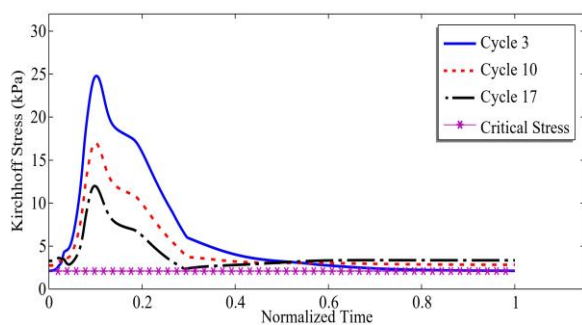
شایان ذکر است که لایه بیرونی بطن چپ نسبت به لایه درونی آن رشد بیشتری را تجربه کرده است که این رفتار به دلیل ناهمسانگرد بودن مدل مادی هایپروالاستیکی است که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع با وجود ایدئال و متقارن بودن هندسه، به دلیل سفتی بیشتر در جهت فیبرهای بطنی، رشد لایه‌های بیرونی و درونی متفاوت بوده است. این رفتار در سایر پژوهش‌ها که مدل مادی ناهمسانگرد و هندسه ایدئال را استفاده کردند نیز دیده شده است [11,47].

دو نقطه در فاصله یک‌سوم از سطح بالایی قلب در لایه بیرونی دیواره آزاد بطن چپ و دیواره بین‌بطنی تعریف شدند تا برخی کمیت‌ها مورد بررسی قرار گیرند. تغییرات ضریب رشد در سیکل‌های مختلف برای نقاط مذکور در شکل (۹) نمایش داده شده است. در سیکل سوم (بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌ثانیه) ضریب رشد برابر ۱ و در انتهای سیکل هفدهم برای دیواره آزاد

افزایش میزان رشد بافت، مقدار تنش که انتهای هر سیکل در بافت باقی خواهد ماند نیز افزایش پیدا می‌کند. در واقع بافت برای آنکه بتواند در مقابل تنش‌های بحرانی مقاومت کند، رشد یافته و بیشینه تنش را کاهش می‌دهد ولی از طرفی، رشد بافت باعث به وجود آمدن مقداری تنش پسماند می‌شود که این رفتار در پژوهش‌های پیشین نیز دیده شده و به طور گسترده در حوزه مدل‌سازی رشد مورد بررسی قرار گرفته است [7, 47, 49]. با وجود آنکه در مدل حاضر بر روی محاسبه تنش پسماند تمرکز نشده است، اما این رفتار نیز در نتایج دیده شد. در صورتی که قلب درمان نشود، با افزایش میزان رشد تنش پسماند نیز افزایش پیدا می‌کند و این تنش موجب افزایش رشد در فاز دیاستول می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ اثر تنش کیرشهف و تنش بحرانی برای نقاطی در لایه‌های بیرونی دیواره‌های آزاد بطن چپ (الف) و بین‌بطنی (ب) برای سیکل‌های سوم، دهم و هفدهم

در شکل (۱۱) حلقه فشار - حجم بطن چپ در حالت‌های نرمال سیکل سوم و رشد کانستریک ناشی از بیماری افزایش

در شکل (۱۰) اثر تنش کیرشهف برای نقاطی که ضریب رشد از آن‌ها استخراج شد، بر حسب زمان نرمالیزه نمایش داده شده است که در آن زمان شبیه‌سازی بر اساس مدت زمان سیکل قلبی (۱۰۰۰ میلی‌ثانیه) نرمالیزه شده است. زمان ۰ برابر با شروع سیکل و زمان ۱ انتهای سیکل می‌باشد. با توجه به شکل، کمتر بودن تنش در دیواره بین‌بطنی نسبت به دیواره آزاد بطن چپ در تمامی سیکل‌ها قابل مشاهده است که همین امر دلیل رشد کمتر در دیواره مذکور است (شکل‌های ۷ و ۹). با دقت در شکل می‌توان دریافت که تنش بحرانی دو نقطه متفاوت بوده و مقدار آن‌ها برابر با تنش در انتهای سیکل سوم است که برای دیواره آزاد بطن چپ و دیواره بین‌بطنی به ترتیب برابر با ۲/۷۵۷۲ و ۲/۰۹۳۵ کیلوپاسکال بود. از طرفی، تنش در سیکل سوم برای هر دو نقطه به مراتب بیشتر از مقدار تنش در سیکل‌های ده و هفده بود. از آنجایی که محرک رشد بافت مبتنی بر تنش بافت بود، رشد تا زمانی ادامه داشت که تنش‌های بیشتر از تنش بحرانی به کمتر از مقدار بحرانی میل پیدا کردند و به همین دلیل، در سیکل ده مقدار بیشینه تنش بیشتر از سیکل هفده بود و در هر دو مورد کمتر از سیکل سوم بودند زیرا رشد ناشی از بیماری از سیکل چهار شروع شد.

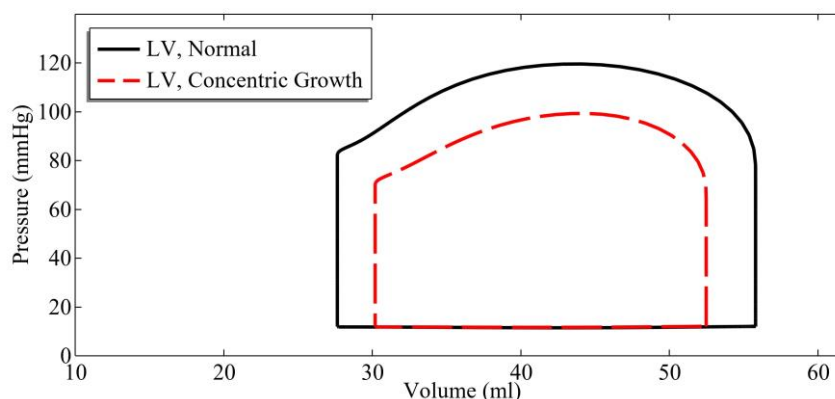
این نکته حائز اهمیت است که مدل‌سازی انجام شده با هدف شبیه‌سازی رشد و توصیف تغییرات ساختاری ناشی از بیشتر شدن تنش از مقدار بحرانی است و برای آنکه سیکل‌های کمتری از شبیه‌سازی انجام شود، مقدار تنش بحرانی برای هر نقطه از قلب برابر با مقدار تنش آن نقاط در انتهای سیکل سوم نرمال نظر گرفته شد. این همان دلیلی است که مقدار تنش در حالت نرمال بیشتر از مقدار بحرانی بود اما رشدی برای حالت نرمال قلب در نظر گرفته نشده بود و دلیل قرار دادن نمودار تنش آن در شکل (۱۰)، مقایسه با مقدار تنش در سیکل‌های ۱۰ و ۱۷ بود تا این مقایسه نشان دهد که در زمان فعال بودن رشد، مقدار بیشینه تنش به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. رویکرد استفاده از مقادیر انتهای سیکل و حالت نرمال قلبی به عنوان حد بحرانی مطابق با پژوهش‌های پیشینی است که مدل‌های بسیار قدرتمندی در زمینه رشد ارائه دادند [25,48].

با دقت در زمان ۱ شکل (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که با

فشار ناشی از بیماری افزایش بیش از حد فشار سیستمیک (فاز اول بیماری) در مدل گنجانده نشد و به همین دلیل مقدار تنش بحرانی نیز از انتهای سیکل سوم استخراج شد و فشار بطنی در سیکل‌های رشد ادامه همان فشار از سیکل سوم بود که با افزایش میزان رشد قلبی کاهش پیدا کرد.

با توجه به شکل (۱۱) و جدول (۶) می‌توان دریافت که حجم انتهای دیاستول قلب (حجم مرتبط با خط عمودی سمت راست نمودار) در سیکل هفدهم نسبت به حالت نرمال کاهش یافته است. از طرفی، چون جریان‌های خون کاهش یافته‌اند، کسر تخلیه در بیماری با کاهش مواجه شده است. بر اساس مشاهدات بالینی، در بیماری افزایش فشارخون سیستمیک حجم انتهای دیاستول قلب، جریان‌های خون و در نتیجه کسر تخلیه کاهش پیدا می‌کند و نتایج به دست آمده توانستند این رفتارها را شبیه‌سازی کنند [50, 51].

فشارخون سیستمیک در سیکل هفدهم نمایش داده شده است. در مقایسه با حالت نرمال، فشار بطنی در حالت رشد به طور چشم‌گیری کاهش یافته است. همان طور که قبلاً اشاره شد، شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش مرتبط با فاز دوم و سوم بیماری فشارخون بالا و تغییرات ساختاری آن است. فرایند کاهش فشار بطنی در مدل حاضر را می‌توان از دو دیدگاه فیزیولوژیکی و ریاضی توجیه کرد. از نظر فیزیولوژیکی قلب برای آنکه بتواند فشار و تنش بالا را تحمل کند رشد پیدا می‌کند و فشار به دلیل افزایش ضخامت دیواره و سفتی بافت کاهش می‌یابد. طبق قانون لاپلاس، تنش دیواره با ضخیم شدن آن کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه منجر به کاهش فشار بطنی می‌شود. از نظر ریاضی، طبق معادله (۱۸) فشار بطنی وابسته به تغییر حجم بطن‌ها می‌باشد و از آنجایی که دیواره بطن رشد پیدا کرده و ضخیم‌تر شده است، تغییر حجم قلب در خلال سیکل کمتر شده و فشار کاهش یافته است. شایان ذکر است که برای ساده‌سازی، افزایش



شکل ۱۱ حلقه فشار - حجم بطن چپ در حالت نرمال سیکل سوم (مشکی پیوسته) و رشد ناشی از افزایش فشارخون سیستمیک در سیکل هفدهم (قرمز خط‌چین)

جدول ۶ مقایسه کمیت‌های گردش خون بطن چپ در حالت‌های نرمال با نتایج افزایش فشارخون سیستمیک

سیکل	کسر تخلیه (درصد)	بیشینه فشار (میلی‌متر جیوه)	حجم انتهای دیاستول (میلی‌لیتر)
سوم (نرمال)	۵۱/۴۶	۱۲۰	۵۵/۷۸
هفدهم (افزایش فشارخون سیستمیک)	۴۲/۴۷	۹۹/۲	۵۲/۴۶

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل الکترومکانیکی قلب با روابط سینماتیک رشد محدود کوپل شد و برای شبیه‌سازی تغییرات ساختاری ناشی از بیماری افزایش فشارخون سیستمیک مورد استفاده قرار گرفت. در مدل از یک هندسه دوبطنی ایدئال و مدل‌های پدیدارشناختی برای پاسخ الکتریکی و تنش فعال قلب استفاده شد و گردش خون هر بطن با استفاده از مدل‌های ویندکسل شبیه‌سازی شد که رویکرد اتخاذ شده برای مدل‌سازی فشار بطنی از تحقیقات پیشین توسعه داده شده بود. کوپل فیزیکی الکترومکانیک و رشد این برتری را فراهم کرد تا رشد در خلال سیکل قلبی و با در نظر گرفتن رفتار الکترومکانیکی و گردش خون قلب صورت گیرد و این رویکرد واقع‌گرایانه‌تر از تحقیقاتی بود که برای شبیه‌سازی رشد فقط مکانیک منفعل بافت را لحاظ نمودند و از الکتروفیزیولوژی و تنش فعال صرف نظر کرده بودند. نتایج مدل نشان داد که ضخامت دیواره آزاد بطن چپ و دیواره بین‌بطنی به طور چشم‌گیری در اثر رشد ناشی از بیماری افزایش فشارخون سیستمیک بیشتر می‌شود. همچنین، کسر تخلیه و حجم انتهای دیاستول قلب در اثر بیماری کاهش پیدا کرد. از طرفی، نتایج نشان دادند که قلب برای مقابله با تنش‌ها و فشارهای بیشینه، رشد پیدا می‌کند و خود را با شرایط بحرانی تطبیق می‌دهد. مدل ارائه شده به طور کامل در نرم‌افزار المان محدود تجاری کامسول پیاده‌سازی شد و در مقایسه با سایر مدل‌ها که روش‌های عددی متفاوتی را برای مدل‌سازی استفاده کردند، در آینده برای جامعه آماری بزرگ‌تری از محققان قابل استفاده است و پژوهشگران می‌توانند با گنجاندن الیاف پورکینزی، دریچه‌های قلبی و گردش

خون سایر محفظه‌های قلبی مدل موجود را بسط دهند.

واژه‌نامه

Concentric Hypertrophy	هایپرتروفی کانستریک
Perfusion	خونیاری
Microstructure	ریزساختار
Isochoric	حجم ثابت
Volumetric	حجمی
Identity Tensor	تانسور همانی
Material Configuration	پیکربندی مادی
Recovery	بازیابی
Intermediate Configuration	پیکربندی میانی
Evolution Equation	معادله تکاملی
Ejection Fraction	کسر تخلیه

تقدیر و تشکر

تشکر فراوان و سپاس بی‌دریغ خدمت جناب آقای دکتر Socrates Dokos از University of New South Wales که با تمام صبر و شکیبایی، نویسندگان را صمیمانه در انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدل الکترومکانیکی و رشد یاری دادند و الهام‌بخش مهربانی بودند. همچنین، از جناب آقای دکتر Larry Taber از Washington University in St. Louis برای کمک‌هایشان در شکل دادن به این پژوهش و تمامی بحث‌هایی که در ارتباط با نتایج داشتیم، نهایت تشکر و سپاس را داریم.

مراجع

- [1] M. Haghighi Yazdi and J. Eskandari Jam, "Numerical Modeling of Linear Viscoelasticity in a Finite Element Method Software Package to be Used in Multiphysics Modeling," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 25, no. 2, Oct., pp. 121-131, 2014. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/fum-mech.v25i2.24850>.
- [2] L. Lee, G. S. Kassab and J. M. Guccione, "Mathematical modeling of cardiac growth and remodeling," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*, vol. 8, no. 3, pp. 211-226, 2016. <https://doi.org/10.1002/wsbm.1330>.
- [3] V. Kumar, A. K. Abbas, N. Fausto and J. C. Aster, *Robbins and Cotran Pathologic Basis of Disease*, 10th ed. Elsevier, 2020. [E-book] Available: shop.elsevier.com/books.
- [4] I. Shimizu and T. Minamino, "Physiological and pathological cardiac hypertrophy," *Journal of Molecular and Cellular*

- Cardiology*, vol. 97, pp. 245-262, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.yjmcc.2016.06.001>.
- [5] R. Klabunde, *Cardiovascular Physiology Concepts*. Wolters Kluwer, 2021. [E-book] Available: books.google.com.
- [6] W. Grossman, D. Jones and L. McLaurin, "Wall stress and patterns of hypertrophy in the human left ventricle," *Journal of Clinical Investigation*, vol. 56, no. 1, pp. 56-64, 1975. <https://doi.org/10.1172/JCI108079>.
- [7] E. K. Rodriguez, A. Hoger and A. D. McCulloch, "Stress-dependent finite growth in soft elastic tissues," *Journal of Biomechanics*, vol. 27, no. 4, pp. 455-467, 1994. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0021-9290(94)90021-3).
- [8] S. Göktepe, O. J. Abilez and E. Kuhl, "A generic approach towards finite growth with examples of athlete's heart, cardiac dilation, and cardiac wall thickening," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 58, no. 10, pp. 1661-1680, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2010.07.003>.
- [9] M. Rausch, A. Dam, S. Göktepe, O. Abilez and E. Kuhl, "Computational modeling of growth: systemic and pulmonary hypertension in the heart," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 10, no. 6, pp. 799-811, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10237-010-0275-x>.
- [10] E. Berberoğlu, H. O. Solmaz and S. Göktepe, "Computational modeling of coupled cardiac electromechanics incorporating cardiac dysfunctions," *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 48, pp. 60-73, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2014.02.021>.
- [11] F. Del Bianco, P. C. Franzone, S. Scacchi and L. Fassina, "Electromechanical effects of concentric hypertrophy on the left ventricle: A simulation study," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 99, pp. 236-256, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2018.06.004>.
- [12] L. Lamm, H. Holthausen, T. Brepols, S. Jockenhövel and S. Reese, "A macroscopic approach for stress-driven anisotropic growth in bioengineered soft tissues," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 21, no. 2, pp. 627-645, 2022.
- [13] B. Milićević, M. Milošević, V. Simić, A. Preveden, et al., "Machine learning and physical based modeling for cardiac hypertrophy," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. 16724, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10237-021-01554-1>.
- [14] P. Nardinocchi and L. Teresi, "Morphing of soft tubes by anisotropic growth," *Acta Mechanica*, vol. 234, no. 1, pp. 37-50, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00707-021-03065-7>.
- [15] P. Namashiri, A. Allahverdizadeh and B. Dadashzadeh, "Modeling and Simulation of Growth in Diastolic Heart Failure," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, Oct., pp. 101-114, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81490.1173>.
- [16] S. Davoodi, M. Esmaeili and H. Shokrollahi, "Numerical Study on the Thermal Stress caused by Laser Radiation on Healthy and Cancerous Skin Tissue," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 59-76, 2021. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.56871.0>.
- [17] B. Haghighi, H. Sadeghpour and M. shafiey, "Investigating the Effect of Different Positions of the Slot on Performance of Single-Slot and Double-Slot Coaxial Antenna in the Treatment of Cancer in Liver Tissue by Hyperthermia Method," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, Oct., pp. 17-32, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.76281.1114>.
- [18] P. Namashiri, A. Allahverdizadeh and B. Dadashzadeh, "Electromechanical Modeling of Aortic Valve Stenosis with

- Hyperelastic and Viscoelastic Properties of the Myocardium,” *Journal of Mechanical Engineering of University of Tabriz*, vol. 53, no. 2, pp. 155-164, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/jmeut.2023.56507.3274>.
- [19] A. Ahmad Bakir, “A multiphysics fluid-electromechanical finite element model of cardiac ventricles for simulation of pathologies and treatments,” PhD Thesis, University of New South Wales, Sydney, 2018. <https://doi.org/10.26190/unsworks/3563>.
- [20] Y. Alharbi, A. Al Abed, A. A. Bakir, N. H. Lovell, et al., “Fluid structure computational model of simulating mitral valve motion in a contracting left ventricle,” *Computers in Biology and Medicine*, vol. 148, p. 105834, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2022.105834>.
- [21] B. Cansız, L. A. Woodworth and M. Kaliske, “A simple phenomenological approach for myocardial contraction: formulation, parameter sensitivity study and applications in organ level simulations,” *Mechanics of Soft Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 1-28, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42558-021-00033-y>
- [22] M. P. Nash and A. V. Panfilov, “Electromechanical model of excitable tissue to study reentrant cardiac arrhythmias,” *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 85, no. 2-3, pp. 501-522, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2004.01.016>.
- [23] R. R. Aliev and A. V. Panfilov, “A simple two-variable model of cardiac excitation,” *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 7, no. 3, pp. 293-301, 1996. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(95\)00089-5](https://doi.org/10.1016/0960-0779(95)00089-5).
- [24] A. Ahmad Bakir, A. Al Abed, M. C. Stevens, N. H. Lovell and S. Dokos, “A multiphysics biventricular cardiac model: Simulations with a left-ventricular assist device,” *Frontiers in Physiology*, vol. 9, pp. 1259, 2018. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01259>.
- [25] M. Genet, L. C. Lee, B. Baillargeon, J. M. Guccione and E. Kuhl, “Modeling pathologies of diastolic and systolic heart failure,” *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 112-127, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10439-015-1351-2>.
- [26] M. Peirlinck, F. S. Costabal, J. Yao, J. Guccione, et al., “Precision medicine in human heart modeling: Perspectives, challenges, and opportunities,” *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 20, pp. 803-831, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10237-021-01421-z>.
- [27] E. Berberoğlu and S. Göktepe, “Computational modeling of myocardial infarction,” *Procedia IUTAM*, vol. 12, pp. 52-61, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2014.12.007>.
- [28] G. A. Holzapfel and R. W. Ogden, “Constitutive modelling of passive myocardium: a structurally based framework for material characterization,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 367, no. 1902, pp. 3445-3475, 2009. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0091>.
- [29] P. Namashiri, A. Allahverdizadeh and B. Dadashzadeh, “Modeling and Simulation of Myocardial Hyperelastic and Viscoelastic Properties with Incorporation of Active Stress,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 553-565, 2023. (In Persian) <http://dx.doi.org/10.22034/mme.23.9.553>.
- [30] T. P. Usyk, I. J. LeGrice and A. D. McCulloch, “Computational model of three-dimensional cardiac electromechanics,” *Computing and Visualization in Science*, vol. 4, pp. 249-257, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00791-002-0081-9>.

- [31] F. Regazzoni, M. Salvador, P. C. Africa, M. Fedele, L. Dedè and A. Quarteroni, "A cardiac electromechanical model coupled with a lumped-parameter model for closed-loop blood circulation," *Journal of Computational Physics*, vol. 457, p. 111083, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111083>.
- [32] J. Arumugam, J. Mojumder, G. Kassab and L. C. Lee, "Model of anisotropic reverse cardiac growth in mechanical dyssynchrony," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 12670, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48670-8>.
- [33] C. Xi, C. Latnie, X. Zhao, J. L. Tan, et al., "Patient-specific computational analysis of ventricular mechanics in pulmonary arterial hypertension," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 138, no. 11, p. 111001, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4034559>.
- [34] C. Luo, D. Ware, J. Zwischenberger and J. Clark, "Using a human cardiopulmonary model to study and predict normal and diseased ventricular mechanics, septal interaction, and atrio-ventricular blood flow patterns," *Cardiovascular Engineering*, vol. 7, pp. 17-31, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10558-007-9025-9>.
- [35] W. Grossman, "Cardiac hypertrophy: useful adaptation or pathologic process?," *The American Journal of Medicine*, vol. 69, no. 4, pp. 576-584, 1980. [https://doi.org/10.1016/0002-9343\(80\)90471-4](https://doi.org/10.1016/0002-9343(80)90471-4).
- [36] J. Loscalzo, *Harrison's cardiovascular medicine*. McGraw Hill/Medical, 2016. [E-book] Available: abebooks.co.uk.
- [37] B. Cansız, H. Dal and M. Kaliske, "Computational cardiology: a modified Hill model to describe the electro-visco-elasticity of the myocardium," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 315, pp. 434-466, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.10.009>.
- [38] M. Di Donato, P. Dabic, S. Castelvechio, C. Santambrogio, et al., "Left ventricular geometry in normal and post-anterior myocardial infarction patients: sphericity index and 'new' conicity index comparisons," *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, vol. 29, pp. S225-S230, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2006.03.002>.
- [39] H. Tandri, S. K. Daya, K. Nasir, C. Bomma, et al., "Normal reference values for the adult right ventricle by magnetic resonance imaging," *The American Journal of Cardiology*, vol. 98, no. 12, pp. 1660-1664, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2006.07.049>.
- [40] L. E. Hudsmith, S. E. Petersen, J. M. Francis, M. D. Robson and S. Neubauer, "Normal human left and right ventricular and left atrial dimensions using steady state free precession magnetic resonance imaging," *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, vol. 7, no. 5, pp. 775-782, 2005. <https://doi.org/10.1080/10976640500295516>.
- [41] J. W. Lankhaar, N. Westerhof, T. J. Faes, K. M. Marques, et al., "Quantification of right ventricular afterload in patients with and without pulmonary hypertension," *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, vol. 291, no. 4, pp. H1731-H1737, 2006. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00336.2006>.
- [42] S. Torbati, "Computational modeling of heart growth: ventricular hypertrophy," MSc Thesis, University of Tehran, Tehran, 2018. (In Persian)
- [43] B. M. Pluim, A. H. Zwinderman, A. van der Laarse and E. E. van der Wall, "The athlete's heart: a meta-analysis of cardiac structure and function," *Circulation*, vol. 101, no. 3, pp. 336-344, 2000. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.101.3.336>.
- [44] C. Muhl, W. Dassen and H. Kuipers, "Cardiac remodelling: concentric versus eccentric hypertrophy in strength and endurance athletes," *Netherlands Heart Journal*, vol. 16, pp. 129-133, 2008. <https://doi.org/10.1007/BF03086131>.

- [45] L. H. Opie, *Heart physiology: from cell to circulation*, 4th ed. Lippincott Williams & Wilkins, 2004. [E-book] Available: search.worldcat.org.
- [46] B. Maron, W. McKenna, G. Danielson, L. Kappenberger, et al., "American College of Cardiology Foundation Task Force on Clinical Expert Consensus Documents; European Society of Cardiology Committee for Practice Guidelines. American college of cardiology/european society of cardiology clinical expert consensus document on hypertrophic cardiomyopathy," *European Heart Journal*, vol. 24, pp. 1965-1991, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(03\)00941-0](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(03)00941-0).
- [47] S. Torbati and A. Daneshmehr, "Numerical Modeling of Concentric Left Ventricular Hypertrophy of the Human Heart," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 10, Oct., pp. 2491-2498, 2019. (In Persian)
- [48] L. C. Lee, J. Sundnes, M. Genet, J. F. Wenk and S. T. Wall, "An integrated electromechanical-growth heart model for simulating cardiac therapies," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 15, pp. 791-803, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10237-015-0723-8>.
- [49] M. Eskandari and E. Kuhl, "Systems biology and mechanics of growth," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*, vol. 7, no. 6, pp. 401-412, 2015. <https://doi.org/10.1002/wsbm.1312>.
- [50] M. Jessup and S. Brozena, "Heart failure," *The New England Journal of Medicine*, vol. 348, no. 20, pp. 2007-2018, 2003. <https://doi.org/10.3390/jcm13030829>.
- [51] K. Chatterjee and B. Massie, "Systolic and diastolic heart failure: differences and similarities," *Journal of Cardiac Failure*, vol. 13, no. 7, pp. 569-576, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cardfail.2007.04.006>.



Optimization of Engineering Problems with Discrete and Continuous Constraints Using Dynamic Adaptive Meta-Heuristic Algorithms*

Research Article

SayedMostafa Mousavi¹, Alireza Toloei² , MohammadHosein Toloei³

 [10.22067/jacsm.2024.86041.1232](https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.86041.1232)

Abstract

This article examines and implements meta-heuristic algorithms to solve five engineering problems. The problems have been investigated in a constrained manner and optimized using firefly, colonial competition, frog, ant and gray wolf algorithms. For each algorithm, a dynamic adaptive factor is introduced to balance the convergence rate and optimal search. The results show that each algorithm performs better in specific problems: firefly in spring tension, frog in three-bar truss, colonial competition in speed reducer and gear design, and gray wolf in pressure tank. The article concludes that choosing the right algorithm depends on the type of problem and environmental conditions.

Key words: Constrained engineering design optimization problems, continuous and discrete design variables, meta-heuristics, Imperialist Competitive, ants, Frog, grey wolf , firefly.

1. Introduction

Numerous optimization algorithms have been proposed to solve various engineering design optimization problems, which usually involve nonlinear constraints. Optimization algorithms can generally be divided into two categories: stochastic algorithms and deterministic algorithms. Traditional optimization methods, such as the gradient descent method, quasi-Newton methods, and the interior-point Newton method, are usually based on gradients and require different algorithms and conditions depending on the objective functions. However, these methods are often inefficient and inaccurate when dealing with complex, high-dimensional, and nonlinear optimization problems, especially when objective functions and constraints are discontinuous. To overcome these issues, many stochastic optimization algorithms have been proposed, including particle swarm optimization, genetic algorithms, firefly algorithms, ant colony optimization, artificial bee colony optimization,

frog leaping algorithms, imperialist competitive algorithms, and grey wolf optimization algorithms. These stochastic optimization methods are typically meta-heuristics inspired by physical and natural phenomena.

2. Solution Methods

Meta-heuristic algorithms are a set of advanced methods used in optimization and complex problem-solving. These algorithms are inspired by natural and social processes and behaviors, such as food searching in animal societies. The main goal of meta-heuristic algorithms is to find the most optimal solutions within the search space and to avoid getting trapped in local optima. Some of these methods, such as the ant colony optimization algorithm, are particularly suitable for problems with discrete variables. The five solution methods selected in this paper are suitable for problems with continuous variables, discrete variables, or a combination of both.

2.1 Dynamic Adaptive Factor

The dynamic adaptive factor is introduced to balance the convergence rate and the global search ability during the optimization process. This factor adjusts the search speed according to the problem environment, aiming for better optimization by dynamically adapting to environmental conditions. Through this dynamic adjustment, the algorithms are able to enhance the convergence rate and perform a more effective search within the solution space.

3. Introduction to Engineering Optimization Problems

3.1 Introduction to Constrained Engineering Optimization Problems

In this section, five constrained engineering optimization problems—each involving objective functions, design variables, and various constraints—are selected. The performance of the firefly algorithm, the imperialist competitive algorithm, and other proposed algorithms is

*Manuscript received December 24, 2023. Revised July 9, 2024, Accepted September 11, 2024.

¹ PhD student in Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University of Tehran, Tehran.

² Corresponding author, Associate Professor, Shahid Beheshti University of Tehran, Tehran. **Email:** toloei@sbu.ac.ir

³ PhD student in Project and Construction Management, Tehran University of Arts, Tehran.

evaluated in terms of solution quality, stability, and convergence rate.

3.2 Constrained Optimization Problems with Continuous Variables

- **Tension/Compression Spring Design Problem:** The objective of the spring design problem is to minimize its weight while satisfying constraints on minimum deflection, shear stress, frequency, and maximum outer diameter.

- **Three-Bar Symmetrical Truss Design Problem:** The three-bar symmetrical truss structure, made of steel, is subjected to two constant loads $P_1=P_2=PP_1=P_2=PP1$. The goal is to achieve the optimal design by minimizing the volume subject to stress constraints. The design variables are the cross-sectional areas of the three bars, denoted as x_1x_{1x1} , x_2x_{2x2} , and x_3x_{3x3} .

- **Speed Reducer Design Problem:** The objective is to minimize the weight of a speed reducer while considering strength constraints related to the bending stress and surface stress of the gear teeth, as well as shaft stresses and deflections.

- **Pressure Tank Design Problem:** The aim is to minimize the total construction cost, including material, forming, and welding costs. The design variables are the shell thickness (TsT_sTs), head thickness (ThT_hTh), inner radius (RRR), and cylindrical section length (LLL) of the tank. TsT_sTs and ThT_hTh are discrete variables and must be integer multiples of 0.0625.

3.3 Engineering Optimization Problems with Discrete Variables - Gear Set Design Problem:

The goal is to minimize the error between the obtained gear ratio and the required gear ratio (1/6.931), under the constraint that the number of teeth of the four gears must fall within specified permissible ranges.

4. Results

4.1 Sensitivity Test

Generally, the convergence number in a meta-heuristic algorithm indicates the number of iterations required to reach the global optimum. A lower convergence number signifies faster and better convergence to the optimal solution. In this study, sensitivity tests are conducted on the key parameters of the meta-heuristic algorithms to determine the best parameter settings that achieve optimal convergence for all problems. For instance, in the frog-leaping algorithm used for the three-bar truss design problem, parameters such as the maximum number of iterations, initial population of frogs, number of memplexes, and size of memplexes have been evaluated. The final results of the sensitivity analysis for the frog algorithm are shown in Figure 1 alongside other meta-heuristic algorithms.

4.2 Execution Speed Evaluation

According to Table 1, the execution speeds of five meta-heuristic algorithms are evaluated for the three-bar truss

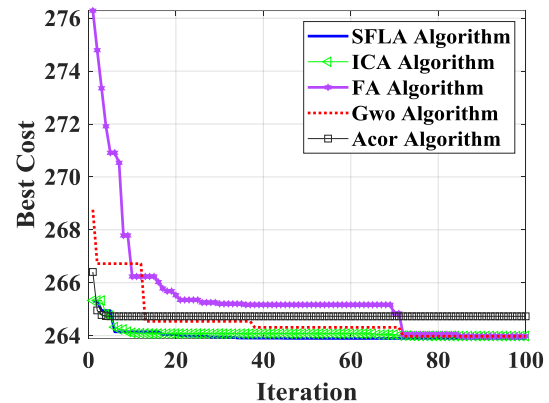


Fig 1. Convergence history of the cost function of the truss design problem

problem, based on a fixed fitness value achieved within 100 iterations.

Table 1- The result of the test of the average execution time of the algorithms

	Algorithm type	Execution time
1	gray wolf	18
2	Colonial competition	24
3	firefly	25
4	frog	40
5	Ant colony	42

5. Conclusion

In this article, five problems in the field of mechanical engineering have been examined along with their limitations and related results. Gray wolf algorithms, ant colony algorithm, firefly algorithm, colonial competition and frog algorithms have been evaluated in solving these problems and the relevant results have been described. One of the innovations of this article is satisfying the constraints of the problems, which is done initially due to the limited search range and creating a random neighborhood in the area that satisfies the constraints. Another point is the use of the dynamic adaptive factor in all these algorithms, so that by changing the search speed and adapting it to the environmental conditions, it leads to better optimization.

The results of these algorithms are compared with the results of other researchers in Tables 1 to 5. As an example, the results of solving the three-bar truss design problem by five meta-heuristic optimization algorithms show that the frog algorithm has a more accurate answer in this problem with an accuracy of 0.136%. In fact, for different problems, according to whether the problem is discrete or continuous, a specific optimization algorithm provides a more accurate answer for each problem. These results show that the above algorithms can improve accuracy and speed in different problems at the same time, and this is a manifestation of Swarm intelligence.



بهینه‌سازی مسائل مهندسی با قیود گسسته و پیوسته به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری تطبیقی پویا*

مقاله پژوهشی

سیدمصطفی موسوی^(۱) علیرضا طلوعی^(۲) محمدحسین طلوعی^(۳)

doi 10.22067/jacsm.2024.86041.1232

چکیده هدف این مقاله، پیاده‌سازی و بررسی روش‌های مختلف الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل پنج مسئله مهندسی است. لذا این مسائل مهندسی، به صورت مقید، بررسی شده سپس با استفاده از پنج الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب، رقابت استعماری، قورباغه، مورچگان و گرگ خاکستری و با هدف کاهش هزینه‌های مسائل مهندسی، بهینه‌سازی شده و نتایج حل آن صحت‌سنجی شده است. در واقع، در هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده، یک عامل تطبیقی پویا برای متعادل کردن نرخ همگرایی و توانایی جستجوی بهینه مطلق با تنظیم سرعت جستجو در طول فرایند جستجو معرفی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هر یک از الگوریتم‌ها، تکنیک‌هایی برای خروج از بهینه محلی استفاده می‌شود که باعث می‌شود پاسخ‌ها به بهینه مطلق همگرا شوند. برای ارزیابی کیفیت و دقت الگوریتم‌ها، از تست حساسیت‌سنجی و مقایسه اعداد همگرایی برای نتایج حاصل از اجرای هر الگوریتم بر روی داده‌ها استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم کرم شب‌تاب در مسئله فنرکششی، الگوریتم قورباغه در مسئله خرابی سه میله‌ای، الگوریتم رقابت استعماری در مسائل کاهنده سرعت و طراحی چرخنده، و الگوریتم گرگ خاکستری در مسئله مخزن تحت فشار، در یافتن بهینه مطلق، عملکرد دقیق‌تری را ارائه کردند. در واقع این الگوریتم‌ها برای حل بهینه مسائل با تولید جمعیت تصادفی، ایجاد همسایگی و انتخاب بهترین همسایه به شرط ارضای قیود متغیرهای مسائل، رسیدن به حل بهینه را آسان می‌کند. در نتیجه، این مقاله نشان می‌دهد که هر الگوریتم فراابتکاری می‌تواند در یک مسئله مهندسی مشخص، بسته به نوع مسئله و شرایط محیطی، عملکرد بهتری داشته باشد.

واژه‌های کلیدی مسائل بهینه‌سازی طراحی مهندسی مقید، متغیرهای طراحی پیوسته و گسسته، فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری، مورچگان، قورباغه، گرگ خاکستری، کرم شب‌تاب.

مقدمه

تا به حال الگوریتم‌های بهینه‌سازی بی‌شماری جهت حل مسائل متنوع بهینه‌سازی طراحی مهندسی پیشنهاد شده‌اند، مسائلی که معمولاً شامل قیود غیرخطی می‌شوند.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی را می‌توان تقریباً به دو دسته تقسیم کرد: الگوریتم تصادفی و الگوریتم معین. روش‌های سنتی بهینه‌سازی معین مانند روش شیب نزولی (Steepest Descend)، روش شبه نیوتنی و روش نیوتن بازگشتی داخلی، که معمولاً مبتنی بر گرادیان هستند و الگوریتم‌ها و شرایط متفاوت توابع

هدف مورد نیاز است.

این روش‌ها برای مسائل بهینه‌سازی پیچیده و غیرخطی با ابعاد بالا، به‌ویژه زمانی که توابع و قیود هدف ناپیوسته هستند، ناکارآمد و نادقیق هستند [1].

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی متعددی مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [2] (Particle Swarm : PSO Optimization)، الگوریتم ژنتیک [3,4]، الگوریتم کرم شب‌تاب [6]، بهینه‌سازی کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization Algorithm) [7]، کلونی زنبورهای مصنوعی [8,24,25]، قورباغه

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱۰/۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۶/۱۲ می باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران.

(۳) دانشجوی دکتری مدیریت پروژه و ساخت دانشگاه هنر تهران، تهران.

از طرفی در سال ۲۰۰۵، الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی توسط کارابوگا (Karaboga)، برای بهینه‌سازی پارامترهای مسئله ارائه شد. این الگوریتم به طرز مشابه با رفتار و سازماندهی کلونی‌های زنبورهای عسل در طبیعت برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است [25,26].

در میان همه این الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی، الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب (Firefly Algorithm) به طور گسترده برای حل مسائل بهینه‌سازی مختلف استفاده می‌شود و برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط این شی یانگ (Xin-She Yang) معرفی و در محاسبات مهندسی کارآمد نشان داده شده است. از ویژگی‌های آن پیاده‌سازی آسان و قابل اعتماد در جستجوی بهینه مطلق است [6,17,18].

در این مقاله از الگوریتم کرم شب‌تاب استفاده شده که یک الگوریتم بهینه‌سازی نشئت گرفته شده از رفتار گروهی کرم‌ها است و برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [19,20].

این الگوریتم بر اساس رفتار اجتماعی و تعامل بین کرم‌ها در محیط طبیعی الهام گرفته شده است. از آنجا که مسائل هوافضایی به دلیل پیچیدگی و ابعاد بالا، نیازمند الگوریتم‌های بهینه‌سازی قوی هستند، الگوریتم کرم شب‌تاب به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در این حوزه استفاده می‌شود. این الگوریتم به‌طور گسترده در مسائل مربوط به علوم هوافضا مورد استفاده قرار گرفته است [21,22].

روش‌های حل

الگوریتم‌های فراابتکاری یک مجموعه از روش‌ها و الگوریتم‌های پیشرفته در حوزه بهینه‌سازی و جستجوی مسائل پیچیده هستند. این الگوریتم‌ها بر اساس الهام از فرایندها و رفتارهای طبیعی و اجتماعی مانند جستجوی غذا در جوامع حیوانی، پدیدار شده‌اند. هدف اصلی الگوریتم‌های فراابتکاری، یافتن بهینه‌ترین راه حل‌ها در فضای جستجو و خروج از نقاط بهینه محلی می‌باشد.

بعضی از این روش‌ها، مثلاً روش کلونی مورچگان مناسب برای مسائل با متغیرهای گسسته هستند. پنج روش حلی که برای این مقاله انتخاب شده‌اند، برای مسائل با متغیرهای پیوسته، گسسته و یا ترکیب آن‌ها مناسب هستند.

[9] (Shuffled Frog Leaping Algorithm)، رقابت استعماری [10] (Imperialist Competitive Algorithm)، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری [5] (Grey Wolf Optimizer) برای غلبه بر این موارد پیشنهاد شده است. این الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی معمولاً فراابتکاری هستند و از پدیده‌های فیزیکی و طبیعی الهام می‌گیرند.

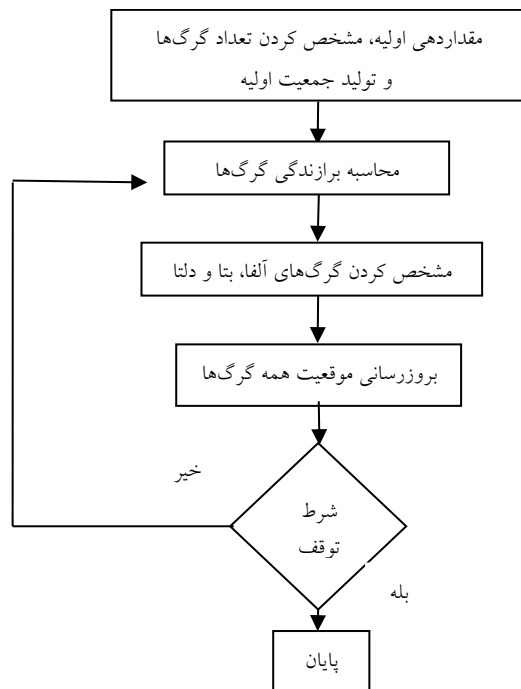
مطابق مقالات دوریگو (Marco Dorigo) الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان الهام گرفته از رفتار مورچگان در جستجوی منابع غذایی است و در سال ۱۹۹۱ توسعه یافته است.

این الگوریتم بهبودیابی، مبتنی بر جمعیت است که به صورت متوالی بر روی یک مسئله بهینه‌سازی عمل می‌کند و قدرت بالایی در بهینه‌سازی مسائل پیچیده دارد. لذا با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده توسط مورچگان، قادر است به راه‌حل‌های بهینه نزدیک شود و با تکرار این فرایند، بهبودهای اضافی را نیز ایجاد کند [7].

همچنین میرجلیلی در سال ۲۰۱۴، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری را مطرح کرد که الهام گرفته از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در طبیعت است. این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی و جستجوی فضاهای چندمعیاره استفاده می‌شود و قابلیت همگرایی سریع و جستجوی مؤثر را داراست و می‌تواند بهترین حل ممکن را در فضای جستجوی بزرگ و پیچیده پیدا کند.

با اجرای مراحل تعامل و بهبود مکان گرگ‌ها، الگوریتم قادر است به نتایج بهتر و بهینه‌تر دست یابد و در مسائل پیچیده‌تر نیز عملکرد خوبی داشته باشد [5,11].

در سال ۲۰۰۷ نیز گارگاری و لوکاس (E Atashpaz - C Lucas & Gargari) الگوریتم رقابت استعماری را ارائه کردند که یک الگوریتم فراابتکاری، الهام گرفته از رفتار رقابت و همکاری بین جامعه‌های استعماری در طبیعت است. این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی و جستجوی فضاهای چندمعیاره مورد استفاده قرار می‌گیرد [12,13]. در سال ۲۰۰۳ نیز، مظفر و همکاران، الگوریتم قورباغه را ارائه نمودند که بر پایه رفتار قورباغه‌ها در محیط طبیعی برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته شده است. پس از آن نیز در بسیاری از مسائل مهندسی مکانیک با هدف کاهش هزینه‌ها استفاده شده است [14-16].



شکل ۱ روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری [5]

الگوریتم کلونی مورچگان

این الگوریتم یک الگوریتم فراابتکاری بر مبنای رفتار و ارتباطات مورچگان در جستجوی غذا می‌باشد و در دهه ۱۹۹۰ توسط مارک دوریگو و همکاران توسعه داده شد و بر اساس تعاون مورچگان در سفرهای غذاگیری الهام گرفته شده است [7].

در الگوریتم کلونی مورچگان، مورچگان به صورت تصادفی در فضای جستجو قرار می‌گیرند و مواد شیمیایی به نام فرومون‌ها را رها می‌کنند. این فرومون‌ها ارتباطاتی بین مورچگان ایجاد می‌کنند و به عنوان راهنمایی برای انتخاب مسیرها و جستجوی بهینه عمل می‌کنند. در حقیقت الگوریتم کلونی مورچگان از رفتار واقعی مورچه‌ها الهام گرفته شده است، اما شبیه‌سازی کاملی از آن وجود ندارد، و همچنان به عنوان یک ابزار قدرتمند بهینه‌سازی برای حل طیف گسترده‌ای از مسائل در دنیای واقعی به اثبات رسیده است. برخی از کاربردهای برجسته این الگوریتم در بهینه‌سازی مسیر، طراحی مدار، برنامه‌ریزی وسایل نقلیه و غیره است.

در هر مرحله از الگوریتم، مورچگان به دو عملکرد اصلی تکیه می‌کنند: اکتشاف و بهره‌برداری [7].

به طور کلی، الگوریتم کلونی مورچگان شامل مراحل زیر است:

۱. مقداردهی اولیه: مقداردهی اولیه به مورچگان و فرومون‌ها

الگوریتم گرگ خاکستری

این الگوریتم در سال ۲۰۱۴ توسط سید علی میرجلیلی ارائه شده است. الگوریتم گرگ خاکستری یک الگوریتم متاهیورستیک است که از ساختار سلسله مراتبی (Hierarchical) و رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در هنگام شکار کردن الهام گرفته است. در الگوریتم گرگ خاکستری، جمعیتی از گرگ‌ها به صورت تصادفی در فضای جستجو قرار می‌گیرند. هر گرگ مشخصه‌هایی مانند موقعیت، سرعت و شکار موفقیت‌آمیز خود را دارد. این مشخصه‌ها بر اساس قوانینی که بر اساس رفتار گروهی گرگ‌ها تعیین شده‌اند، تغییر می‌کنند. در هر مرحله از الگوریتم، گرگ‌ها به دو عملکرد اصلی تکیه می‌کنند: اکتشاف و بهره‌برداری. اکتشاف به معنای جستجو در مناطق جدید فضای جستجو و کشف نقاط بهتر است، در حالی که بهره‌برداری به معنای بهره‌برداری از نقاط قوی و بهترین‌هاست [5].

در الگوریتم گرگ خاکستری، گروه گرگ‌ها با توجه به رفتارشان در شکار و اجتماع، به چهار نوع تقسیم می‌شوند. این انواع شامل موارد زیر هستند:

گرگ آلفا (Alpha): گرگ آلفا به عنوان رهبر گروه عمل می‌کند و معمولاً بهترین عملکرد را دارد. موقعیت آلفا به عنوان بهترین حل موجود در جمعیت در نظر گرفته می‌شود و بقیه گرگ‌ها بر اساس آن بهبود می‌یابند.

گرگ بتا (Beta): گرگ بتا مسئول کمک به گرگ آلفا در جستجوی بهترین حل است. معمولاً در نزدیکی گرگ آلفا قرار می‌گیرد و سعی می‌کند بهترین راهنمایی‌ها را در جهت بهبود عملکرد ارائه دهد.

گرگ دلتا (Delta): گرگ دلتا نقشی مشابه گرگ بتا دارد و به گرگ آلفا و بتا در جستجوی بهترین حل کمک می‌کند. در نزدیکی گرگ بتا قرار می‌گیرد و تلاش می‌کند با تجمع راهنمایی‌های مختلف بهبودی در عملکرد داشته باشد.

گرگ اپسیلون (Epsilon): گرگ اپسیلون به عنوان گرگی عادی در جمعیت حضور دارد و بر اساس رفتار سایر گرگ‌ها تغییر می‌کند. این گرگ‌ها به عنوان جستجوگران اصلی در جستجوی مناطق جدید و اکتشافی عمل می‌کنند [11].

روندنمای الگوریتم گرگ‌های خاکستری

در شکل (۱) روندنمای کلی الگوریتم گرگ‌های خاکستری مشاهده می‌شود.

فضای جستجو قرار می‌گیرند و منابع نور را توزیع می‌کنند. هر کرم شب‌تاب قادر به تشخیص میزان نور در اطراف خود است و با توجه به میزان نور واکنش‌هایی نشان می‌دهد [22].

به طور کلی، الگوریتم کرم شب‌تاب شامل مراحل زیر است:

۱. مقداردهی اولیه: مقداردهی اولیه به کرم‌های شب‌تاب و منابع نور صورت می‌گیرد.

۲. حرکت کرم‌ها: کرم‌های شب‌تاب به صورت تصادفی در فضای جستجو حرکت کرده و نور در اطراف خود را اندازه‌گیری می‌کنند.

۳. ارتباطات کرم‌ها: کرم‌ها با توجه به میزان نور در اطراف خود و بر اساس قوانین تعاملی، واکنش‌هایی نشان می‌دهند. این واکنش‌ها شامل جذب منابع نور و جلوگیری از رسیدن کرم‌های دیگر به منابع نور است.

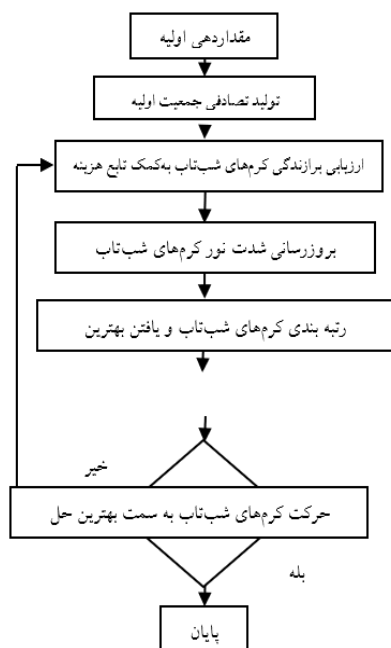
۴. بهروزرسانی شعاع نور: بر اساس واکنش‌ها و میزان نور در اطراف، شعاع نور هر کرم شب‌تاب بهروزرسانی می‌شود.

۵. بهروزرسانی منابع نور: بر اساس شعاع نور کرم‌ها و توزیع آن‌ها در فضای جستجو، منابع نور بهروزرسانی می‌شوند.

۶. تا زمان اتمام شرایط خاتمه: مراحل ۲ تا ۵ تکرار می‌شوند تا به شرایط خاتمه مانند تعداد تکرارها یا دستیابی به یک حل بهینه برسند [22].

روندنامای الگوریتم کرم شب‌تاب

در شکل (۳) روندنامای الگوریتم کرم شب‌تاب را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۳ فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب [23]

صورت می‌گیرد.

۲. حرکت مورچگان: مورچگان به صورت تصادفی در فضای جستجو حرکت می‌کنند.

۳. ترکیب فرومون‌ها: مقدار فرومون‌ها بر روی مسیرهایی که مورچگان طی کرده‌اند، به روزرسانی می‌شود.

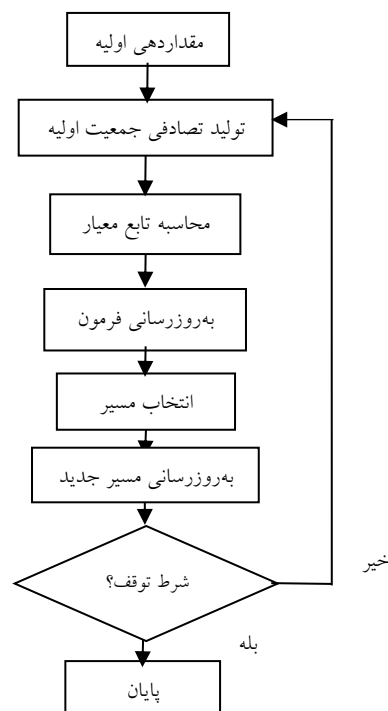
۴. انتخاب مسیر: مورچگان بر اساس مقدار فرومون‌ها و احتمال‌های مرتبط با مسیرها، مسیرهای بهینه را انتخاب می‌کنند.

۵. بهروزرسانی بهترین مسیر: بهترین مسیرهایی که تا کنون توسط مورچگان پیدا شده‌اند، به عنوان بهترین حل موجود در نظر گرفته می‌شود و بهروزرسانی می‌شوند.

۶. تا زمان اتمام شرایط خاتمه: مراحل ۲ تا ۵ تکرار می‌شوند تا به شرایط خاتمه برسند [7].

روندنامای الگوریتم کلونی مورچگان

در شکل (۲) نیز روندنامای کلی الگوریتم کلونی مورچگان مشاهده می‌شود.



شکل ۲ روندنامای الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان [30]

معرفی الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب

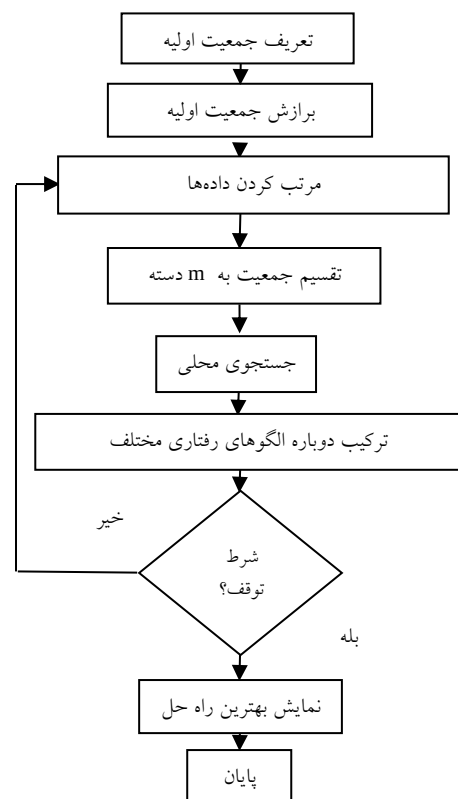
الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب بر اساس مکانیزم‌های تعاملی کرم‌های شب‌تاب در جستجوی منابع نور الهام گرفته شده است. در این الگوریتم، کرم‌های شب‌تاب به صورت تصادفی در

معرفی الگوریتم بهینه سازی قورباغه

الگوریتم قورباغه یک الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه، یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری است که از رفتار اجتماعی قورباغه‌ها در طبیعت الهام گرفته شده است [14-16]. الگوریتم بهینه‌سازی قورباغه الگوریتم فراابتکاری است که بر پایه رفتار قورباغه‌ها در جستجوی غذا توسعه یافته است. این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم، یک جمعیت از قورباغه‌ها (که هر قورباغه یک حالت ممکن را نشان می‌دهد) ایجاد می‌شود. این قورباغه‌ها در جستجوی یافتن یک حل بهینه برای مسئله قرار می‌گیرند. الگوریتم قورباغه به دلیل رفتار مشابه قورباغه در حرکت و جستجو در فضای سه‌بعدی، برای حل مسائل پیچیده و چندمعیاره کارآمد است. این الگوریتم می‌تواند در مسائل بهینه‌سازی، هوش مصنوعی، بهینه‌سازی ترکیبی و سایر حوزه‌های مرتبط مورد استفاده قرار گیرد [9].

روندنمای الگوریتم قورباغه

در شکل (۴) روندنمای الگوریتم قورباغه را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی قورباغه [14]

روند کار الگوریتم قورباغه به شرح زیر است:

۱. اولیه: جمعیتی از قورباغه‌ها به صورت تصادفی ایجاد می‌شود.
۲. ترکیب: قورباغه‌ها بر اساس مقدار ارزیابی، به صورت تصادفی در گروه‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شوند. گروه‌ها با توجه به مقدار ارزیابی از بهترین تا بدترین مرتب می‌شوند.
۳. بهبود: در هر گروه، قورباغه‌ها با استفاده از روش بهبود محلی وضعیت خود را بهبود می‌بخشند.
۴. حرکت: قورباغه‌ها در هر گروه به صورت تصادفی حرکت می‌کنند و وضعیت جدیدی را برای خود ایجاد می‌کنند.
۵. ادغام: پس از حرکت، گروه‌های قورباغه‌ها ادغام می‌شوند و جمعیت جدیدی تشکیل می‌دهند.
۶. به‌روزرسانی: با توجه به مقدار ارزیابی، قورباغه‌ها به‌روزرسانی می‌شوند و بهترین حالت‌ها دریافت می‌شوند.
۷. تا زمان اتمام شرایط خاتمه: مراحل ۳ تا ۷ تکرار می‌شوند تا به شرایط خاتمه برسیم.
۸. ارزیابی: هر قورباغه وضعیت خود را ارزیابی کرده و مقدار مناسبی برای آن اختصاص می‌دهد [15,16].

معرفی الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری

الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری یک الگوریتم محاسباتی است که بر اساس مفهوم رقابت و هم‌اندیشی در یک سازمان استعماری تشکیل شده است [13,27]. این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده و چندمعیاره استفاده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری از ترکیب الگوریتم‌های تکاملی و الگوریتم‌های مبتنی بر رقابت بین گروه‌ها بهره می‌برد [12]. روند کار الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری به شرح زیر است:

۱. مقداردهی اولیه: استعمارها و جانداران به صورت تصادفی در فضای جستجو قرار می‌گیرند.
۲. ارزیابی: هر جانداران وضعیت خود را ارزیابی می‌کند و مقدار مناسبی برای آن اختصاص می‌دهد.
۳. تعامل استعمارها: استعمارها به صورت مکرر اطلاعات و تجربیات خود را با استفاده از عملکرد جانداران مبادله می‌کنند.
۴. رقابت و انتخاب: جانداران درون هر استعمار به رقابت با یکدیگر در جهت بهبود مقدار ارزیابی خود می‌پردازند. جانداران با برتری در رقابت در استعمار خود، به نسل بعدی منتقل می‌شوند.
۵. خاتمه: تا زمان اتمام کار، مراحل ۳ و ۴ تکرار می‌شوند.
۶. خروجی: پس از پایان مراحل الگوریتم، بهترین حل یافت شده

عامل تطبیقی پویا

در واقع عامل تطبیقی پویا به منظور متعادل کردن نرخ همگرایی و توانایی جستجوی بهینه مطلق در طول فرایند جستجو معرفی شده است. این عامل توانایی تطبیق سرعت جستجو را در محیط مسئله دارد و با تغییر سرعت جستجو و تطبیق آن با شرایط محیطی، به دنبال بهینه‌سازی بهتری می‌گردد. با این تطبیق پویا، الگوریتم‌ها قادر به بهبود نرخ همگرایی و جستجوی بهینه‌تر در فضای جستجوی خود هستند. در این مقاله، با استفاده از تکنیک‌های خروج از بهینه محلی، این الگوریتم‌ها توانایی جستجو در فضای جستجوی گسترده‌تر را دارند و می‌توانند به نتایج بهینه مطلق نزدیک شوند.

در الگوریتم گرگ خاکستری، عامل تطبیقی پویا نقش مهمی در بهبود عملکرد الگوریتم ایفا می‌کند. این عامل معمولاً برای تطبیق نرخ اکتشاف و بهبود جستجو استفاده می‌شود و بستگی به پارامترهای مرتبط با نرخ اکتشاف و تغییرات محیطی دارد، رابطه (۱) به خوبی نمایانگر این عامل است:

$$a = 2 - t * \left(\frac{2}{\max_iter} \right) \quad (1)$$

در این رابطه، a نرخ اکتشاف است. t زمان فعلی یا تکرار فعلی است و $\max_iter$ حداکثر تعداد تکرارها است.

با استفاده رابطه (۱) عامل تطبیقی پویا می‌تواند نرخ اکتشاف را در طول فرایند جستجو تنظیم کند. در ابتدای جستجو این نرخ افزایش و جستجو تصادفی و منجر به خروج از اکستریم‌های محلی می‌شود و با گذشت زمان و تکرارها، نرخ اکتشاف کاهش می‌یابد و الگوریتم از جستجوی بیشتری در نزدیکی به مکان‌های بهینه استفاده می‌کند. لذا این تطبیق باعث می‌شود الگوریتم بهبود یابد و نتایج بهینه‌تری را تولید کند.

در الگوریتم کلونی مورچگان نیز عامل تطبیقی پویا معمولاً برای تطبیق نرخ انتشار فرومون استفاده می‌شود. در این الگوریتم، یکی از روابط کلیدی که توسط عامل تطبیقی پویا تغییر می‌کند، رابطه انتشار فرومون است. این رابطه به شکل زیر بیان شده است:

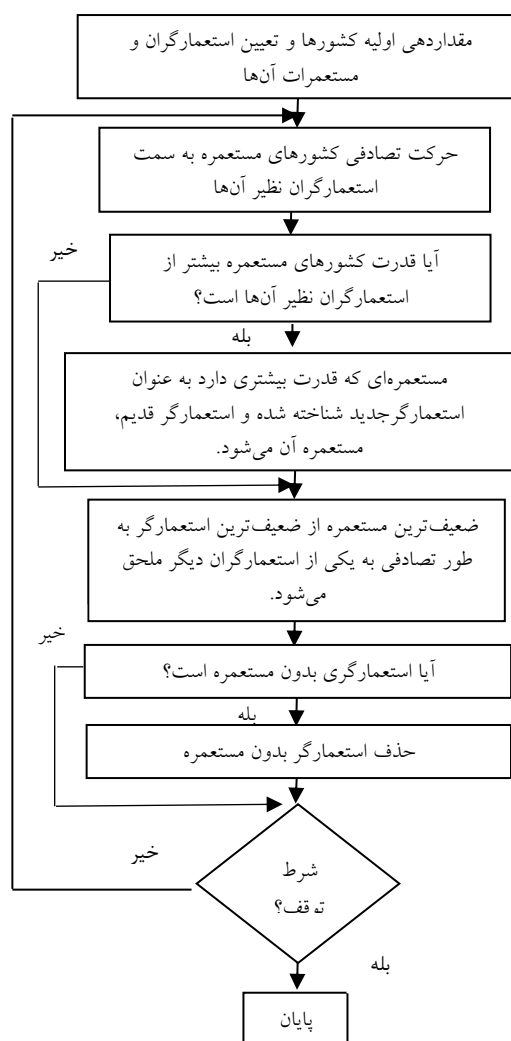
$$P_clone(i) = P_min + (P_max - P_min) * \frac{(fit(i) - fit_min)}{(fit_max - fit_min)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $P_clone(i)$ انتشار فرومون در جهت i است. P_min و P_max حداقل و حداکثر مقادیر انتشار فرومون هستند.

به عنوان خروجی الگوریتم انتخاب می‌شود. پس از پایان الگوریتم، مقدار بهینه‌سازی شده تابع هدف و مقدار بهینه‌یابی شده برای متغیرها به عنوان خروجی الگوریتم ارائه می‌شود. در واقع الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری به دلیل قابلیت تطبیق با مسائل پیچیده و چندمعیاره و قدرت استفاده از رقابت و هم‌اندیشی بین امپراتورها، به عنوان یک روش قوی و مؤثر در حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری قابلیت تعمیم و انعطاف‌پذیری دارد و می‌تواند در مسائل مختلفی از جمله بهینه‌سازی تابع، بهینه‌سازی مسئله‌های ترکیبی و بهینه‌سازی پارامترها مورد استفاده قرارگیرد [10].

روندنامای الگوریتم رقابت استعماری

شکل (۵) روندنامای الگوریتم قورباغه را نشان می‌دهد.



شکل ۵. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری [27]

در آخر در الگوریتم رقابت استعماری عامل تطبیقی پویا نقش مهمی در تطبیق و بهبود عملکرد الگوریتم ایفا می‌کند. این عامل معمولاً برای تطبیق نرخ مهاجرت و تغییر مقدار آن در طول فرایند جستجو استفاده می‌شود. رابطه‌ای که توسط عامل تطبیقی پویا در الگوریتم رقابت استعماری تأثیر دارد، بستگی به پارامترهای مرتبط با مهاجرت و تغییرات محیطی دارد. رابطه (۵) از عامل تطبیقی پویا در این الگوریتم استفاده می‌کند:

$$\text{Migration_rate}(t) = \text{Migration_rate_initial} * e^{(-\alpha * t)} \quad (5)$$

در این رابطه، $\text{Migration_rate}(t)$ نرخ مهاجرت در زمان t است. عبارت $\text{Migration_rate_initial}$ نرخ مهاجرت اولیه است. e نماد عدد اولیر است.

α پارامتری است که توسط عامل تطبیقی پویا تنظیم می‌شود و t زمان فعلی در الگوریتم است. با استفاده از رابطه (۵) عامل تطبیقی پویا می‌تواند نرخ مهاجرت را در طول فرایند جستجو تنظیم کند. با گذشت زمان، نرخ مهاجرت کم می‌شود و تأثیر مهاجرت بین جمعیت‌ها کاهش می‌یابد. این تطبیق باعث می‌شود که الگوریتم بهبود یابد و به جمعیت‌هایی که در نتیجه عملکرد بهتری هستند، اجازه بدهد که بیشتر منتشر شوند و تأثیر بیشتری در روند جستجو داشته باشند. لذا عامل تطبیقی پویا در الگوریتم‌های تکاملی کلونی مورچگان، قورباغه، گرگ خاکستری، رقابت استعماری و کرم شب‌تاب با افزایش خود در ابتدای جستجو می‌تواند موجب خروج از بهینه محلی، عملکرد بهتر و جستجوی تصادفی و گسترده‌تر در فضای جستجوی الگوریتم‌ها شوند و با کاهش تدریجی به رسیدن به نقاط بهینه کمک کنند.

معرفی مسائل بهینه‌سازی مهندسی

معرفی مسائل بهینه‌سازی مهندسی مقید

در این بخش، پنج مسئله از مسائل بهینه‌سازی مهندسی مقید شده که دارای توابع هدف، متغیرهای طراحی و قیود مختلف هستند، انتخاب می‌شوند و عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب، رقابت استعماری و بقیه الگوریتم‌های پیشنهادی از نظر کیفیت راه‌حل و پایداری و همچنین نرخ هم‌گرایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پنج مسئله بهینه‌سازی مهندسی مقید با توجه به دسته‌بندی

$\text{fit}(i)$ مقدار تابع ارزیابی (fitness function) برای انتشار فرومون است و fit_min و fit_max حداقل و حداکثر مقادیر تابع ارزیابی در میزان انتشار فرومون هستند.

در واقع عامل تطبیقی پویا با تطبیق مقدار $P_clone(i)$ با شرایط محیطی و مقادیر تابع ارزیابی، انتشار فرومون را تنظیم می‌کند. لذا مسیرهایی که توسط مورچه‌های بیشتر دنبال می‌شوند، با غلظت فرومون بیشتری علامت‌گذاری می‌شوند و از این طریق امکان یافتن بهینه‌ترین حل و هدایت مورچه‌ها به سمت منابع غذایی را فراهم می‌کند.

در الگوریتم کرم شب‌تاب هم، فاکتور تصادفی‌سازی α به عنوان عامل پویا در طی فرایند جستجو تعدیل می‌شود. در اینجا k بین ۰ و ۱ است و نرخ افزایشی نام دارد که می‌تواند سرعت کاهش α را تعدیل کند، رابطه (۳) نمایانگر این عامل تطبیقی پویا است:

$$\alpha(t+1) = \alpha(t) \cdot \exp\left(-k \cdot \frac{t}{G_{max}}\right) \quad (3)$$

نرخ کاهشی k ممکن است روی کارایی پارامتر مدل تأثیر بگذارد. در رابطه (۳) G_{max} حداکثر تعداد تکرار و t نشان دهنده شاخص تولید نور می‌باشد.

در ادامه در الگوریتم قورباغه نیز عامل تطبیقی پویا برای بهبود نرخ همگرایی و جستجو در فضای جستجوی الگوریتم استفاده می‌شود.

در این الگوریتم، از رابطه (۴) برای تغییر سرعت جستجو استفاده می‌شود:

$$V(t+1) = V(t) + A(t) * (X_{best} - X(t)) \quad (4)$$

در این رابطه، $V(t+1)$ سرعت جستجو در زمان $t+1$ است.

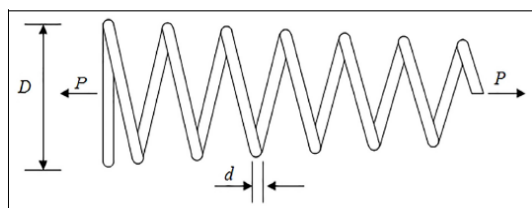
$V(t)$ سرعت جستجو در زمان t است.

$A(t)$ عامل تطبیقی پویا است که مقدار آن در طول فرایند جستجو تغییر می‌کند. X_{best} بهترین حل یافت شده تا آن لحظه است.

و $X(t)$ مکان فعلی جستجو در زمان t است.

در حقیقت عامل تطبیقی پویا با تطبیق مقدار $A(t)$ با شرایط محیطی، سرعت جستجو را تنظیم می‌کند. مقدار $A(t)$ می‌تواند به صورت ثابت، تصادفی یا با استفاده از روش‌های خاص تعیین شود. تغییر مقدار $A(t)$ در طول فرایند جستجو، به این الگوریتم قابلیت تطبیق با محیط و بهبود نرخ همگرایی را می‌دهد [28].

می‌دهند که در رابطه (۶) شرح داده شده است. مسئله طراحی دارای سه متغیر طراحی شامل قطر سیم d ، قطر متوسط سیم پیچ D و تعداد سیم پیچ‌های فعال N است که در تابع هدف $J(x)$ و تابع قیود به ترتیب با x_1 ، x_2 و x_3 نشان داده شده است. در واقع تعداد دور سیم پیچ یعنی x_3 باید از نوع عدد صحیح انتخاب گردد. تابع برازندگی و یا معیار و محدودیت‌های این مسئله نیز در رابطه (۶) تشریح شده است. در این میان قابل ذکر است که وزن فنر به طور کلی با حجم ماده‌ای که برای ساخت آن استفاده شده است، ارتباط دارد و حجم فنر به قطر سیم، تعداد دورها و طول فنر بستگی دارد. در جدول (۱) الگوریتم کرم شب‌تاب با چندین الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری دیگر از جمله الگوریتم مورچگان، رقابت استعماری، ازدحام ذرات، گرگ خاکستری و غیره مقایسه شده و همان طور که مشاهده می‌شود الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهادی بهترین حل را با مقدار تابع هدف 0.0126 ارائه می‌دهد.



شکل ۶ شماتیک فنر کششی [30]

متغیرهایشان به مسائل بهینه‌سازی پیوسته و گسسته تقسیم می‌شوند.

نتایج و بهترین راه‌حل‌های همه الگوریتم‌ها به کمک حساسیت‌سنجی پارامترها، برای این مسائل بهینه‌سازی مهندسی، در بیش از ۳۰ اجرای مستقل به دست می‌آیند. جداول این بخش شامل پنج الگوریتم موجود در بخش روش‌های حل این مقاله و الگوریتم‌های موجود در مرجع [29] است که با رنگ خاکستری در ردیف‌های انتهایی جداول مشخص شده است.

مسائل بهینه‌سازی مقید با متغیرهای پیوسته

مسئله طراحی فنر کششی/ فشردگی. شکل شماره (۶) شماتیک یک فنر کششی/ فشردگی را نشان می‌دهد.

هدف طراحی مسئله کشش/ فشردگی به حداقل رساندن وزن آن با اعمال قیود حداقل تغییر شکل، تنش برشی، فرکانس موج و حداکثر قطر خارجی است، به طوری که تغییر شکل در فنرها معمولاً به قانون هوک (نسبت نیروی بازگرداننده وارده از سوی فنر به میزان تغییر شکل فنر برابر است با مقدار ثابت فنر یا k) مرتبط است. فرکانس موج نیز معمولاً با توجه به ویژگی‌های مکانیکی فنر، از جمله سختی (k) و جرم (m) سیستم محاسبه می‌شود.

در واقع این قیود، چهار معادله نابرابر غیرخطی را تشکیل

جدول ۱ مسئله طراحی فنر کششی فشاری [29]

الگوریتم	x_1	x_2	x_3	g_1	g_2	g_3	g_4	J
ICA	۰/۰۵۶۹	۰/۴۹۶۳	۶/۱۷۱۱	-۰/۱۰۵۳	-۰/۴۴۱۹	-۱/۵۸۴۲	-۰/۶۰۳۰	۰/۰۱۳۱
ACOR	۰/۰۵۷۰	۰/۴۹۷۷	۶/۱۳۴۰	-۱/۰E-۴	-۱/۰E-۴	-۴/۲۶۶۴	-۰/۶۳۰۲	۰/۰۱۳۱
SFLA	۰/۰۵۰۰	۰/۳۱۵۷	۱۴/۲۸۶۳	-۰/۲۱۷۸	-۰/۶۳۹۹	-۰/۵۷۳۱	-۰/۳۲۳۹	۰/۰۱۲۸
GWO	۰/۰۵۲۷	۰/۳۸۲۱	۹/۹۶۷۹	-۵/۲۴E-۴	-۷/۵۶E-۴	-۴/۰۲۳۶	-۵/۰۰۵۲	۰/۰۱۲۸
FA	۰/۰۵۱۰	۰/۳۳۹۴	۱۲/۳۸۵۸	-۱/۴۴E-۱۰	-۱/۵۱E-۱۱	-۴/۰۰۳۹	-۰/۵۵۱۸	۰/۰۱۲۶
IAPSO	۰/۰۵۱۶	۰/۳۵۶۶	۱۱/۲۹۴۱	-۱/۹۷E-۱۰	-۴/۶۴E-۱۰	-۴/۰۵۳۶	-۱/۰۹۱۶	۰/۰۱۲۶
MBA	۰/۰۵۱۶	۰/۳۵۵۹	۱۱/۳۴۴۶	-۰/۰۰۰۹	-۰/۱۳۴۴	-۴/۰۵۲۲	-۰/۷۲۸۲	۰/۰۱۲۶
DAPSO-GA	۰/۰۵۰۰	۰/۳۷۴۴	۸/۵۴۶۵	-۱/۲۵E-۸	-۱/۴۴E-۷	-۴/۸۶۰۷	-۰/۷۱۷۰	۰/۰۰۹۸
IAPSO: improved adaptive particle swarm optimization; MBA: mine blast algorithm DAPSO-GA: dynamic adaptive particle swarm optimization and genetic algorithm								

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3] = [d \ D \ N]$$

$$0.25 \leq x_2 \leq 1.3, 2.0 \leq x_3 \leq 15.0.05 \leq x_1 \leq 2.0$$

$$J(x) = (x_3 + 2)x_2x_1^2$$

$$g_1(x): 1 - \frac{x_2^3x_3}{71785x_1^4} \leq 0.$$

$$g_2(x): \frac{4x_2^2 - x_1x_2}{12566(x_2x_1^3 - x_1^4)} + \frac{1}{5108x_1^2} - 1 \leq 0.$$

$$g_3(x): 1 - \frac{140.45x_1}{x_2^2x_3} \leq 0.$$

$$g_4(x): \frac{x_1 + x_2}{1.5} - 1 \leq 0$$

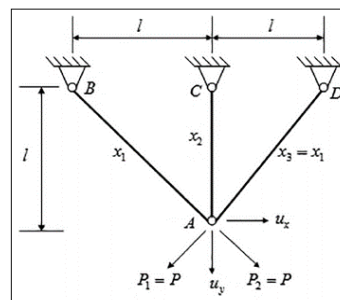
(۶)

مسئله طراحی کاهنده سرعت. در شکل (۸) تصویر شماتیک یک کاهنده سرعت نشان داده شده است. طرح بهینه‌سازی طراحی کاهش دهنده سرعت، برای به حداقل رساندن وزن آن، با توجه به قیود استحکام مربوط به تنش خمشی دندانه‌های چرخ‌دنده و تنش سطحی و تنش‌ها و انحراف عرضی شفت‌ها است. متغیرهای طراحی این مسئله طراحی شامل عرض (b)، مدول دندانه (m)، تعداد دندانه‌ها در پینیون (z)، طول شفت اول و دوم بین یاتاقان‌های آن‌ها (l1 و l2)، قطر شفت اول (d1) و قطر شفت دوم (d2) است. این متغیرهای طراحی به ترتیب با $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ و x_7 در معادلات تابع هدف و قیود نشان داده می‌شوند. متغیر طراحی x_3 (یعنی تعداد دندانه در پینیون) یک متغیر طراحی گسسته است و بقیه متغیرها پیوسته هستند. همچنین تابع برازندگی و یا معیار و محدودیت‌های این مسئله در رابطه (۸) آورده شده‌اند.

جدول ۲ مسئله طراحی خرابی سه‌میله‌ای [29]

الگوریتم	x_1	x_2	g_1	g_2	g_3	J
ACOR	۰/۸۰۸۳	۰/۳۵۵۳	-۱/۰E-۵	-۱/۵۲۵۸	-۱/۰۵۶۲	۲۶۴/۱۶
GWO	۰/۷۹۷۵	۰/۳۸۳۸	-۰/۶۰۱۲	-۱/۱۶۲۳	-۰/۶۲۳۱	۲۶۳/۹۵
FA	۰/۷۹۶۴	۰/۳۸۶۸	-۱/۳۱E-۹	-۶/۵۵۱۲	-۰/۵۱۲۳	۲۶۳/۹۳
ICA	۰/۷۸۳۳	۰/۴۲۳۸	-۰/۴۳۳۴	-۱/۴۳۳۹	-۰/۹۹۹۶	۲۶۳/۹۲
SFLA	۰/۷۸۵۶	۰/۴۱۷۱	-۰/۱۷۰۲	-۱/۳۷۹۶	-۰/۷۹۰۶	۲۶۳/۸۰
PSO-TVAC	۰/۷۸۸۷	۰/۴۰۸۱	-۴/۴۴E-۱۳	-۱/۴۶۴۲	-۰/۵۳۵۸	۲۶۳/۸۹
SC	۰/۷۸۸۶	۰/۴۰۸۴	-۸/۲۷E-۹	-۱/۴۶۳۹	-۰/۵۳۶۱	۲۶۳/۸۹
DAPSO-GA	۰/۷۸۸۶	۰/۴۰۸۲	-۲/۳۱E-۰۹	-۱/۴۶۴۱	-۰/۵۳۵۸	۲۶۳/۸۹
PSO-TVAC: Particle swarm optimization with time-varying accelerating coefficients; SC: Society and civilization algorithm; DAPSO-GA: dynamic adaptive particle swarm optimization and genetic algorithm.						

مسئله طراحی خرابی سه‌میله متقارن. شکل (۷) نمودار شماتیک یک سازه خرابی متقارن سه‌میله‌ای را نشان می‌دهد. سازه خرابی متقارن سه‌میله‌ای از فولاد تشکیل شده و تحت دو بار ثابت $P_1=P_2=P$ قرار دارد. هدف مسئله، طراحی بهینه سازه خرابی سه‌میله‌ای و به حداقل رساندن حجم در معرض قیود تنش است. متغیرهای طراحی، سطح مقطع سه میله x_1, x_2 و x_3 هستند.



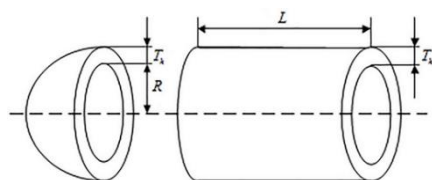
شکل ۷ شماتیک یک سازه خرابی متقارن سه‌میله‌ای [29]

تابع هزینه و محدودیت‌های این مسئله در رابطه (۷) آورده شده‌اند.

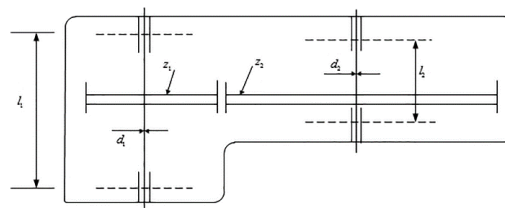
الگوریتم‌های بخش روش‌های حل این مقاله در کنار الگوریتم‌های مرجع [29] با اندازه ازدحام ۲۰ و حداکثر تعداد تکرار ۱۰۰ برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. همانطور که مشهود است الگوریتم DAPSO-GA از مرجع [29] حل بهتری را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها ارائه می‌دهند. در جدول (۲) تمامی الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری در کنار دیگر مقایسه شده و همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم قورباغه پیشنهادی بهترین حل را با مقدار تابع هدف ۲۶۳/۸۰ ارائه می‌دهد.

نزدیک می‌شود (کمتر از ۵۰ تکرار)، که نرخ همگرایی بالای این الگوریتم را برای این مسئله طراحی گسسته مقید نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، الگوریتم DAPSO-GA از مرجع [29] حل مناسبی را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها ارائه می‌دهند. در جدول (۳) الگوریتم کرم شبتاب نیز با الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری دیگر مقایسه شده و همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادی بهترین حل را با مقدار تابع هدف ۲۹۹۰/۰۴ ارائه می‌دهد.

مسئله طراحی مخزن تحت فشار. شکل (۹) شماتیک از یک مخزن تحت فشار را نشان می‌دهد. هدف طراحی به حداقل رساندن هزینه ساخت کل آن، از جمله هزینه‌های مواد، شکل‌دهی و جوش است. متغیرهای طراحی شامل ضخامت پوسته T_s ، ضخامت سر T_h ، شعاع داخلی R و طول مقطع استوانه‌ای ظرف L ، که در آن T_s و T_h متغیرهای گسسته و مضرب صحیح ۰،۰۶۲۵ هستند، درحالی‌که R و L متغیرهای پیوسته هستند. این چهار متغیر طراحی به ترتیب با x_1 ، x_2 ، x_3 و x_4 در تابع هدف اعمال شده و معادلات قیود هم در رابطه (۹) ارائه شده است.



شکل ۹ شماتیک از یک مخزن تحت فشار [30]



شکل ۸ شماتیک یک کاهنده سرعت [30]

الگوریتم‌های بخش روش‌های حل درکنار الگوریتم‌های مرجع [29] با سایز ازدحام ۴۰ و حداکثر تعداد تکرارهای ۵۰۰ برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned}
 &2.6 \leq x_1 \leq 3.6, \quad 0.7 \leq x_2 \leq 0.8, \quad 17 \leq x_3 \leq 28, \\
 &7.3 \leq x_4, x_5 \leq 8.3, \quad 2.9 \leq x_6 \leq 3.9, \quad 5.0 \leq x_7 \leq 5.5 \\
 &J(x) = 0.7854x_1x_2^2(3.3333x_3^2 + 14.9334x_3 - 43.0934) \\
 &\quad - 1.508x_1(x_6^2 + x_7^2) + 7.4777(x_6^3 + x_7^3) \\
 &\quad + 0.7854(x_4x_6^2 + x_5x_7^2) \\
 &g_1(x): \frac{27}{x_1x_2^2x_3} - 1 \leq 0, \quad g_2(x): \frac{397.5}{x_1x_2^2x_3^2} - 1 \leq 0, \\
 &g_3(x): \frac{1.93x_4^3}{x_2x_6^4x_3} - 1 \leq 0, \quad g_4(x): \frac{1.93x_5^3}{x_2x_7^4x_3} - 1 \leq 0, \\
 &g_5(x): \frac{[(745x_4/x_2x_3)^2 + 16.9 \times 10^6]^{0.5}}{110x_6^3} - 1 \leq 0 \\
 &g_6(x): \frac{[(745x_6/x_2x_3)^2 + 157.5 \times 10^6]^{0.5}}{110x_7^3} - 1 \leq 0.
 \end{aligned}
 \tag{۸}$$

مقدار تابع هدف در تکرارهای اولیه به سرعت به حداقل

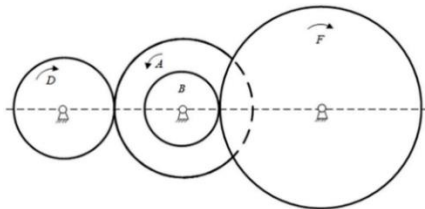
جدول ۳ مسئله طراحی کاهنده سرعت [29]

الگوریتم	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	J
GWO	۳/۵۱۹۸	۰/۷	۱۷	۷/۵۴۳۱	۸/۰۱۷۷	۳/۴۲۵۴	۵/۲۸۸۹	۳۰۳۲/۳۶
FA	۳/۵۳۴۴	۰/۷	۱۷	۷/۸۲۱۷	۸/۰۴۲۱	۳/۳۵۱۲	۵/۲۸۶۸	۳۰۲۰/۰۶
SFLA	۳/۵۰۰۰	۰/۷	۱۷	۷/۴۵۱۸	۷/۹۰۱۱	۳/۳۵۰۵	۵/۲۹۴۴	۳۰۰۴/۹۳
ACOR	۳/۵۰۳۰	۰/۷	۱۷	۷/۴۰۶۹	۷/۸۲۱۶	۳/۳۵۳۴	۵/۲۸۶۷	۳۰۰۴/۰۴
ICA	۳/۵۰۰۱	۰/۷	۱۷	۷/۳۰۰۲	۷/۷۱۵۷	۳/۳۵۰۲	۵/۲۸۶۷	۲۹۹۰/۰۴
IAPSO	۳/۵۰۰۰	۰/۷	۱۷	۷/۳۰۰۰	۷/۷۱۵۳	۳/۳۵۰۲	۵/۲۸۶۶	۲۹۹۴/۴۷
MBA	۳/۵۰۰۰	۰/۷	۱۷	۷/۳۰۰۰	۷/۷۱۵۷	۳/۳۵۰۲	۵/۲۸۶۶	۲۹۹۴/۴۸
DAPSO-GA	۳/۵۰۰۰	۰/۷	۱۷	۷/۳۰۰۰	۷/۷۱۵۳	۳/۳۵۰۲	۵/۲۸۶۶	۲۹۹۴/۴۷
IAPSO: improved adaptive particle swarm optimization; MBA: mine blast algorithm DAPSO-GA: dynamic adaptive particle swarm optimization and genetic algorithm								

جدول ۴ مسئله طراحی مخزن تحت فشار [29]

الگوریتم	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	J
ACOR	۰/۸۴۶۲	۰/۴۱۷۸	۴۳/۸۹	۱۵۵/۵۶	۱/۰E-۳	۱/۰E-۳	۱/۰E-۳	-۸۴/۴۳	۶۰۰۴/۰۹
FA	۰/۸۰۰۷	۰/۳۹۷۱	۴۱/۳۷	۱۸۶/۰۴	-۱/۴E-۹	-۱/۵E-۴	-۰/۸E-۶	-۵۹/۵	۵۹۴۹/۰۶
ICA	۰/۷۸۴۲	۰/۳۸۵۴	۴۰/۵۳	۱۹۷/۰۷	-۰/۰۳۱۵	-۵/۲۶۹۷	-۲/۹۶E۴	-۱۳۰/۸۰	۵۹۰۳/۰۱
SFLA	۰/۷۸۰۶	۰/۳۸۴۸	۴۰/۴۳	۱۹۸/۵۶	-۰/۰۹۰۵	-۱/۷۱۷۷	-۳/۶E۴	-۱۱۱/۳۱	۵۸۹۱/۳۰
GWO	۰/۷۷۸۳	۰/۳۸۶۱	۴۰/۳۲	۱۹۹/۹۶	-۶/۲E-۱۵	-۱/۱E-۱۶	-۷۹/۹۹	-۴۴/۳	۵۸۹۰/۷۵
IAPSO	۰/۸۱۲۵	۰/۴۳۷۵	۴۲/۰۹	۱۷۶/۶۳	-۴/۰E-۱۳	-۳/۵E-۰۲	-۱/۳E-۰۷	-۶۳/۳	۶۰۵۹/۷۱
MBA	۰/۷۸۰۲	۰/۳۸۵۶	۴۰/۴۲	۱۹۸/۴۷	.	.	-۸۶/۳۶	-۴۱/۵	۵۸۸۹/۳۲
DAPSO-GA	۰/۸۱۲۵	۰/۴۳۷۵	۴۲/۰۹	۱۷۶/۶۳	-۴/۰E-۱۳	-۳/۵E-۰۲	-۱/۳E-۰۷	-۶۳/۳	۶۰۵۹/۷۱
IAPSO: improved adaptive particle swarm optimization; MBA: mine blast algorithm DAPSO-GA: dynamic adaptive particle swarm optimization and genetic algorithm									

که بر روی قیود که تعداد دندانه‌های چهار چرخ‌دنده است و فقط در محدوده مجاز متغیرهای طراحی است، اعمال می‌شود. این مسئله یک مسئله بهینه‌سازی گسسته است، زیرا همه متغیرهای طراحی اعداد صحیح هستند. تعداد دندانه‌های چرخ‌دنده‌های A، B، D و F (یعنی متغیرهای طراحی) در رابطه (۵) به ترتیب با x₁، x₂، x₃ و x₄ در تابع هدف، نشان داده شده است. تابع برازندگی و یا معیار و محدودیت‌های این مسئله نیز در رابطه (۵) آورده شده‌اند. برای حل این مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم کرم شب‌تاب گسسته با اندازه ازدحام ۱۰۰ و حداکثر تعداد تکرار ۵۰۰ استفاده شده است. همان طور که نشان داده شده است الگوریتم DAPSO-GA از مرجع [30] حل مناسبی را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها برای مسئله طراحی مجموعه چرخ‌دنده‌ای ارائه می‌دهند. جدول (۵) مقایسه راه‌حل‌های بهینه ارائه شده توسط روش‌های موجود در بخش روش‌های حل و الگوریتم‌های مرجع [30] را ارائه می‌دهد. ملاحظه می‌شود که الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادی بهترین حل را با مقدار تابع هدف ۷/۷E-۳۴ ارائه می‌دهد.



شکل ۱۰ شماتیک از یک مجموعه چرخ‌دنده‌ای [29]

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4]$$

$$12 \leq x_i \leq 60, i = 1, 2, 3, 4$$

$$J(x) = \left(\frac{1}{6.931} - \frac{x_2 x_3}{x_1 x_4} \right)^2 \quad (5)$$

الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهادی با اندازه ازدحام ۲۵ و حداکثر تعداد تکرار ۵۰۰ عدد، برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. همان طور که مشهود است. الگوریتم MBA از مرجع [29] حل بهتری را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها ارائه می‌دهند. در جدول (۴) تمامی الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری در کنار یکدیگر مقایسه شده و همان طور که مشاهده می‌شود الگوریتم گرگ خاکستری پیشنهادی بهترین حل را با مقدار تابع هدف ۵۸۹۰/۷۵ پیدا می‌کند.

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [T_s \ T_h \ R \ L]$$

$$x_1 \geq 1 \times 0.0625, \ x_2 \leq 99 \times 0.0625, \ x_3 \geq 10.,$$

$$x_4 \leq 200.$$

$$J(x) = 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.166x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3$$

$$g_1(x): -x_1 + 0.0193x_3 \leq 0.$$

$$g_2(x): -x_2 + 0.00954x_3 \leq 0.$$

$$g_3(x): -\pi x_3^2 - \frac{4}{3}\pi x_3^3 + 1296000 \leq 0.$$

$$g_4(x): x_4 - 240 \leq 0.$$

(۹)

مسائل بهینه‌سازی مهندسی مقید با متغیرهای گسسته

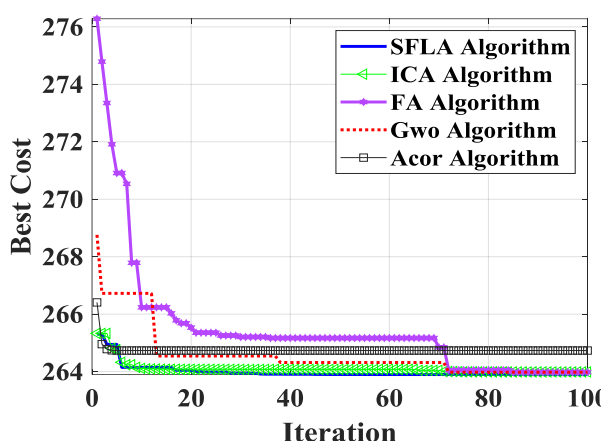
[29]

مسئله طراحی مجموعه چرخ‌دنده‌ای. شکل (۱۰) یک نمودار شماتیک از یک مجموعه دنده‌ای را نشان می‌دهد که از چهار چرخ دنده تشکیل شده است. طرح مسئله بهینه‌سازی طراحی مجموعه چرخ‌دنده‌ای، جهت به حداقل رساندن خطا بین نسبت دنده به دست آمده و نسبت مورد نیاز، یعنی ۱ بر روی ۶/۹۳۱ بوده

جدول ۵ مسئله طراحی مجموعه چرخ‌دنده‌ای

الگوریتم	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	J
FA	۵۹	۱۴	۱۴	۲۳	۲/۴۶E-۸
GWO	۵۹	۲۲	۱۲	۳۱	۳/۸۲E-۹
ACOR	۵۰	۲۱	۱۴	۴۳	۱/۸۸E-۱۲
SFLA	۵۷	۳۳	۱۴	۵۶	۳/۰۸E-۳۳
ICA	۴۵	۲۲	۱۳	۴۵	۷/۷۰E-۳۴
IAPSO	۴۳	۱۶	۱۹	۴۹	۲/۷۰E-۱۲
MBA	۴۳	۱۶	۱۹	۴۹	۲/۷۰E-۱۲
DAPSO-GA	۴۹	۱۶	۱۹	۴۳	۲/۷E-۱۲

IAPSO: improved adaptive particle swarm optimization; MBA: mine blast algorithm DAPSO-GA: dynamic adaptive particle swarm optimization and genetic algorithm



شکل ۱۱ تاریخچه همگرایی تابع هزینه مسئله طراحی خریای سه‌میله‌ای توسط پنج الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری

و نتایج تأییدکننده موفقیت الگوریتم قورباغه برای مسئله طراحی خریای سه‌میله‌ای است.

نمایش سرعت اجرا در حل الگوریتم‌ها

در این بخش مطابق جدول (۶) برای مسئله خریای سه‌میله‌ای، پنج الگوریتم فراابتکاری از نظر سرعت اجرا، با مقدار برازندگی مشخص و در ۱۰۰ تکرار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در پایان نیز پیشنهاد می‌گردد روش‌های بررسی شده، با الگوریتم‌های کلاسیک، روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی و غیره مقایسه شده و ترکیب این روش‌ها نیز برای حل مسائل متنوع در دیگر حوزه‌ها و مسائل مهندسی مورد ارزیابی قرار گیرد.

نتایج

آزمایش حساسیت‌سنجی

به طور کلی معیار اعداد همگرایی در هر الگوریتم فراابتکاری به طور مجزا، نشان دهنده تعداد مراحل مورد نیاز برای رسیدن به بهینه مطلق است.

هر چه عدد همگرایی کمتر باشد، الگوریتم بهتر و سریعتر به بهینه مطلق همگرا می‌شود. لذا در این مقاله به کمک آزمون حساسیت‌سنجی روی پارامترهای مهم الگوریتم‌های فراابتکاری و بررسی حساسیت آن‌ها نسبت به تغییر در هر یک از این پارامترها، بهترین تنظیمات پارامترها برای هر الگوریتم بهینه‌سازی جهت دستیابی به عدد همگرایی بهینه در حل تمام مسائل تعیین شده است.

به عنوان مثال در الگوریتم فراابتکاری قورباغه برای حل مسئله طراحی خریای سه‌میله‌ای، پارامترهای بیشینه تعداد تکرار، جمعیت اولیه قورباغه‌ها، تعداد ممپلکس‌ها (memplex)، اندازه ممپلکس‌ها در آزمایش حساسیت‌سنجی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتیجه نهایی حساسیت‌سنجی الگوریتم فراابتکاری قورباغه در شکل (۱۱) در کنار بقیه الگوریتم‌های فراابتکاری مشاهده می‌گردد.

نتایج همگرایی

شکل (۱۱) تاریخچه همگرایی تابع برازندگی مسئله طراحی خریای سه‌میله‌ای برای پنج الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری را نشان می‌دهد.

جدول ۶ نتیجه آزمون میانگین زمان اجرای الگوریتم‌ها

زمان اجرا به ثانیه	نوع الگوریتم	
۱۸	گرگ خاکستری	۱
۲۴	رقابت استعماری	۲
۲۵	کرم شب تاب	۳
۴۰	قورباغه	۴
۴۲	کلونی مورچگان	۵

به عنوان نمونه، نتایج حل مسئله طراحی خریای سه‌میله‌ای توسط پنج الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری نشان می‌دهند که الگوریتم قورباغه، با دقت ۰/۱۳۶ درصد در این مسئله جواب دقیق‌تری دارد. در حقیقت برای مسائل مختلف با توجه به گسسته یا پیوسته بودن مسئله، یک الگوریتم بهینه‌سازی مشخص، برای هر یک از مسائل پاسخ دقیق‌تری ارائه می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم‌های فوق در مسائل مختلف می‌توانند همزمان دقت و سرعت را بهبود بخشیده و این از مظاهر هوش ازدحامی است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله پنج مسئله در حوزه مهندسی مکانیک به همراه قیود و نتایج مربوطه مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم‌های گرگ خاکستری، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم کرم شب تاب، رقابت استعماری و قورباغه در حل این مسائل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و نتایج مربوطه شرح داده شده است. از نوآوری‌های این مقاله، ارضای قیود مسائل است که در ابتدا به علت محدود بودن بازه جستجو و ایجاد همسایگی تصادفی در ناحیه‌ای که قیود و محدودیت‌ها را ارضا می‌کند، انجام می‌شود. نکته دیگر استفاده از عامل تطبیقی پویا، در تمامی این الگوریتم‌ها است، به طوری که با تغییر سرعت جستجو و تطبیق آن با شرایط محیطی، منجر به بهینه‌سازی بهتر می‌گردد.

نتایج این الگوریتم‌ها به همراه نتایج سایر محققان در جداول (۱) تا (۵) مقایسه شده‌اند.

واژه نامه

Metaheuristic algorithms	الگوریتم‌های فراابتکاری
Dynamic Adaptive Agent	عامل تطبیقی پویا
Gray Wolf	گرگ خاکستری
Ant Colony	کلونی مورچگان
Firefly	کرم شب تاب
Colonial Competitive	رقابت استعماری و
Algorithm	قورباغه

تقدیر و تشکر

مراجع

- [1] N. B. Guedria, "Improved accelerated PSO algorithm for mechanical engineering optimization problems," *Applied Soft Computing*, vol. 40, pp. 455–467, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.048>.
- [2] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, vol. 4, 1995, pp. 1942-1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [3] J. H. Holland, "Outline for a logical theory of adaptive systems," *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 9, no. 3, pp. 297-314, 1962. <https://doi.org/10.1145/321127.321128>.
- [4] J. D. Bagley, "The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms," Ann Arbor, MI: Dissertation Abstracts International, University of Michigan, 1967.
- [5] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- [6] Y. Li, W. Sun and S. Guan, "A firefly inspired controller placement algorithm in software defined network," In *2019 IEEE 2nd international conference on computer and communication engineering technology (CCET)*, 2019. pp. 254-

258. <https://doi.org/10.1109/CCET48361.2019.8989320>.
- [7] M. Dorigo, M. Birattari and T. Stutzle, "Ant colony optimization artificial ants as a computational intelligence technique," *IEEE Comput Intell M*, vol. 1, no. 4, pp. 28–39, 2006. <https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691>.
- [8] D. Karaboga and B. Basturk, "Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization," *Foundations of fuzzy logic and soft computing, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4529, 2007, pp. 789–798. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72950-1_77.
- [9] M. A. Ahandani, R. Banimahd and N. P. Shrijposht, "Solving the parameter identification problem using shuffled frog leaping with opposition-based initialization," In 2011 1st International eConference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), 2011, pp. 49-53. <https://doi.org/10.1109/ICCKE.2011.6413323>.
- [10] B. Xing, W. J. Gao, "Imperialist competitive algorithm," in *Innovative computational intelligence: A rough guide to 134 clever algorithms*, pp. 203-209 . 2014.
- [11] A. Kalananda, V. K.Reddy, and V. L. Narayana Komanapalli, "A competitive learning-based Grey wolf Optimizer for engineering problems and its application to multi-layer perceptron training," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, pp. 1-59, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15146-x>.
- [12] W. T. Lunardi, H. Voos and L. H. Cherri, "An effective hybrid imperialist competitive algorithm and tabu search for an extended flexible job shop scheduling problem," In *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, 2019, pp. 204-211. <https://doi.org/10.1145/3297280.3297302>.
- [13] R. Rajabioun, E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, "Colonial competitive algorithm as a tool for Nash equilibrium point achievement," In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2008: International Conference*, 2008, pp. 680-695. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69848-7_55.
- [14] M. Eusuff, K. Lansey and F. Pasha, "Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization," *Engineering optimization*, vol. 38, no. 2, pp. 129-154, 2006. <https://doi.org/10.1080/03052150500384759>.
- [15] B. B. Maarooft, T. A. Rashid, J. M. Abdulla, B. A. Hassan, A. Alsadoon, M. Mohammadi, M. Khishe and S. Mirjalili, "Current studies and applications of shuffled frog leaping algorithm: a review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 3459-3474, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09707-2>.
- [16] M. Eusuff, K. Lansey, and F. Pasha, "Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization," *Engineering optimization*, vol. 38, no. 2, pp. 129-154, 2006. <https://doi.org/10.1080/03052150500384759>.
- [17] X. Yang, X. He, "Firefly algorithm: recent advances and applications," *International journal of swarm intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 36-50, 2013. <https://doi.org/10.1504/IJSI.2013.055801>.
- [18] N. F. Johari, et al. and A. Udin, "Firefly algorithm for optimization problem," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 421, pp. 512-517, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.421.512>.
- [19] X. Yang, "Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation," *International journal of bio-inspired computation*, vol. 2, no. 2, pp. 78-84, 2010. <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2010.032124>.

- [20] S. Farahani, A. A. Abshouri, B. Nasiri, and M. R. Meybodi, "A Gaussian firefly algorithm," *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 1, no. 5, p. 448, 2011.
- [21] V. Kumar, D. Kumar, "A systematic review on firefly algorithm: past, present, and future," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, pp. 3269-3291, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09498-y>.
- [22] X. Yang, "Firefly algorithms for multimodal optimization," *International symposium on stochastic algorithms*, Springer, 2009, pp. 169-178. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14.
- [23] M. H. Alizadeh, A. Toloei, "Designing Pitch Angle Compensator for an UAV and Robustification it with Bee Colony Optimization Algorithm," *Technology in Aerospace Engineering*, pp. 1-13, 2023. <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.1.1>.
- [24] B. Attaran, M. Zarchi and A. R. Toloei, "Numerical survey of vibrational model for third aircraft based on HR suspension system actuator using two bee algorithm objective functions," *International Journal of Engineering*, vol. 30, no. 6, pp. 887-894, 2017.
- [25] A. R. Toloei, M. Zarchi and B. Attaran, "Application of active suspension system to reduce aircraft vibration using pid technique and bees algorithm," *International Journal of Computer Applications*, vol. 98, no. 6, 2014. 10.5120/17187-7368.
- [26] A. R. Toloei, M. Zarchi and B. Attaran, "Vibration control of aircraft semi-active suspension system using PID-bees technique," *International Journal of Computer Applications*, vol. 99, no. 10, 2014. <https://doi.org/10.5120/17408-7980>.
- [27] M. Ameri and E. Behrouzian Nejad, "Presenting a clustering method based on colonial competition algorithm to increase network lifetime in wireless sensor networks," *In 2nd international conference on Research in Engineering, Science and Technology*, 2005. (InPersian)
- [28] Z. Ghafari Moghadam, M. Hashemi Tabar, and E. Moradi, "Water Demand Management Using Dynamic Firefly Optimization Algorithm: A Case Study of Hirmand River," *Scientific Quarterly Journal of Water Resources Engineering*, vol. 13, no. 46, pp. 85-98, 2020. (InPersian)
- [29] H. Zhu, Y. Hu and W. Zhu, "A dynamic adaptive particle swarm optimization and genetic algorithm for different constrained engineering design optimization problems," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 3, 2019. <https://doi.org/10.1177/1687814018824930>.
- [30] C. I. Okonta, et al. and E. D. Okelue, "A heuristic based ant colony optimization algorithm for energy efficient smart homes," *In Proc. 5th International Conference Exhib. Clean Energy*, pp. 1-12, 2016.



Numerical Simulation of Heat Pipe-PEM Fuel Cell Coupling and Investigating the Effect of Geometrical Parameters on the Thermal Performance of Fuel Cell

Research Article

Ebrahim Afshari¹ , Mehdi Mortazavi², Elnaz Zohravi³

 [10.22067/jacsm.2024.88572.1272](https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.88572.1272)

Abstract

Heat management in the polymer membrane fuel cell is very necessary in order to achieve the maximum suitable temperature and temperature distribution inside the cell. The heat pipe, with its unique features and no power consumption, is a very suitable option for cooling and heat management of the fuel cell. In this article, in the first step, by presenting the governing equations of the heat pipe, the simulation of the heat pipe is dealt with separately. In the second step, the heat pipe(s) are installed inside the fuel cell and the modeling of the heat pipe-fuel cell coupling and the effect of the installation position and the number of heat pipes inside the fuel cell for its cooling are discussed. The results show that for the selected fuel cell, 1 heat pipe is not suitable (the maximum temperature of the cell is 396 K) and 2 heat pipes are needed. By installing 2 pipes symmetrically with a distance of 25 mm from the side of the fuel cell and 25 mm from the center, the maximum temperature of the fuel cell becomes 361 Kelvin, which reduces the maximum temperature in the fuel cell compared to other positions of installing the pipes.. This shows that the symmetrical placement of the pipes reduced the maximum temperature and creates a more uniform distribution of the temperature on the fuel cell.

Key Words polymer membrane fuel cell, cooling, temperature distribution, heat pipe.

1. Introduction

Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cells are characterized by their high efficiency; however, a considerable amount of heat is generated during operation, comparable to the electrical power output. To ensure optimal performance, it is crucial to effectively dissipate the heat produced within the cell. Since the membrane must retain adequate moisture to facilitate proton

conduction, operating the cell at temperatures exceeding the optimal range leads to membrane dehydration. This, in turn, increases the cell's ohmic resistance and may result in membrane rupture. Conversely, operating at temperatures below the optimal range diminishes reaction rates and output power, promotes water condensation, and exacerbates concentration losses, thereby impairing cell performance.

Maintaining a uniform temperature distribution within the fuel cell is essential to extend its service life and prevent the formation of localized hot spots. The integration of heat pipes into the fuel cell cooling system offers an effective solution for removing excess heat and mitigating temperature non-uniformities. Additional advantages of heat pipes include their compact structure, absence of moving parts, reliance on thermal phase change mechanisms, and elimination of the need for external power sources for cooling. These features collectively simplify the cooling system design and enhance the overall efficiency of the fuel cell. A heat pipe transfers thermal energy from a hot source to a cold sink through capillary action driven by a wick structure and a working fluid.

Although the application of heat pipes in fuel cell cooling systems has attracted some attention, only a limited number of studies have been conducted. In most cases, the heat pipe is modeled as a conventional pipe with high thermal conductivity, and the thermal performance of the fuel cell is subsequently analyzed. Typically, the temperature distribution along different sections of the heat pipe is first determined. Thereafter, the heat pipe is coupled with the fuel cell to evaluate the temperature distribution within the bipolar plate.

2. Heat pipe technology in fuel cell

In a heat pipe, heat is transferred from a hot source to a cold source using capillary forces generated by a wick or

*Manuscript received June 18, 2024. Revised July 9, 2024, Accepted, October 6, 2024.

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

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

² Associate Professor, Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan.

³ PhD, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan.

porous material in combination with a working fluid. A heat pipe consists of a sealed chamber lined with a wick and filled with a liquid near its saturation temperature. As shown in Fig. 1, the length of the heat pipe is divided into three regions: the evaporator, located near the heat source; the condenser, positioned near the heat sink; and the middle section, referred to as the adiabatic region.

The vapor-liquid interface, typically located near the inner edge of the wick, separates the liquid phase inside the wick from the vapor phase inside the tube. Heat transferred to the evaporator through the chamber is absorbed by the liquid-saturated wick, causing the liquid to evaporate and the vapor to flow toward the evaporator. The capillary force generated at the evaporator interface increases the pressure difference between the vapor and liquid phases. The vapor then flows through the adiabatic section and enters the condenser. In the condenser, the vapor condenses, and similar capillary forces are produced. The heat released during condensation is transferred to the cooling reservoir through the wetted wick material and the chamber wall.

Subsequently, the condensed liquid is returned to the evaporator by the pressure difference generated by the capillary forces between the evaporator and condenser. This cycle continues as long as sufficient capillary pressure exists to drive the return of the liquid.

In polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells, in addition to removing the heat generated during operation, achieving a uniform temperature distribution and minimizing temperature gradients are critical for maintaining performance. Due to the use of a phase-change mechanism, heat pipe technology can be effectively applied for fuel cell cooling. The selection of a suitable type of heat pipe for PEM fuel cell cooling depends on the required heat transfer capacity.

Figure 2 illustrates the integration of a heat pipe within the fuel cell structure. The evaporator section is embedded inside the bipolar plates, while the condenser is positioned outside the cell and cooled by either natural or forced convection.

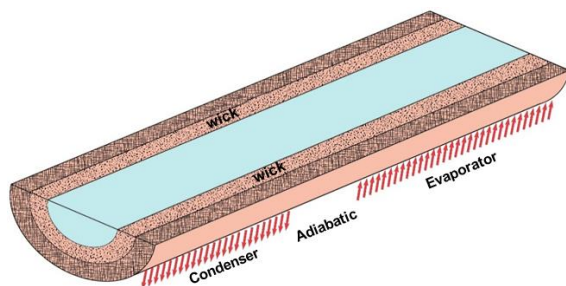


Fig. 1. Schematic of heat pipe

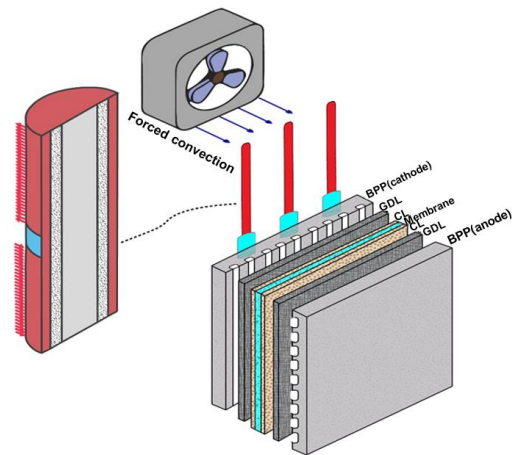


Fig. 2. Schematic of the heat pipe and its location in the polymer membrane fuel cell.

3. Results

The mathematical model of the heat pipe is compared with reference data in Fig. 3. According to the figure, the results of the mathematical model are in very good agreement with the experimental results in such a way that the maximum error is less than 3%. Therefore, the mathematical model provides good estimates of the heat dissipation capacity of the pipe. The heat pipe considered in this study is used in a sintered wick structure fuel cell.

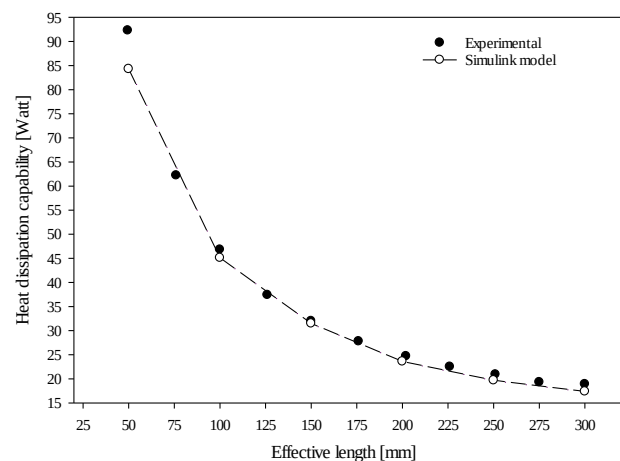


Fig. 3. Comparison of the mathematical model and experimental data: heat dissipation capacity by the heat pipe

The temperature distribution inside this fuel cell plate is shown in Fig. 4 by installing a heat pipe inside its polar plate and applying a 50-W heat flux on a cell surface (the lower surface of the polar plate). The heat pipe is mounted in the middle of the polar plate, leading to that the center of the polar plate to cool down sufficiently. The purpose of this paper is to assess cooling process using a heat pipe and the walls of the cooling plate are insulated; hence, only the effect of the heat pipe is investigated. However, in practice, the outer surface of the cell exchanges heat with the surrounding. Heat exchange due to free or even forced convection causes the edges of the polar plates, which have high temperature according to Fig. 4, to cool down as well. If the heat pipe cools the temperature of the middle part of

the fuel cell sufficiently, part of the heat of the cell can be removed and the side areas of the cell can be cooled. Therefore, the installation location of the heat pipe is appropriate. The applied heat flux is actually obtained from the analysis of the electrochemical performance of the fuel cell. Other surfaces are insulated. As it is observed in the figure, the maximum temperature of the cell is 396 K. The maximum temperature obtained is high, which indicates the inadequacy of using one heat pipe.

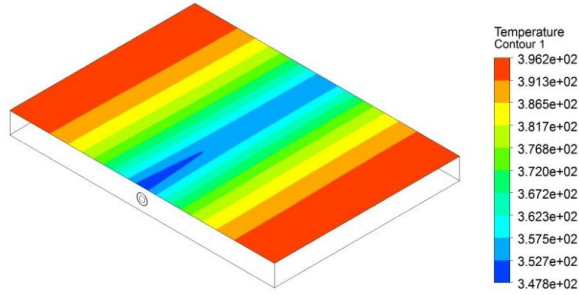


Fig. 4. Temperature distribution through the fuel cell using a single heat pipe.

The temperature distribution is illustrated in Fig. 5 by integrating two heat pipes inside the fuel cell and a heat flux of 50W applied on one the fuel cell surface. The distance between the pipes is 25mm from the sides and 25mm from the center. The maximum temperature of the cell is 361K. The symmetrical placement of the heat pipes reduces the maximum temperature and creates a more uniform distribution of the temperature on the fuel cell.

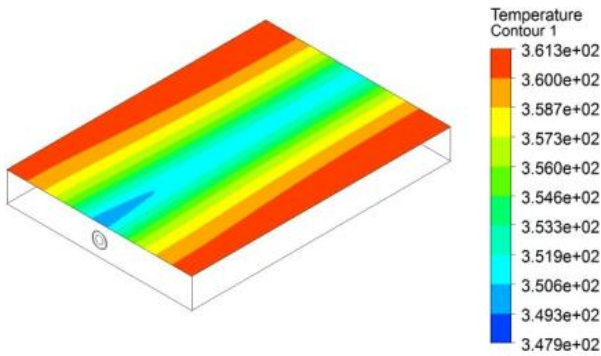


Fig. 5. Temperature distribution through the fuel cell using two heat pipes

4. Conclusions

This paper presents the mathematical simulation of a heat pipe combined with a polymer membrane fuel cell. One or two heat pipes are embedded inside the fuel cell to perform simultaneous numerical modeling of the heat pipe and fuel cell. The main results are as follows:

- 1) Using one heat pipe leads to of the cell maximum temperature becomes 396K; hence, one heat pipe is not suitable and two heat pipes are required. The capacity of the heat pipe is not the only technique for heat removal from the fuel cell thermally.
- 2) When two heat pipes are installed in the fuel cell symmetrically, the maximum temperature of the cell becomes 361K, which is better than the installation of one heat pipe.
- 3) Symmetrical placement of heat pipes mitigates the maximum temperature and creates a more uniform distribution of temperature on the cell. Uniform temperature results in uniform distribution of current density, improving the cell performance.



شبیه‌سازی کوپلینگ لوله حرارتی - پیل سوختی غشا پلیمری و بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد حرارتی پیل سوختی*

مقاله پژوهشی

ابراهیم افشاری^(۱)  مهدی مرتضوی بک^(۲) الناز زهروی^(۳)

doi 10.22067/jacsm.2024.88572.1272

چکیده مدیریت حرارت در پیل سوختی غشا پلیمری به منظور دستیابی به ماکزیمم دمای مناسب و توزیع دما در داخل پیل بسیار ضروری است. لوله حرارتی با ویژگی‌های منحصر به فرد و عدم مصرف توان، گزینه بسیار مناسبی برای خنک‌کاری و مدیریت حرارت پیل سوختی است. در این مقاله در گام اول، با ارائه معادلات حاکم بر لوله حرارتی به شبیه‌سازی ریاضی لوله حرارتی به صورت مجزا پرداخته شده است. در گام دوم لوله(ها) حرارتی در داخل پیل تعبیه شده است و به مدل‌سازی عددی کوپلینگ لوله حرارتی - پیل سوختی به کمک نرم افزار انسیس - فلونت و تأثیر موقعیت تعبیه و تعداد لوله حرارتی در داخل پیل سوختی جهت خنک‌کاری آن پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که برای پیل سوختی انتخاب شده، ۱ عدد لوله حرارتی مناسب نبوده (ماکزیمم دمای پیل ۳۹۶ کلوین) و به ۲ عدد لوله حرارتی نیاز است. با تعبیه ۲ لوله به صورت متقارن با فاصله لوله‌ها از کنار پیل ۲۵ میلی‌متر و از مرکز ۲۵ میلی‌متر، ماکزیمم دمای پیل برابر با ۳۶۱ کلوین می‌شود که نسبت به موقعیت‌های دیگر تعبیه لوله‌ها شاهد کاهش دمای ماکزیمم در پیل سوختی هستیم. این موضوع نشان می‌دهد که جای‌گذاری متقارن لوله‌ها ماکزیمم دما را کاهش می‌دهد و توزیع یکنواخت‌تری از دما روی پیل سوختی ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی پیل سوختی غشا پلیمری، خنک‌کاری، توزیع دما، لوله حرارتی.

مقدمه

پیل در دماهای بالاتر از محدوده دمای کاری باعث خشک شدن غشا و به تبع آن افزایش مقاومت اهمی پیل، انقباض و گسیختگی غشا و در دماهای پایین‌تر از محدوده دمای کاری، باعث کاهش نرخ واکنش‌ها، ولتاژ، بازده، توان خروجی و همچنین باعث مبعان آب و وقوع پدیده غرقاب‌شدگی (Flooding) در سمت کاتد و تشدید افت غلظتی عملکرد پیل می‌شود. توزیع یکنواخت دما در پیل سوختی عمر مفید پیل را افزایش می‌دهد و از تشکیل نقاط داغ موضعی جلوگیری می‌کند. تشکیل گرادین‌های دمایی در نقاط مختلف سطح فعال پیل ممکن است

پیل سوختی غشا پلیمری دارای راندمان بالایی است؛ اما میزان قابل توجهی حرارت در این پیل تولید می‌شود که قابل مقایسه با توان الکتریکی تولیدی در آن است. به منظور دستیابی به عملکرد مناسب پیل سوختی غشا پلیمری، دفع مؤثر گرمای تولید شده در پیل ضروری است [1,2]. مدیریت حرارت در پیل سوختی، دفع گرمای تولید شده در داخل توده پیل و البته به صورت کنترل شده به محیط اطراف است. از آنجا که غشا پلیمری باید دارای رطوبت کافی باشد تا هدایت پروتون را به خوبی صورت دهد؛ عملکرد

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۳/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۱۵ می‌باشد.

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

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

(۲) دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۳) محقق پسا دکتري، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

موجب خشکی غشا در برخی نقاط آن شود و پایداری عملکرد غشا را تضعیف کند. بنابراین هر چه یکنواختی توزیع دما در پیل بالاتر باشد، عمر مفید پیل بالاتر می‌رود و همچنین عملکرد پیل نیز بهبود پیدا می‌کند. در واقع غیر یکنواختی توزیع دما باعث می‌شود نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی در محل‌های مختلف پیل سوختی متفاوت باشد. علاوه بر این‌ها انتقال گرما توسط جریان‌های واکنش دهنده و محصولات تقریباً ناچیز است [2]. بنابراین فرایند انتقال گرما به بیرون پیل باید توسط سیستم خنک‌کاری انجام شود. این عوامل باعث می‌شود که مدیریت گرما در پیل بسیار چالش برانگیز باشد.

استفاده از سیال آب یا هوا و عبور این سیال‌ها از داخل کانال‌های خنک‌کاری تعبیه شده در پیل سوختی، روشی متداول برای خنک‌کاری پیل سوختی غشا پلیمری است. با این حال، این روش خنک‌کاری می‌تواند گرادیان حرارتی بالایی را درون پیل سوختی به‌خصوص در چگالی‌های توان الکتریکی بالا ایجاد کند. یکی از راه‌های افزایش عملکرد پیل، کاهش گرادیان دما در قسمت‌های مختلف آن است که این امر می‌تواند با مدیریت جریان سیال خنک‌کاری تا حدودی بهبود یابد. هر چند طراحی‌ها و آرایش‌های مختلفی برای کانال‌های جریان خنک‌کاری در پیل سوختی غشا پلیمری پیشنهاد شده است؛ اما غیریکنواختی دما داخل پیل هنوز هم از مشخصه‌های تمامی آرایش‌های این کانال‌ها است. خنک‌کاری با آب مستلزم مصرف توان الکتریکی به منظور پمپ کردن آب در مدار خنک‌کاری است. اگر از هوا هم برای خنک‌کاری استفاده گردد؛ دمنده نیاز به توان دارد. از این‌رو هر دو روش خنک‌کاری با آب و هوا باعث افزایش توان مصرفی جانبی سیستم پیل سوختی می‌گردد.

استفاده از لوله حرارتی در سیستم خنک‌کاری پیل سوختی به منظور دفع گرمای پیل و رفع مشکل عدم یکنواختی توزیع دما در داخل پیل است. مزیت لوله حرارتی نسبت به دیگر روش‌های مرسوم این است که می‌تواند مقدار زیادی گرما را با اختلاف دمای کم در فواصل نسبتاً طولانی انتقال دهد، ضمن اینکه مصرف توان نیز در لوله حرارتی صفر است. در کاربردهایی از قبیل سرمایش قطعات داخل ماهواره، از آنجا که منابع تولید توان با فاصله نسبتاً زیاد از بدنه ماهواره (محل دفع گرما) قرار دارند؛ این مزیت لوله‌های حرارتی بسیار مهم است. لوله‌های حرارتی با سیال کاری مایع - فلز می‌توانند هدایت حرارتی هزار یا حتی تا ده‌ها

هزار برابر بالاتر از بهترین رساناهای فلزی داشته باشند [3]. دیگر مزایای لوله حرارتی داشتن ساختار جمع و جور، نداشتن قطعات متحرک اضافی، استفاده از تغییر فاز حرارتی و عدم نیاز به تأمین توان خارجی برای خنک‌کاری است که موجب سادگی طرح سیستم خنک‌کاری و افزایش بازده پیل سوختی می‌شود. لوله حرارتی گرما را از منبع گرم (پیل سوختی) به منبع سرد (محیط) با استفاده از نیروهای موینگی تولید شده توسط فتیله یا ماده متخلخل و یک سیال کاری انتقال می‌یابد. لوله حرارتی شامل یک محفظه پوشیده شده با فتیله است که با مایعی در نزدیکی دمای اشباع آن پر شده است. طول لوله حرارتی به سه منطقه شامل اوپراتور که نزدیک منبع گرما قرار دارد، کندانسور که در نزدیکی چاه گرمایی است و قسمت میانی که آدیاباتیک نام دارد، تقسیم می‌شود. گرمای منتقل شده از پیل سوختی به اوپراتور از طریق محفظه به فتیله پر شده از مایع انتقال می‌یابد و باعث تبخیر مایع شده و بخار به داخل بخش هسته اوپراتور جریان می‌یابد. نیروی موینگی تولید شده توسط فصل مشترک اوپراتور، اختلاف فشار بین بخار و مایع را افزایش می‌دهد. بخار در هسته اوپراتور از طریق منطقه آدیاباتیک جریان می‌یابد و به کندانسور وارد می‌شود. بخار چگالیده می‌شود؛ نیروهای موینگی مشابهی در کندانسور تولید می‌شود؛ اگر چه مقدار آن‌ها نسبت به اوپراتور بسیار کمتر است. گرمای آزاد شده در کندانسور از طریق ماده فتیله مرطوب و محفظه، به مخزن خنک منتقل می‌شود. سپس بخار چگالیده شده توسط اختلاف فشار مایع ناشی از نیروی موینگی بین اوپراتور و کندانسور، به سمت اوپراتور پمپ می‌شود. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که فشار موینگی کافی برای برگرداندن بخار چگالیده شده به اوپراتور وجود داشته باشد. در زمینه خنک‌کاری پیل سوختی غشا پلیمری مطالعات زیادی انجام شده است. ون و هوانگ [4]، یک روش جدید خنک‌کاری پیل سوختی ارائه دادند. در این روش بیشتر گرمای اتلافی توسط هدایت حرارتی از طریق یک ورق گرافیتی پیرولیتیک منتقل می‌شود و سپس گرما از طریق جابه‌جایی طبیعی به هوای محیط منتقل می‌شود. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ورق گرافیتی پیرولیتیک حداکثر دمای پیل را به طور مؤثر کاهش می‌دهد و موجب بهبود عملکرد پیل در استوکیومتری کاتدی بالا می‌شود. یو و همکاران [5]، شش طرح مختلف کانال (یک میدان جریان مارپیچی معمولی، چهار میدان جریان مارپیچی چند مسیره

تک فاز آب به صورت عددی، تأثیر روش‌های خنک‌کاری بر توزیع دما در پیل سوختی غشا پلیمری را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که توزیع دما در روش خنک‌کاری دو فاز دارای یکنواختی بیشتری نسبت به روش خنک‌کاری تک فاز، به ویژه در چگالی جریان‌های بالا، است. امیر فضلی و همکاران [11]، با یک مطالعه پارامتری، تأثیر ابعاد کانال خنک‌کاری و میدان جریان بر مدیریت حرارتی توده پیل سوختی را بررسی کردند. یک مدل عددی - تحلیلی به منظور بررسی پارامترهای هندسی توده پیل از جمله ابعاد کانال میدان جریان خنک‌کاری، اندازه و انواع مختلف منیفولد بر یکنواختی دمای توده پیل ارائه شد. مطالعه تجربی رفتار حرارتی پخش کننده گرمای در حالت دو فازی به عنوان یک سیستم خنک‌کاری برای خنک‌کاری در پیل سوختی توسط رویلر و همکاران [12] انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پخش کننده گرمای در حالت دو فازی در یک سیستم خنک‌کاری کارآمد است و باعث یکنواختی دما در هسته پیل می‌شود. فقری و گوو [13]، کاربرد فناوری لوله حرارتی در سیستم‌های پیل سوختی را تشریح کردند که شامل طرح‌های توده جدید با لوله‌های حرارتی به منظور بهبود انتقال حرارت و همچنین کار روی طراحی و مهندسی سیستم پیل سوختی با به کار بردن مفهوم لوله حرارتی است. با این وجود، آن‌ها در کاربردهایی مانند پیل‌های سوختی به علت شکل نامناسب اواپراتور خود محدودیت داشتند. برای حل این مشکل جونگ و همکاران [14] یک لوله حرارتی حلقوی با اواپراتور دو طرفه تخت نازک را طراحی کردند. نتایج نشان می‌دهند که در محدوده بار حرارتی ۳۰-۱۰ وات، دمای عملیاتی لوله حرارتی حلقوی در محدوده ۸۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس است. طراحی یک سیستم ساخته شده از یک حلقه پمپاژ موئینی (Capillary Pumped Loop) متصل به مجموعه‌ای از لوله‌های حرارتی رسانایی ثابت (Constant Conductance Heat Pipes)، به عنوان جایگزینی برای خنک‌کاری و کنترل حرارتی پیل سوختی توسط سیلوا و همکاران [15] پیشنهاد شد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تمام آزمایش‌ها با سیستم پیشنهادی برای انتقال گرما و حفظ دمای کاری در محدوده مورد نظر برای پیل سوختی موفق بوده است. کلیمنت و وانگ [16]، به بررسی تجربی عملکرد لوله حرارتی نوسانی (Pulsating Heat Pipe) برای کاربرد در خنک‌کاری پیل سوختی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ادغام لوله‌های

و یک میدان جریان حلزونی) را به عنوان میدان‌های جریان خنک‌کننده در صفحات خنک‌کاری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که میدان‌های مارپیچی چند مسیره از لحاظ دمای حداکثر و یکنواختی دما در مقایسه با میدان جریان مارپیچی معمولی عملکرد بهتری دارند. مطالعه عددی عملکرد توده پیل سوختی با خنک‌کاری مایع توسط ساسمیتو و همکاران [6] انجام شد که به بررسی اثر طرح‌های مختلف کانال‌های گاز و خنک‌کننده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که طراحی کانال هیبریدی جدید بهترین عملکرد را به همراه دارد؛ زیرا دارای توان پمپاژ پایین‌تر و مدیریت حرارتی، آب و گاز مناسب‌تری نسبت به کانال‌های معمولی است. بوید و هومان [7]، مدل سه‌بعدی مبدل حرارتی هوا خنک که در آن از فوم فلزی استفاده شده بود را به منظور مدیریت حرارت سیستم‌های پیل سوختی به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که طراحی جدید می‌تواند منجر به توزیع دمای یکنواخت به ویژه در سرعت‌های بالاتر جریان هوا شود. فلای و همکاران [8]، دو روش خنک‌کاری به کمک مایع بدون تغییر فاز و خنک‌کاری با سیالی که تغییر فاز داده و تبخیر می‌شود را در پیل سوختی وسایل نقلیه با توان بالا با هم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در صورت استفاده از یک رادیاتور آلومینیومی، با تغییر روش خنک‌کاری مایع به روش تبخیری، مساحت رادیاتور ۲۷٪ کاهش می‌یابد. برای اینکه نیاز به یک مرطوب‌ساز بزرگ نباشد و بار خنک‌کاری پیل کاهش یابد؛ هوانگ و کیم [9] یک مرطوب‌ساز برای سمت کاتد و یک سیستم خنک‌کاری تبخیری با استفاده از مخلوط‌کن اسپری هوای خارجی طراحی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که روش تزریق مستقیم آب، پیشنهاد شده در این مطالعه، در رطوبت کاتد و خنک‌کاری توده پیل سوختی در چگالی‌های جریان بالا بسیار مؤثر است. به منظور محاسبه جریان سیال و میزان انتقال حرارت در صفحات خنک‌کاری پیل سوختی غشا پلیمری، شبیه‌سازی عددی این صفحات توسط افشاری و همکاران [2] انجام شد. در این مدل از کانال‌های زیگزاگی شکل به عنوان توزیع کننده سیال خنک‌کننده استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که حداکثر دمای سطح، اختلاف دمای سطح، میانگین دمای سطح و شاخص یکنواختی دما در مدل کانال‌های زیگزاگی پایین‌تر از مقادیر مربوطه در کانال‌های مستقیم است. چوی و همکاران [10]، با مقایسه دو روش خنک‌کاری دو فاز و

حرارتی نوسانی در صفحات دو قطبی، نیاز به تجهیزات خنک-کاری کمکی را از بین می‌برد و در نتیجه باعث کاهش تلفات پارازیتی و افزایش تولید انرژی می‌شود. ارو و بازو [17]، به تحلیل عددی و تجربی یک لوله حرارتی تخت نازک به عنوان جایگزینی مطمئن برای خنک‌کاری پیل سوختی غشا پلیمری پرداختند. مشاهده شد که لوله حرارتی قادر به دفع گرما تا ۱۲ وات، با توجه به دمای عملکرد لوله حرارتی است. شیرزادی و همکاران [18]، یک روش جدید برای خنک‌کاری پیل ارائه دادند که در آن بیشترین میزان حرارت توسط لوله‌های حرارتی با سناریوهای مختلف خنک‌کاری در بخش کندانسور، منتقل شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از جابه‌جایی اجباری با آب به عنوان سیال کاری (عامل) در بخش کندانسور لوله حرارتی، به حداقل تعداد لوله‌های حرارتی در مقایسه با سایر سناریوها نیاز است. هیونگ و همکاران [19] پیشنهاد استفاده از لوله حرارتی تخت برای خنک‌کاری پیل سوختی را داده‌اند. آن‌ها یک مجموعه آزمایشگاهی برای بررسی و مقایسه خنک‌کاری با لوله حرارتی با خنک‌کاری مایع ساخته و مورد استفاده قرار دادند. بر اساس مطالعات پیشین، بررسی‌های اندکی در مورد کاربرد لوله حرارتی برای خنک‌کاری پیل سوختی انجام شده و در اکثر کارهای انجام شده، لوله حرارتی صرفاً به عنوان یک لوله معمولی با ضریب هدایت حرارتی بالا در نظر گرفته شده و عملکرد حرارتی پیل سوختی بررسی شده است. در این مقاله در ابتدا با مدل‌سازی لوله حرارتی، توزیع دما در قسمت‌های مختلف آن محاسبه شده است. در ادامه لوله حرارتی با صفحه قطبی پیل سوختی کوپل شده است و این مجموعه مدل‌سازی عددی شده و توزیع دما در داخل صفحه قطبی پیل سوختی به دست آمده است. بررسی جانمایی و محل قرارگیری لوله حرارتی در پیل و تأثیر آن بر ماکزیمم دما و همچنین توزیع دمای پیل سوختی از دیگر نوآوری‌های این کار می‌باشد.

فناوری لوله حرارتی در پیل سوختی

لوله حرارتی یک وسیله انتقال حرارت غیرفعال است که با هدایت حرارتی مؤثر بسیار بالا به عنوان ابررسانای گرما شناخته می‌شود؛ زیرا دارای ظرفیت انتقال حرارتی بسیار بالایی است. در لوله حرارتی، گرما توسط جریان دو فازی منتقل می‌شود. لوله حرارتی برای کاربردهایی نظیر جداسازی منبع گرمایی و چاه گرمایی،

حفظ دمای یکنواخت و ثابت و کنترل دما مورد استفاده قرار می‌گیرد [20]. در لوله حرارتی با استفاده از نیروهای موئینگی ایجاد شده توسط فیتله یا ماده متخلخل و به کمک یک سیال کاری، گرما از یک منبع گرم به منبع سرد انتقال می‌یابد. لوله حرارتی شامل یک محفظه پوشیده شده با فیتله است و با مایعی در نزدیکی دمای اشباع آن پر شده است. مطابق شکل (۱)، طول لوله حرارتی به سه منطقه شامل اواپراتور که نزدیک منبع گرما قرار دارد، کندانسور که در نزدیکی چاه گرمایی است و قسمت میانی که ناحیه آدیاباتیک نام دارد، تقسیم می‌شود. فصل مشترک بخار - مایع معمولاً در نزدیکی لبه داخلی فیتله، مایع داخل فیتله را از بخار درون لوله جدا می‌کند. گرمایی که از طریق محفظه به اواپراتور منتقل می‌شود؛ به فیتله پر شده از مایع انتقال می‌یابد و باعث تبخیر مایع شده و بخار به داخل بخش هسته اواپراتور جریان می‌یابد. نیروی موئینگی که توسط فصل مشترک اواپراتور ایجاد شده است، اختلاف فشار بین بخار و مایع را افزایش می‌دهد. بخار در هسته اواپراتور از طریق منطقه آدیاباتیک جریان می‌یابد و به کندانسور وارد می‌شود. بخار چگالیده می‌شود؛ نیروهای موئینگی مشابهی در کندانسور تولید می‌شود؛ اگر چه مقدار آن‌ها نسبت به اواپراتور بسیار کمتر است. گرمای آزاد شده در کندانسور از طریق ماده فیتله مرطوب و محفظه، به مخزن خنک منتقل می‌شود. سپس بخار تقطیر شده که توسط اختلاف فشار مایع ناشی از نیروی موئینگی بین اواپراتور و کندانسور به وجود آمده است؛ به سمت اواپراتور پمپ می‌شود. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که فشار موئینگی کافی برای برگرداندن بخار چگالیده شده به اواپراتور وجود داشته باشد [21].

با توجه به سادگی طرح و سهولت ساخت و نگهداری، فناوری لوله حرارتی کاربردهای فزاینده‌ای در افزایش عملکرد حرارتی مبدل‌های گرمایی در میکروالکترونیک، ذخیره انرژی در سیستم‌های گرمایشی، تهویه و سیستم‌های تهویه مطبوع، خنک-کاری تجهیزات الکتریکی، خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای و همچنین کاربردهای فضایی دارد. در پیل سوختی غشا پلیمری نیز علاوه بر اینکه گرمای تولیدی در پیل باید دفع شود؛ توزیع یکنواخت دما و کاهش گرادیان دما نیز اهمیت دارد. به دلیل استفاده از فرایند تغییر فاز در لوله حرارتی، استفاده از این فناوری در خنک‌کاری پیل سوختی می‌تواند توسعه یابد. انتخاب نوع مناسب لوله حرارتی برای خنک‌کاری پیل سوختی غشا پلیمری

پیل، لوله حرارتی برای خنک‌کاری در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین تعداد سل در توده پیل سوختی، دانستن ولتاژ توده پیل و ولتاژ سل ضروری است. تعداد سل مورد نیاز از معادله (۱) به دست می‌آید.

$$n_{\text{cell}} = \frac{V_{\text{stack}}}{V_{\text{cell}}} \quad (1)$$

در معادله بالا، V_{cell} ولتاژ سل بر حسب ولت است که از منحنی عملکرد تک سل به دست می‌آید و V_{stack} ولتاژ توده پیل بر حسب ولت است و از معادله (۲) به دست می‌آید.

$$V_{\text{stack}} = \frac{P}{I} = \frac{P}{n_{\text{cell}} I_{\text{cell}} A_{\text{cell}}} \quad (2)$$

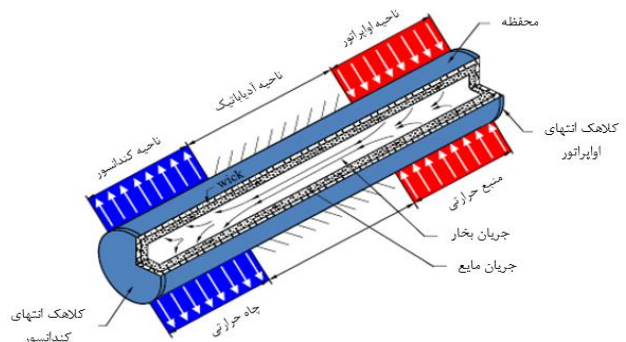
P توان خروجی توده پیل، I_{cell} چگالی جریان الکتریکی هر سل و A_{cell} سطح فعال هر سل است. در منحنی قطبش بر اساس شرایط کاری پیل، ولتاژهای کاری مختلفی وجود دارد. انتخاب شرایط عملکردی وابسته به نوع کاربری است. اگر محدودیت فضا وجود نداشته باشد (کاربردهای ساکن)، می‌توان از ولتاژ بالاتر در منحنی عملکرد به عنوان نقطه کاری استفاده کرد؛ هر چند که در این حالت بازده بالاتر و مصرف واکنشگرها کمتر می‌شود و به تبع آن سطح فعال پیل بیشتر می‌شود. نسبت سطح به توان از معادله (۳) به دست می‌آید.

$$\frac{A_{\text{cell}}}{P} = \frac{1}{n_{\text{cell}} V_{\text{cell}} I_{\text{cell}}} \quad (3)$$

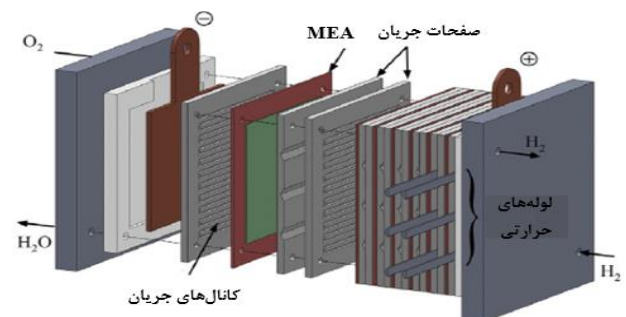
اگر برای افزایش بازده در منحنی قطبش از نقطه کاری با ولتاژ بالاتر استفاده شود؛ با توجه به کاهش توان، نیاز به تعداد بیشتر سل و یا سطح فعال بزرگ‌تری است. اگر از ولتاژ پایین‌تری استفاده شود؛ توان خروجی افزایش می‌یابد و تعداد سل کمتری نیاز است؛ ولی بازده توده پیل کاهش می‌یابد. ابتدا سطح فعال سل و تعداد سل مورد نیاز باید تعیین شود. توان خروجی مورد نیاز، دامنه ولتاژ خروجی، بازده، محدودیت‌های وزن و حجم و همچنین منحنی قطبش سل از ورودی‌های طراحی توده پیل سوختی است. منحنی قطبش تک سل پیل سوختی، شرایط ورودی برای تعیین ابعاد سل پیل سوختی است؛ اما عملکرد پیل به شرایط کاری وابسته است که این شرایط به ورودی‌های طراحی و قیدهای کاربری مد نظر وابسته است. هر توده پیل سوختی از چندین سل تشکیل شده است. بر اساس منحنی قطبش استخراج شده از مرجع [23] که از تحلیل عددی نهایی پیل

بستگی به میزان انتقال حرارت دارد. علاوه بر نوع لوله حرارتی، سیال کاری عامل دیگری است که باید مورد توجه قرار گیرد. از آنجایی که دمای عملیاتی لوله‌های حرارتی بستگی به نوع سیال کاری و دمای جوش آن‌ها دارد؛ انتخاب مناسب سیال کاری برای هر نوع پیل سوختی بسیار مهم است. در پیل‌های سوختی غشا پلیمری که در مقایسه با پیل سوختی اکسید جامد دمای کاری خیلی پایین‌تری دارند، سیالات کاری مرسوم آب، اتانول یا متانول می‌باشند [22].

در شکل (۲) کاربرد لوله حرارتی در پیل سوختی نشان داده شده است. بخش اواپراتور این لوله‌های حرارتی در داخل صفحات دو قطبی تعبیه شده و بخش کندانسور آن در بیرون از پیل بوده و به کمک جابه‌جایی طبیعی یا اجباری خنک می‌شود.



شکل ۱ شماتیک یک لوله حرارتی معمولی، اصول عملکرد و گردش سیال کاری



شکل ۲ کاربرد لوله‌های حرارتی در خنک‌کاری توده پیل سوختی غشا پلیمری

مدل‌سازی ریاضی

طراحی توده پیل سوختی

توان الکتریکی ۲/۵ کیلووات به عنوان توان خروجی از یک توده پیل سوختی غشا پلیمری هدف‌گذاری می‌شود. برای این توده

کشیدگی، جوشش، راه‌اندازی یخ زده، بخار پیوسته، فشار بخار و اثرات کندانسور است. محدودیت انتقال حرارت بسته به اندازه و شکل لوله، سیال کاری، ساختار فتيله و دما می‌تواند هر یک از محدودیت‌های بالا باشد. کمترین حد در بین این محدودیت‌ها، محدودیت انتقال گرمای حداکثر لوله حرارتی در یک دمای معین را مشخص می‌کند [21].

حد مویینگی

اختلاف فشار مویینگی در فصل مشترک مایع - بخار، عملکرد لوله حرارتی را کنترل می‌کند [3]. این حد معمولاً حد مویینگی نامیده می‌شود. حد مویینگی شایع‌ترین حد در عملیات لوله‌های حرارتی دما پایین است [21]. حد مویینگی هنگامی رخ می‌دهد که فشار مویینگی برای پمپاژ مایع به اواپراتور کافی نباشد که موجب خشک شدن فتيله انتهای اواپراتور می‌شود. ساختار فیزیکی فتيله یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر برای این حد است. هنگامی که حد مویینگی رخ می‌دهد؛ هر گونه افزایش گرمای ورودی ممکن است موجب آسیب به لوله حرارتی شود [3]. هنگامی که لوله حرارتی در حالت دائم عمل می‌کند؛ یک جریان پیوسته بخار از اواپراتور به کندانسور و یک جریان پیوسته مایع از کندانسور به اواپراتور، از طریق فتيله وجود دارد. این جریان‌ها به دلیل گرادیان فشار بخار (Δp_v) و گرادیان فشار مایع (Δp_l) در امتداد لوله حرارتی است. فشار مویینگی ناشی از انحنای در فصل مشترک مایع - بخار ایجاد می‌شود. این فشار مویینگی (Δp_{capmax}) برای بازگشت جریان مایع به اواپراتور لازم است. همچنین، گرادیان‌های فشار ناشی از تغییر فاز در انتهای اواپراتور (Δp_{ephase}) و کندانسور (Δp_{cphase}) و گرادیان‌های فشار ناشی از گرانش (Δp_g) نیز وجود دارد. حد مویینگی به صورت زیر بیان می‌شود [3].

$$\Delta p_{capmax} \geq \Delta p_l + \Delta p_v + \Delta p_{ephase} + \Delta p_{cphase} + \Delta p_g \quad (6)$$

فرم دیگری از معادله (۶) می‌تواند بر اساس زاویه شیب عملیاتی لوله حرارتی تعریف شود [3].

$$\Delta p_{capmax} \geq \Delta p_l + \Delta p_v \pm \Delta p_g \quad (7)$$

در رابطه بالا، Δp_l افت فشار مورد نیاز برای بازگشت مایع از کندانسور به اواپراتور، Δp_v افت فشار لازم برای جریان دادن بخار

سوختی به دست آمده است؛ در ولتاژ ۰/۶ ولت، چگالی جریان معادل ۰/۸۹ آمپر بر سانتی‌متر مربع است. چنانچه سطح فعال پیل ۱۰۰ سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شود؛ نیاز به ۴۷ سل برای تأمین توان ۲/۵ کیلووات است.

محاسبه میزان گرمای تولیدی پیل سوختی

در حین کار پیل سوختی، گرما تولید می‌شود. چون راندمان پیل سوختی کمی کمتر از ۵۰ درصد است؛ کمی بیشتر از توان الکتریکی تولیدی پیل سوختی، گرما داخل پیل تولید می‌شود. گرمای تولید شده در پیل سوختی بر اساس فاز بخار محاسبه می‌شود. خروجی انرژی پیل سوختی به سه شکل الکتریسیته، گرمای محسوس و نامحسوس است. برای یک توده پیل سوختی با n_{cell} سل و جریان الکتریکی I ، ولتاژ بازگشت‌پذیر V_{rev} (برابر با ۱/۲۵ ولت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس) گرمای تولید شده از معادله (۴) به دست می‌آید.

$$\dot{Q} = n_{cell} I (V_{rev} - V_{cell}) \quad (4)$$

و به صورت تابعی از توان تولیدی به صورت معادله (۵) است.

$$\dot{Q} = W_{ele} \left(\frac{V_{rev}}{V_{cell}} - 1 \right) \quad (5)$$

در ولتاژ ۰/۶ ولت و با توجه به منحنی عملکرد پیل سوختی، چگالی جریان معادل ۰/۸۹ آمپر بر سانتی‌متر مربع است؛ گرمای تولیدی توسط هر سل پیل سوختی به میزان ۵۷ وات تعیین می‌شود. با توجه به محدودیت‌های حجم و وزن، برای هر دو سل که در کنار هم قرار گرفته است؛ یک دسته لوله حرارتی در نظر گرفته می‌شود. در این جا زاویه بین جهت جاذبه و برگشت مایع به قسمت اواپراتور در جهت مخالف در نظر گرفته می‌شود.

ماکزیمم گرمای قابل انتقال توسط لوله حرارتی

همانند سایر سیستم‌ها، عملکرد لوله حرارتی توسط پارامترهای مختلفی محدود می‌شود. به عبارت دیگر، نرخ انتقال حرارت از طریق لوله حرارتی در معرض بعضی محدودیت‌های عملیاتی است. پدیده‌های فیزیکی که ممکن است انتقال گرما در لوله حرارتی را محدود کند، ناشی از اثرات مویینگی، صوتی،

$$K = \frac{2\varepsilon r_h^2}{f_l Re_l} \quad (۱۳)$$

در رابطه بالا، ε ضریب تخلخل فتیه، r_h شعاع هیدرولیک، f_l ضریب اصطکاک و Re_l عدد رینولدز برای جریان آرام داخل کانال است [24]. افت فشار در فاز بخار (Δp_v)، شامل افت فشار در ناحیه آدیاباتیک (Δp_{va})، اوپراتور (Δp_{ve}) و کندانسور (Δp_{vc}) است.

$$\Delta p_v = \Delta p_{va} + \Delta p_{ve} + \Delta p_{vc} \quad (۱۴)$$

به منظور محاسبه افت فشار در بخش آدیاباتیک، فرض می‌شود که جریان بخار در این ناحیه، جریان پویزلی آرام در لوله دایره‌ای است. افت فشار Δp_{va} به صورت زیر بیان می‌شود [24].

$$\Delta p_{va} = \frac{8\mu_v \dot{m} l_a}{\pi \rho_v r_v^4} \quad (۱۵)$$

در رابطه بالا، r_v شعاع هسته بخار است. با فرض یک بعدی بودن جریان، افت فشار در اوپراتور و کندانسور را می‌توان محاسبه کرد [24].

$$\Delta p_{ve} = \frac{\dot{m}^2}{8\rho_v r_v^4} \quad (۱۶)$$

$$\Delta p_{vc} = \frac{-\dot{m}^2}{2\pi^2 \rho_v r_v^4} \quad (۱۷)$$

پس از جای‌گذاری معادلات و ساده‌سازی داریم:

$$\Delta p_v = \frac{8\mu_v \dot{m} l_a}{\pi \rho_v r_v^4} + 0.074 \frac{\dot{m}^2}{\rho_v r_v^4} \quad (۱۸)$$

به کمک یک پروفیل سرعت پویزلی اصلاح شده و قرار دادن در معادلات ناویر - استوکس، Δp_v به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Delta p_v = \frac{8\mu_v \dot{m} l_{eff}}{\pi \rho_v r_v^4} \quad (۱۹)$$

که l_{eff} در معادله (۱۱) تعریف شده است. هد هیدرواستاتیکی Δp_g به صورت زیر است.

$$\Delta p_g = \rho_l g L \sin \varphi \quad (۲۰)$$

که φ زاویه شیب لوله حرارتی و L طول کل لوله حرارتی است. با جای‌گذاری معادلات مقدار جریان بازگردشی $\dot{m}$ به صورت زیر به دست می‌آید [24].

$$\dot{m} = \frac{\Delta p_l \sin \varphi_{capmax}}{l_{eff} \left[\frac{\mu_l}{\rho_l K A_w} + \frac{8\mu_v}{\pi \rho_v r_v^4} \right]} \quad (۲۱)$$

دو ترم Δp_{cphase} و Δp_{ephase} به ترتیب افت‌های فشار به

از اوپراتور به کندانسور است و Δp_g هد گرانشی است که تابعی از زاویه شیب لوله حرارتی است. اگر اوپراتور بالاتر از کندانسور قرار داشته باشد، Δp_g نشان دهنده افت فشار است (علامت مثبت در معادله) و جهت معکوس باعث افزایش فشار می‌شود (علامت منفی در معادله) [3]. اختلاف فشار در فصل مشترک مایع و بخار بر اساس معادله (۸) بیان می‌شود [24].

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (۸)$$

σ کشش سطحی، θ زاویه تماس و r شعاع انحنا است. شعاع انحنا در بخش کندانسور خیلی بزرگ است؛ در حالی که تبخیر موجب کاهش شعاع انحنا در اوپراتور می‌شود. نیروی موینگی به دلیل اختلاف بین شعاع‌های انحنا در کندانسور و اوپراتور ایجاد می‌شود. نیروی محرکه موینگی به صورت زیر بیان می‌شود [24].

$$\Delta p \left(\frac{\cos \theta_e}{r_e} - \frac{\cos \theta_c}{r_c} \right)_{capmax} \quad (۹)$$

زیرنویس‌های e و c مربوط به اوپراتور و کندانسور است. معمولاً r_c نسبت به r_e بزرگ‌تر است و در نتیجه داریم:

$$\Delta p \frac{2\sigma \cos \theta}{r_e} \quad (۱۰)$$

افت فشار در فاز مایع (Δp_l)، عمدتاً به ساختار فتیه و خواص مایع بستگی دارد. در محاسبات مهندسی، فاز مایع به عنوان جریان مایع در محیط متخلخل مدل می‌شود. از آنجایی که جریان جرمی در اوپراتور و کندانسور ثابت نیست؛ یک طول مؤثر (l_{eff}) برای محیط متخلخل تعریف می‌شود. طول مؤثر که از طریق آن جریان جرمی ثابت است، به صورت تقریبی بر اساس رابطه زیر بیان می‌شود [24].

$$l_{eff} = l_a + (l_e + l_c)/2 \quad (۱۱)$$

l_a طول بخش آدیاباتیک است که بین بخش‌های اوپراتور و کندانسور قرار دارد. l_e و l_c طول‌های اوپراتور و کندانسور می‌باشند. قانون دارسی برای ارتباط افت فشار فاز مایع به خواص فتیه و مایع استفاده می‌شود [24].

$$\Delta p_l = \frac{\mu_l l_{eff} \dot{m}}{\rho_l K A_w} \quad (۱۲)$$

در رابطه بالا، μ_l و ρ_l لزجت و چگالی مایع، $\dot{m}$ نرخ جریان مایع، A_w مساحت سطح مقطع فتیه و K نفوذپذیری فتیه است [24].

انتخاب لوله حرارتی

لازم است که به انتخاب لوله حرارتی مناسب برای خنک‌کاری پیل سوختی پرداخته شود. به دلیل اینکه ضخامت صفحه دوقطبی پیل سوختی خیلی نازک است؛ بنابراین از لوله حرارتی تجاری شده با حداقل قطر استفاده شده است. همچنین با بررسی مطالعات پیشین مشخص شده است که لوله حرارتی با قطر ۶ میلی‌متر جهت بارگذاری در پیل مناسب است که این قطر پس از پرس شدن لوله تا ۲ میلی‌متر قابل کاهش است [25]. لوله حرارتی با سطح مقطع دایره‌ای پس از پرس شدن به شکل بیضی در خواهد آمد.

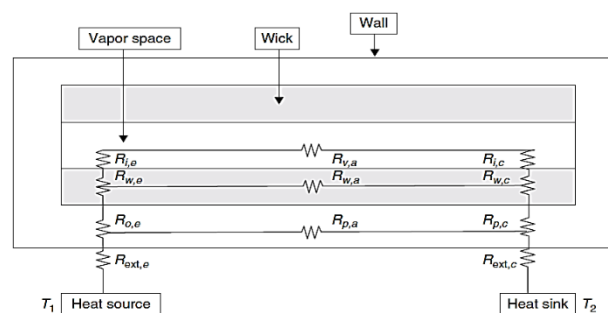
مدل‌سازی کوپلینگ لوله حرارتی با پیل سوختی

مشخصات لوله حرارتی با توجه به ابعاد پیل سوختی برای تعبیه در آن در نظر گرفته شده است. طول اواپراتور، بخش آدیاباتیک و کندانسور به ترتیب ۷۰، ۴۵ و ۸۵ میلی‌متر است. شعاع خارجی و داخلی لوله حرارتی نیز ۲ و ۱ میلی‌متر و ضخامت فتیل ۰/۸ میلی‌متر است. در مورد پیل سوختی نیز، ضخامت، عرض و طول صفحات قطبی، به ترتیب، ۸، ۱۰۰ و ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۴)؛ لوله‌های حرارتی به صورت عمودی در صفحات دو قطبی پیل سوختی قرار گرفته‌اند. مدل‌سازی همزمان الکتروشیمیایی - حرارتی پیل سوختی غشا پلیمری بسیار پیچیده است؛ به خصوص اگر لوله حرارتی نیز به عنوان خنک‌کن مورد استفاده قرار گیرد. از این رو در این مقاله بخش الکتروشیمیایی پیل سوختی بررسی نمی‌شود و صرفاً صفحات قطبی و لوله (ها) حرارتی تعبیه شده در آن مدل‌سازی می‌شود. گرمای تولیدی در پیل سوختی به عنوان شرط مرزی به مدل وارد می‌شود. بخش اواپراتور لوله حرارتی در صفحات دو قطبی پیل سوختی تعبیه شده است تا گرمای تولیدی پیل را گرفته و از طریق کندانسور به محیط اطراف منتقل کند. طول قسمت آدیاباتیک به دلیل فاصله در مسیر انتقال حرارت است و هر چه کوچک‌تر باشد مقاومت لوله حرارتی کاهش خواهد یافت. در این شبیه‌سازی این طول کوچک در نظر گرفته شده است.

علت تبخیر و میعان در فصل مشترک مایع - بخار هستند و معمولاً می‌توان آن‌ها را نادیده گرفت. به منظور عملکرد مناسب یک لوله حرارتی، فشار مویینگی باید بیشتر یا برابر مجموع افت‌های فشار ناشی از نیروهای اینرسی، لزجت، هیدرواستاتیک و همچنین تغییر فاز باشد. در غیر این صورت سیال کاری نیروی لازم برای غلبه بر تمامی افت فشارها را نداشته و به اواپراتور تحویل داده نمی‌شود و در نتیجه موجب خشک شدن اواپراتور می‌شود [3].

مقاومت حرارتی

رسانایی گرمایی مؤثر در یک لوله بستگی به ساخت و ساز و مواد فتیله داخل لوله حرارتی دارد. برای درک بهتر این موضوع، شکل (۳) را در نظر بگیرید که تمام مقاومت‌ها را از منبع گرم سمت اواپراتور تا سمت سرد که کندانسور است، نشان می‌دهد.



شکل ۳ مقاومت معادل در یک لوله حرارتی [3]

در شکل (۳)، R_{ext} مقاومت در برابر تماس بین منبع گرم و لوله گرمایی، R_{pe} ، R_{pc} مقاومت‌ها در برابر هدایت دیواره لوله گرمایی در جهت شعاعی، R_{we} ، R_{wc} مقاومت‌ها در برابر ساختار مایع فتیله در جهت شعاعی، $R_{p,a}$ مقاومت‌های هدایت دیواره لوله گرما در جهت محوری، $R_{w,a}$ مقاومت ساختار مایع فتیله در جهت محوری، R_{ic} ، R_{ie} مقاومت‌های رابط بخار مایع و R_{va} مقاومت فاز بخار است. مقاومت کل لوله حرارتی ترکیبی است از مقاومت‌های سری و موازی و قابل محاسبه با معادله (۲۲) است.

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{pe} + R_{we} + R_{wc} + R_{pc} + \frac{1}{\frac{1}{R_{va}} + \frac{1}{R_{pa}} + \frac{1}{R_{wa}}}} \quad (22)$$

جدول ۱ خواص محفظه، ساختار فتيله، سیال کاری و شرایط عملیاتی [25]

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
چگالی	ρ_s	kg.m^{-3}	۸۹۷۸
گرمای ویژه	C_{ps}	$\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	۳۸۱
هدایت حرارتی دیواره	k_s	$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$	۳۸۷/۶
ضریب تخلخل فتيله	ε	-	۰/۵۲
نفوذپذیری فتيله	K	m^{-2}	$1/74 \times 10^{-12}$
چگالی مایع	ρ_l	kg.m^{-3}	۹۹۴
گرمای ویژه مایع	C_{pl}	$\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	۴۱۸۲
هدایت حرارتی مایع	k_l	$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$	۰/۶
لزجت دینامیکی مایع	μ_l	$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$	۰/۰۰۱۰۰۳
چگالی بخار	ρ_v	kg.m^{-3}	۰/۵۵۴۲
هدایت حرارتی بخار	k_v	$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$	۰/۰۲۶۱
لزجت دینامیکی بخار	μ_v	$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$	$1/34 \times 10^{-5}$
فشار اشباع	P_{sat}	Pa	۳۸۳۵۵
دمای اشباع	T_{sat}	K	۳۴۸
گرمای نهان	h_{fg}	$\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	2389×10^3

مفروضات مدل سازی

دامنه محاسباتی لوله گرمایی به سه ناحیه بخار، محیط متخلخل و دیواره جامد تقسیم می شود. سیال کاری آب و جنس دیواره و فتيله از مس می باشد. مدلی که برای تحلیل لوله گرمایی در نظر گرفته شد به صورت تک فازی است. بدین صورت که بخش بخار و مایع به صورت جداگانه و تک فازی حل می شوند. در ابتدا معادلات مومنتوم و پیوستگی بخش بخار با شرایط مرزی دبی جرمی ورودی و خروجی مطابق معادله (۲۳) حل می شوند.

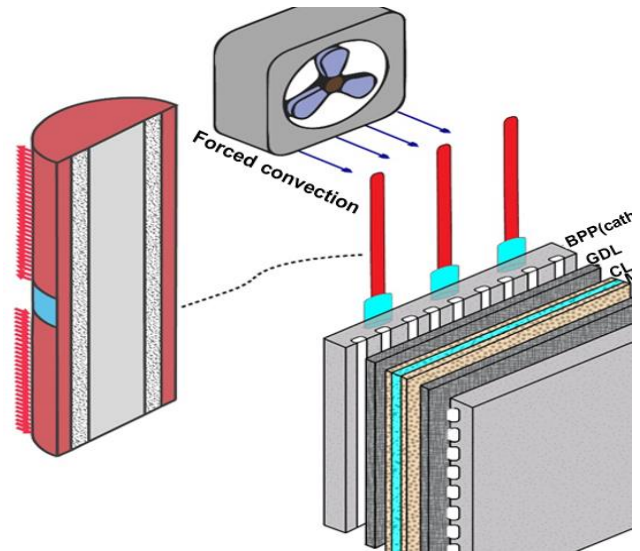
$$\dot{m} h_{\text{fg}} = \dot{q} \quad (23)$$

در این رابطه $\dot{m}$ شار جرمی سطح تماس مایع - بخار و $\dot{q}$ نرخ شار حرارتی می باشد. به دلیل برقراری تعادل جرم علامت $\dot{m}$ در بخش کندانسور منفی و در بخش گرم کننده مثبت می باشد. معادله پیوستگی برای بخش بخار و بخش مایع به ترتیب به صورت معادلات (۲۴ - الف) و (۲۴ - ب) هستند.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}_v) = \pm \dot{m} \quad (24 - \text{الف})$$

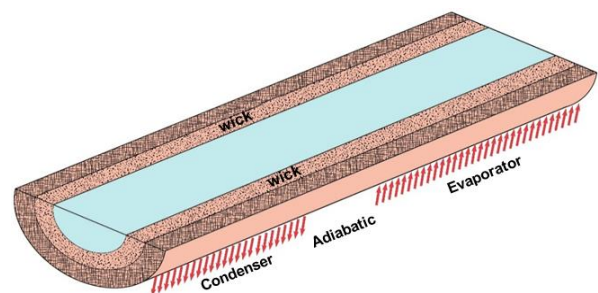
$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}_l) = \pm \dot{m} \quad (24 - \text{ب})$$

در روابط بالا، اندیس های v و l مربوط به بخار و مایع است. معادله مومنتوم برای بخش بخار و بخش مایع به ترتیب به



شکل ۴ صفحات قطبی پیل سوختی غشا پلیمری همراه با لوله های حرارتی

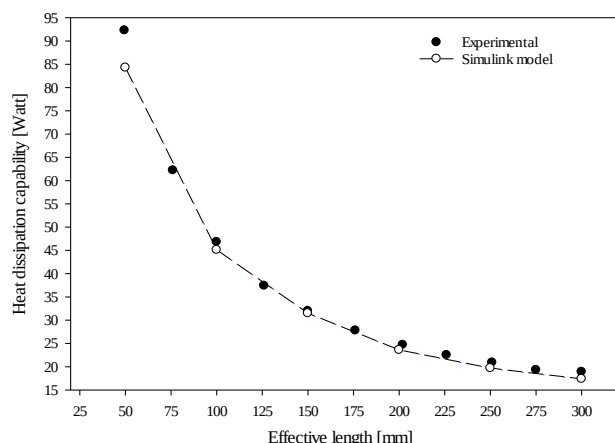
هندسه لوله حرارتی مورد استفاده، در شکل (۵) نشان داده شده است. لوله حرارتی از دو ناحیه سیال و یک ناحیه جامد از جنس مس تشکیل شده است. ناحیه سیال در واقع ناحیه فتيله برای جریان مایع و همچنین ناحیه هسته بخار است. ناحیه جامد نیز مربوط به دیواره خارجی لوله حرارتی است. هر یک از این نواحی به سه بخش اواپراتور، آدیاباتیک و کندانسور تقسیم می شود. مشخصات هندسی مدل در آمده است. لوله حرارتی از مس ساخته شده و ساختار فتيله از نوع پودر فلزی است. آب نیز به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده است. خواص و ویژگی های فتيله و سیال کاری در جدول (۱) آمده است.



شکل ۵ شماتیک لوله حرارتی به همراه شرایط مرزی

جنس گرافیت (چگالی برابر ۲۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب هدایت حرارتی برابر ۲۴ وات بر متر کلون و گرمای ویژه برابر ۶۹۰ ژول بر کیلوگرم کلون) در نظر گرفته شده است. از نرم‌افزار فلوینت برای تحلیل عددی صفحات قطبی پیل سوختی استفاده شده است و معادلات جریان سیال و انتقال حرارت در آنها حل شده است.

الگوریتم سیمپل برای کوپلینگ سرعت و فشار و روش آب ویند مرتبه دو برای حل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در نظر گرفته شده است. فرض شده است حل عددی هنگامی همگرا می‌گردد که هنگام حل معادلات، تغییری در باقی‌مانده‌ها رخ ندهد. ابتدا وابستگی حل عددی به شبکه، به منظور اطمینان از نتایج حل عددی برای صفحات خنک کاری بررسی شده است. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد سلول‌های شبکه، دمای بیشینه سطح به تعداد سلول‌های شبکه بررسی شده است. در شکل (۶) نتایج تست وابستگی به شبکه نشان داده شده است. دمای بیشینه هنگامی که تعداد شبکه محاسباتی از ۷۵۰۰۰۰ می‌شود، وابستگی بسیار کمی به تعداد شبکه دارد و این تعداد شبکه برای حل معادلات استفاده می‌شود.



شکل ۶ نتایج تست وابستگی به تعداد شبکه برای صفحات قطبی

نتایج

مدل تحلیل ریاضی لوله حرارتی با ساختار مش با نتایج ارائه شده در مرجع [66] که نتایج سازنده برای لوله حرارتی است؛ مقایسه شده است و در شکل (۷) ارائه شده است. مطابق شکل، نتایج مدل ریاضی با نتایج آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی دارد و حداکثر خطا کمتر از ۳ درصد است. بنابراین مدل تحلیل ریاضی

صورت معادلات (۲۵ - الف) و (۲۵ - ب) هستند.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}_v \vec{u}_v) = -\nabla P_v + \nabla \cdot (\mu_v \nabla \vec{u}_v) \quad (25 - \text{الف})$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}_l \vec{u}_l) = -\varepsilon \nabla P_l + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \vec{u}_l) \quad (25 - \text{ب})$$

در روابط بالا، ε ضریب تخلخل و اندیس eff مربوط به خاصیت مؤثر در ناحیه متخلخل است که شامل ناحیه جامد متخلخل (فتیله) و مایع قرار گرفته در آن است.

با فرض اینکه دمای بخش مایع تقریباً ثابت است؛ معادله انرژی در بخش بخار به صورت زیر است.

$$\nabla \cdot (\vec{u}_v T) = \nabla \cdot (k_v \nabla T) + S_k \quad (26)$$

در معادله بالا، k ضریب هدایت حرارتی بخار و S_k ترم چشمه مربوط به تولید گرما در فصل مشترک مایع و گاز است. از حل معادلات ناحیه بخار توزیع فشار بخار به دست آمده و فشار در مرز مشترک مایع - بخار استخراج می‌شود و دمای بخار نیز از معادله کلازیوس - کلاپیرون به دست می‌آید. از آنجا که در مرز مشترک تغییر فاز اتفاق می‌افتد، به دلیل برقراری موازنه انرژی یک چاه حرارتی به اندازه $\dot{m}h_{fg}$ در بخش گرم‌کننده و یک چشمه حرارتی به اندازه $\dot{m}h_{fg}$ در قسمت خنک‌کننده اعمال می‌شود. با دانستن دما در مرز مشترک به حل کامل معادلات همراه با معادله انرژی در بخش بخار پرداخته می‌شود و توزیع دما و سرعت در ناحیه بخار به دست می‌آید. با فرض یکنواختی دمای مرز بخار اشباع و مایع اشباع معادلات برای بخش مایع نیز حل می‌شوند. دبی ورودی به بخش خنک فتیله و دبی خروجی از بخش گرم فتیله نیز از معادله (۲۳) به دست می‌آید. در کندانسور از شرط مرزی شار حرارتی ثابت با علامت منفی و مقدار برابر با شار حرارتی گرم‌کننده استفاده شده است.

شرایط مرزی و روش حل عددی

گرمای بخش اواپراتور از یک سطح پیل سوختی اعمال می‌شود و بقیه وجوه پیل عایق در نظر گرفته می‌شوند. در بخش کندانسور شرط مرزی حرارتی برابر با شار حرارتی بخش اواپراتور با علامت منفی و در بخش آدیاباتیک شار حرارتی صفر در نظر گرفته می‌شود. در بخش اواپراتور دبی جرمی خروجی از سمت فتیله به بخار و در بخش کندانسور دبی ورودی از سمت بخار به سمت فتیله در نظر گرفته می‌شود. صفحات قطبی پیل سوختی که لوله‌های حرارتی در آنجا قرار می‌گیرند و شبیه‌سازی شده‌اند؛ از

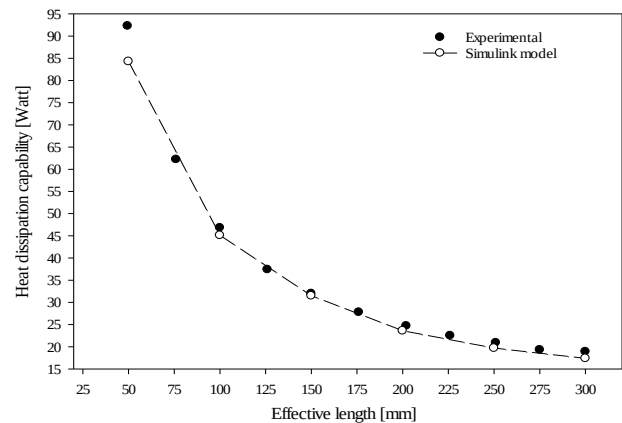
بودن ضریب هدایت حرارتی است. در واقع لوله حرارتی به عنوان یک لوله ساده با ضریب هدایت حرارتی بالا عمل می‌کند.

با تعبیه یک لوله گرمایی در داخل صفحه قطبی پیل سوختی و اعمال شار گرمایی ۵۰ وات روی یک سطح سل (سطح پایینی صفحه قطبی)، توزیع دمای داخل این صفحه پیل سوختی مطابق شکل (۹) است. لوله حرارتی در وسط صفحه قطبی نصب شده است. این امر باعث شده که مرکز صفحه قطبی به اندازه کافی خنک گردد. هر چند که هدف این مقاله بررسی خنک‌کاری با لوله حرارتی بوده و دیواره‌های صفحه خنک‌کاری عایق در نظر گرفته شده که صرفاً تأثیر لوله حرارتی بررسی شود؛ اما در عمل سطح بیرونی پیل با محیط اطراف تبادل حرارت دارد. تبادل حرارت به روش جابه‌جایی آزاد یا حتی اجباری باعث می‌شود لبه‌های صفحات قطبی که مطابق شکل (۹) دارای دمای بالا هستند نیز خنک شوند. اگر لوله حرارتی دمای بخش میانی پیل سوختی را به اندازه کافی خنک کند؛ از طریق انتقال حرارت از طریق بدنه، می‌توان بخشی از گرمای پیل را دفع کرد و نواحی جانبی پیل را خنک کرد. از این رو محل تعبیه لوله حرارتی مناسب می‌باشد. شار گرمایی اعمال شده در واقع از تحلیل عملکرد الکتروشیمیایی پیل سوختی بر اساس معادله (۵) به دست آمده است. سطوح دیگر عایق در نظر گرفته می‌شوند. همان طور که در شکل مشخص است ماکزیمم دمای پیل برابر با ۳۹۶ کلوین است. ماکزیمم دمای به دست آمده بالا بوده که نشان دهنده ناکافی بودن استفاده از ۱ لوله حرارتی می‌باشد.

با ادغام دو لوله گرمایی در داخل سل پیل سوختی و توزیع یکنواخت شار گرمایی ۵۰ وات روی یک سطح پیل سوختی به توزیع دمای شکل (۱۰) دست می‌یابیم. دو لوله به صورت متقارن در داخل صفحه قطبی پیل سوختی قرار می‌گیرند و در نتیجه نصف هندسه حل می‌شود که به صورت متقارن محوری نسبت به مرکز پیل در نظر گرفته می‌شود. در این حالت فاصله لوله‌ها از کنار پیل ۳۰ میلی‌متر و از مرکز ۲۰ میلی‌متر است. همان طور که در شکل مشخص است ماکزیمم دمای پیل برابر با ۳۶۶ کلوین می‌باشد. که نسبت به حالت قبل که یک لوله حرارتی وجود داشت؛ ۳۰ درجه کاهش دمای ماکزیمم در پیل را داریم. باید توجه داشت که در این حالت تمرکز ماکزیمم دما در کناره‌ها بیشتر از مرکز صفحه قطبی پیل می‌باشد.

لوله‌های حرارتی در موقعیت‌های دیگری نیز می‌توانند قرار

تخمین خوبی از ظرفیت دفع حرارت توسط لوله دارد. لوله حرارتی در نظر گرفته شده در این مطالعه برای به‌کارگیری در پیل سوختی ساختار فتیل، سینتر شده در نظر گرفته شده است.



شکل ۷ مقایسه مدل تحلیل ریاضی و آزمایشگاهی [25] در قالب منحنی ظرفیت دفع گرما توسط لوله حرارتی با فتیل مش بر حسب طول مؤثر

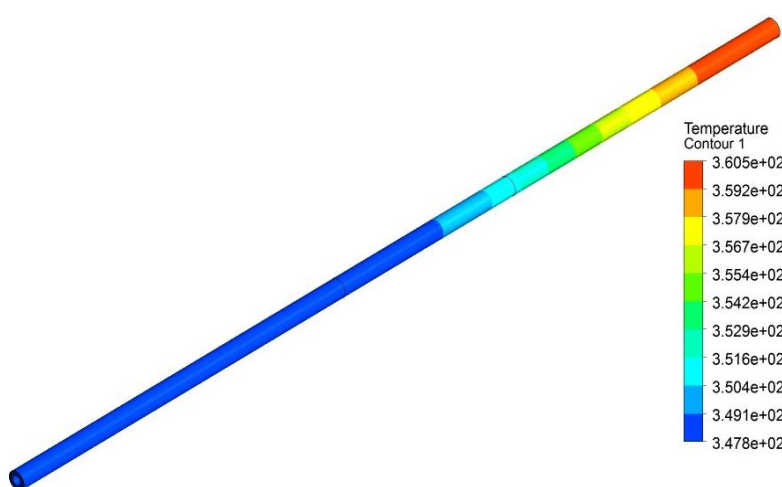
منابع گرمایی در پیل سوختی غشا پلیمری شامل گرمای واکنش، گرمای ناشی از بازگشت‌ناپذیری‌ها، گرمای ناشی از افت اهمی و گرمای ناشی از تغییر فاز آب می‌باشد. بیشترین گرما در لایه کاتالیست کاتد تولید شده و به تبع آن بالاترین دما در این لایه مشاهده می‌شود. دمای کارکرد پیل سوختی از آنجا که با عواملی کلیدی مانند سینتیک واکنش، تداوم کارکرد غشا و مدیریت آب مرتبط است؛ یک پارامتر طراحی مهم محسوب می‌شود.

هدف استفاده از لوله حرارتی در پیل سوختی غشا پلیمری، خنک‌کاری یکنواخت پیل می‌باشد. در این بخش از مدل‌سازی یک مرتبه یک لوله حرارتی و بار دیگر دو لوله حرارتی با موقعیت‌های مختلف در پیل سوختی استفاده شده و عملکرد حرارتی پیل در این دو حالت بررسی می‌شود. البته در ابتدا توزیع دما در خود لوله حرارتی تنها بررسی می‌شود.

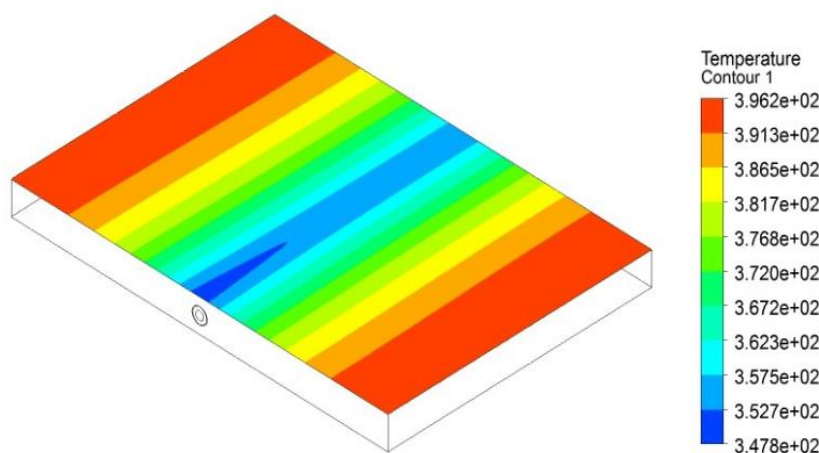
دمای کاری لوله حرارتی ۳۴۸ درجه کلوین در نظر گرفته می‌شود و به این ترتیب توزیع دما از اواپراتور تا کندانسور مطابق شکل (۸) به دست می‌آید. ماکزیمم دما در بخش اواپراتور حدود ۳۶۰/۵ و در بخش کندانسور ۳۴۸ کلوین است که نشان دهنده اختلاف ۱۲ درجه بین این دو بخش خواهد بود. با توجه به تعریف، مقاومت حرارتی لوله حرارتی به صورت $R = \frac{\Delta T}{Q}$ $= 0.24$ خواهد بود. پایین بودن مقاومت حرارتی به معنی بالا

گیرند. در شکل (۱۱) فاصله لوله‌ها از کنار پیل ۲۵ میلی‌متر و از مرکز ۲۵ میلی‌متر است. همان طور که در شکل مشخص است ماکزیمم دمای پیل برابر با ۳۶۶ کلوین می‌باشد که نسبت به حالت قبل که ۲ لوله حرارتی با توزیع متقارن تعبیه شده بود؛ ۵ درجه افزایش دمای ماکزیمم در پیل را شاهد هستیم. شکل نشان می‌دهد که جای‌گذاری متقارن لوله‌ها ماکزیمم دما را کاهش داده و توزیع یکنواخت‌تری از دما روی پیل ایجاد می‌کند. نسبت به حالت اول که فاصله لوله از مرکز ۲۰ میلی‌متر بود ماکزیمم دما عوض نشده؛ ولی مکان ماکزیمم دما به وسط پیل منتقل شده است.

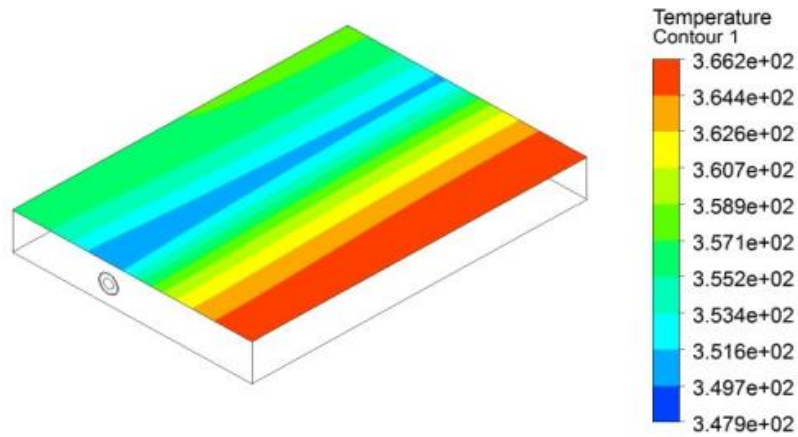
در شکل (۱۲) فاصله لوله‌ها از کنار پیل ۲۰ میلی‌متر و از مرکز



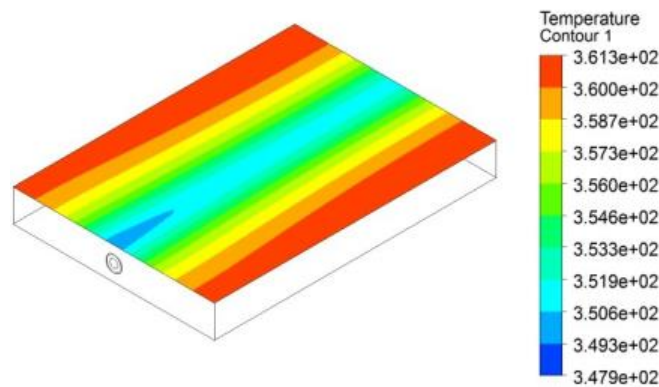
شکل ۸ توزیع دما (بر حسب کلوین) در لوله گرمایی



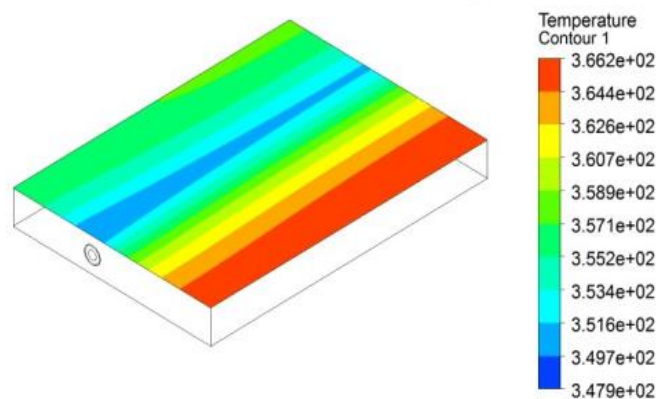
شکل ۹ توزیع دمای (بر حسب کلوین) پیل سوختی با سرمایش به کمک ۱ لوله حرارتی



شکل ۱۰ توزیع دمای (بر حسب کلون) پیل سوختی با سرمایش به کمک ۲ لوله حرارتی به فاصله ۲۰ میلی متری از مرکز پیل



شکل ۱۱ توزیع دمای (بر حسب کلون) پیل سوختی با سرمایش به کمک ۲ لوله حرارتی به فاصله ۲۵ میلی متری از مرکز پیل



شکل ۱۲ توزیع دمای (بر حسب کلون) پیل سوختی با سرمایش به کمک ۲ لوله حرارتی به فاصله ۳۰ میلی متری از مرکز پیل

نتیجه گیری

ادامه لوله یا لوله‌های حرارتی در داخل پیل سوختی تعبیه شده است و به مدل‌سازی عددی همزمان لوله حرارتی - پیل سوختی توسط نرم افزار انسیس - فلوینت و البته به کمک مدل‌سازی لوله

در این مقاله در ابتدا به به شبیه‌سازی ریاضی لوله حرارتی به صورت مجزا از پیل سوختی غشا پلیمری پرداخته شده است. در

۴. به کمک دو لوله حرارتی با مشخصات ذکر شده و جای‌گذاری مناسب توانستیم دفع گرمای تولیدی در پیل سوختی و دمای عملکرد مجاز آن را برآورده کنیم. توزیع گرمای پیل سوختی به صورت یکنواخت بود و از یک طرف پیل اعمال شد.

واژه نامه

Heat pipe	لوله حرارتی
Constant conductance	رسانایی ثابت
Heat management	مدیریت حرارت
Bipolar plates	صفحات قطبی
Heat flux	شار حرارتی
Vapor-liquid interface	فصل مشترک بخار - مایع

تقدیر و تشکر

حرارتی به صورت مجزا پرداخته شده است و تأثیر موقعیت تعبیه و تعداد لوله حرارتی در داخل پیل سوختی جهت خنک‌کاری آن بررسی شده است. نتایج به دست آمده شامل موارد زیر است.

۱. در پیل سوختی انتخاب شده که دارای ماکزیمم دمای ۳۹۶ کلوین است؛ ۱ عدد لوله حرارتی مناسب نیست و به ۲ عدد لوله حرارتی نیاز است. در واقع، از نظر حرارتی ظرفیت لوله حرارتی تنها پاسخگوی دفع گرما از پیل سوختی نیست.
۲. در پیل سوختی انتخاب شده با تعبیه ۲ لوله به صورت متقارن با فاصله لوله‌ها از کنار پیل سوختی ۲۵ میلی‌متر و از مرکز ۲۵ میلی‌متر، بیشینه دمای پیل برابر با ۳۶۱ کلوین می‌شود که نسبت به موقعیت‌های دیگر تعبیه لوله‌ها، شاهد کاهش دمای بیشینه در پیل سوختی هستیم. کاهش ماکزیمم دمای پیل سوختی غشا پلیمری منجر به تبخیر کمتر آب داخل غشا و احتمال کمتر تشکیل نقاط داغ داخل پیل سوختی شده منجر به بهبود عملکرد پیل می‌شود.
۳. جای‌گذاری متقارن لوله‌ها ماکزیمم دما را کاهش داد و توزیع یکنواخت‌تری از دما روی پیل سوختی ایجاد می‌کند. توزیع یکنواخت دما منجر به توزیع یکنواخت دانسیته جریان شده و عملکرد پیل بهبود می‌یابد.

مراجع

- [1] G. Zhang, S. G. Kandlikar, "A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 2412–2429, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.010>.
- [2] E. Afshari, M. Ziaei-Rad, M.M. Dehkordi, "Numerical investigation on a novel zigzag-shaped flow channel design for cooling plates of PEM fuel cells," *Journal of the Energy Institute*, vol. 90, no. 5, pp. 752–763, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.07.002>.
- [3] B. Zohuri, *Heat Pipe Design and Technology*, Springer, Cham, 2011.
- [4] C. Wen, G. Huang, "Application of a thermally conductive pyrolytic graphite sheet to thermal management of a PEM fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 178, no. 1, pp. 132–140, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.12.040>.
- [5] S. H. Yu, S. Sohn, J.H. Nam, C.-J.J. Kim, "Numerical study to examine the performance of multi-pass serpentine flow-fields for cooling plates in polymer electrolyte membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 2, pp. 697–703, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.025>.
- [6] A. P. Sasmito, J. C. Kurnia, A. S. Mujumdar, "Numerical evaluation of various gas and coolant channel designs for high performance liquid-cooled proton exchange membrane fuel cell stacks," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 278–291,

2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.030>.
- [7] B. Boyd, K. Hooman, "Air-cooled micro-porous heat exchangers for thermal management of fuel cells," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 3, pp. 363–367, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.01.006>.
- [8] A. Fly, R. H. Thring, "A comparison of evaporative and liquid cooling methods for fuel cell vehicles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 32, pp. 14217–14229, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.089>.
- [9] S. H. Hwang, M. S. Kim, "An experimental study on the cathode humidification and evaporative cooling of polymer electrolyte membrane fuel cells using direct water injection method at high current densities," *Applied Thermal Engineering*, vol. 99, pp. 635–644, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.091>.
- [10] E. J. Choi, J. Y. Park, M. S. Kim, "A comparison of temperature distribution in PEMFC with single-phase water cooling and two-phase HFE-7100 cooling methods by numerical study," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 29, pp. 13406–13419, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.056>.
- [11] A. Amirfazli, S. Asghari, M. Sarraf, "An investigation into the effect of manifold geometry on uniformity of temperature distribution in a PEMFC stack," *Energy*, vol. 145, pp. 141–151, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.124>.
- [12] R. Rullière, F. Lefèvre, M. Lallemand, V. Ayel, G. Burban, C. Romestant, A. Alexandre, "Experimental study of two-phase heat spreaders for PEMFC cooling applications," *14th International Heat Pipe Conference (14th IHPC)*, Florianópolis, Brazil, 2007.
- [13] A. Faghri, Z. Guo, "Integration of heat pipe into fuel cell technology," *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 232–238, 2008. <https://doi.org/10.1080/01457630701755902>.
- [14] W. Joung, T. Yu, J. Lee, "Experimental study on the loop heat pipe with a planar bifacial wick structure," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 7-8, pp. 1573–1581, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.048>.
- [15] A. P. Silva, R. M. Galante, P. R. Pelizza, E. Bazzo, "A combined capillary cooling system for fuel cells," *Applied Thermal Engineering*, vol. 41, pp. 104–110, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.008>.
- [16] J. Clement, X. Wang, "Experimental investigation of pulsating heat pipe performance with regard to fuel cell cooling application," *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 268–274, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.017>.
- [17] M. V. Oro, E. Bazzo, "Flat heat pipes for potential application in fuel cell cooling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 848–857, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.055>.
- [18] N. Shirzadi, R. Roshandel, M. B. Shafii, "Integration of Miniature Heat Pipes into a Proton Exchange Membrane Fuel Cell for Cooling Applications," *Heat Transfer Engineering*, vol. 38, no. 18, pp. 1595–1605, 2017. <https://doi.org/10.1080/01457632.2016.1262722>.
- [19] B. Huang, Q. Jian, L. Luo, X. Bai, "Research on the in-plane temperature distribution in a PEMFC stack integrated with flat-plate heat pipe under different startup strategies and inclination angles," *Applied Thermal Engineering*, vol.

- 179, pp. 115741-115750, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115741>.
- [20] C. W. Chan, E. Siqueiros, J. Ling-Chin, M. Royapoor, A. P. Roskilly, "Heat utilisation technologies: A critical review of heat pipes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 615–627, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.028>.
- [21] A. Faghri, "Heat pipe: review, opportunities and challenges," *Frontiers in Heat Pipes*, vol. 5, no. 1, pp. 11-48, 2014. <https://doi.org/10.5098/FHP.5.1>.
- [22] M. Ramezanizadeh, M. Alhuyi Nazari, M. Hossein Ahmadi, L. Chen, "A review on the approaches applied for cooling fuel cells," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 139, pp. 517–525, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.032>.
- [23] E. Afshari, "Computational analysis of heat transfer in a PEM fuel cell with metal foam as a flow field," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 139, no. 4, pp. 2423–2434, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08354-x>.
- [24] F. Issacci, Heat Pipe Vapor Dynamics, University of California, 1990.
- [25] A. P. Tetuko, B. Shabani, J. Andrews, "Thermal coupling of PEM fuel cell and metal hydride hydrogen storage using heat pipes," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 7, pp. 4264–4277, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.194>

Evaluating the Effect of Movable Internal and Fixed External Shading Devices on the Energy Consumption of an Office Building in Kerman

Research Article

Mohamad Reza Motlaghian¹, S.Mohammad Hojjat.Mohammadi² , Ebrahim Jahanshahi Javaran³

 [10.22067/jacsm.2024.86057.1233](https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.86057.1233)

Abstract

Windows include a significant part of waste in buildings as they are transparent to solar heat and radiation. The use of shading devices is evaluated as a suitable strategy in order to improve the energy performance of the building. In this article, physical specifications of an office building in Kerman are modeled in Sketch Up software. Then, by assigning materials to the building components in Open Studio software, the building is simulated. Finally, the building energy consumption in the presence of fixed external shading devices, internal movable shading devices and simultaneous use of these two shadings, is calculated in Energy Plus software. Results show that the use of external fixed shading devices has better performance in reducing energy consumption compared to internal movable shading devices. In this regard, the external fixed shade with a depth of 150 (cm) has recorded the best result with reduction of 18.92% in annual energy consumption compared to the base state. The simultaneous use of external fixed shading with depth of 100 (cm) and internal movable shade with 63.57 (GJ) saving, shows the most reduction in building annual energy consumption.

Keywords: Building energy consumption, Office Building, Energy plus, internal shading device, External overhang.

1-Introduction

Nowadays, 40% of the total energy consumption and 35% of the total carbon dioxide production in Iran is allocated to the building sector. windows account for a significant part of waste in this sector. The most important factor in this loss is the heat absorbed due to penetration of sunlight through the windows. The use of shading devices and sunlight control methods is a smart choice in order to optimize the use of sunlight in different seasons. This

approach can be introduced as an effective solution to reduce waste through windows and translucent walls.

Many studies have been conducted on the effect of shading devices on energy consumption, which evaluated their use as favorable. Among these studies, in the study of Alhuwayil et al. the evaluation of external shading devices on four fronts of a hotel against the use of polyurethane and fiberglass insulation from the viewpoint of energy consumption has been investigated. Iqbal Shah et al. compared the effect of shading devices on opaque façade. Subsequently, a simulation study was conducted to quantify the effects of shading systems on opaque facades with different thermal transmittance values. Park et al. analyzed the energy performance and thermal comfort of an educational building with shadings in South Korea. When PCMs were applied to the shading, the cooling energy consumption decreased by 44%, and the number of thermal comfort hours improved by 34%. In research of shahdan et al. the use of external fixed shade has been introduced as a passive solar strategy. In this study, Revit software was used to model a three-story school in Malaysian climate, vertical, horizontal and egg-crate shading devices have been compared. The simulation clearly shows that the egg-crate shading devices is the best solution for hot-humid climate area.

In this research, the effect of using internal and external shading devices in climate of Kerman, has been studied. Therefore, overhangs in 3 depths and movable shading devices in 3 types have been simulated. The combined use of both types of shadings and its effect on energy consumption has also been investigated. in this study, a comprehensive comparison between different combinations of the external and internal shading devices has been carried out. The results would be conclusive in order to choose the desirable combination of shading

*Manuscript received December 24, 2024. Revised July 30, 2024, Accepted, October 6, 2024.

¹ MSc. Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

² Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman.

Email: Iran.smh.mohammadi@kgut.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

devices for an office building in climatic condition of Kerman.

2- Methodology

In order to evaluate the effect of shading devices on energy consumption, a six story office building is designed. The modeling of this building is based on a real building and considered standards are according to the rules and regulations of the Ministry of Housing and Urban Development of Iran in the design and construction of the building. The main facade of the building faces south and includes 17 windows. It is open five days a week from 7:30 am to 4:00 pm and closed on weekends. Overhangs are created on 17 windows of south facade. Figure (1) illustrates the overhangs on the south facade of the building at three depths of 50, 100 and 150 (cm).

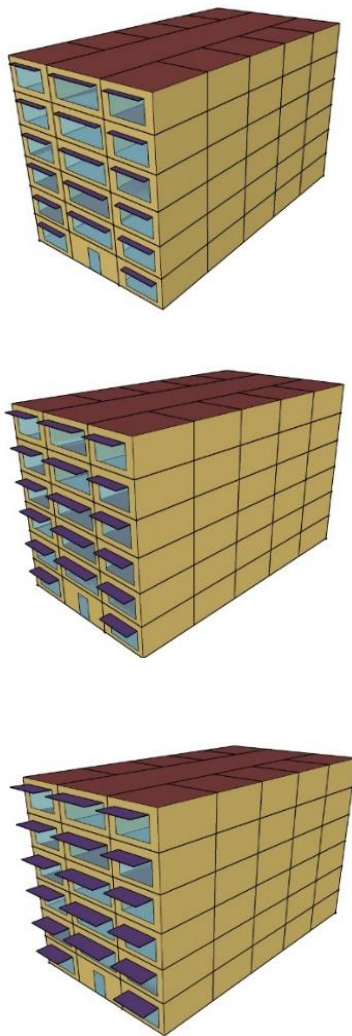


Figure 1 Simulated overhang in three depths.

Kerman meteorological file, the HVAC system and its schedule, the movable shade devices and its schedule are also among the settings made in the Energy Plus software. In this research, three different types of movable shading

devices; interior roller shade, blind and exterior screen are used to cover the south facade windows (Figure 2).



Exterior screen

Blind

Roller shade

Figure2 Selected movable shading devices

Calculations of energy consumption of the office building are in one year and the assumptions considered for the simulation are as follows.

1. The cooling and heating setpoints are considered 26 and 22 degrees Celsius, respectively.
2. The average ground temperature during the year is 18 degrees Celsius.
3. The algorithm of heat transfer calculation is selected based on sensible heat. Therefore, the humidity and the lack of integrity of the surfaces and materials have been ignored.

3- Results and discussion

The obtained results are presented in three sections.

- The results of the effect of external overhangs
- The results of the effect of movable shading devices
- The results of the effect of simultaneous use of overhangs and movable shading devices

Effect of external overhangs

In this section, the effect of external overhangs with three depths of 50 cm, 100 cm and 150 cm are studied. The results of three depths overhang demonstrate a positive effect to reduce the annual energy consumption of the office building. It is obvious that the 150 cm overhang has a better performance than other two, to reduce energy consumption and shows 49.41(GJ) reduction in annual energy consumption.

Effect of internal movable shading devices

Movable shading devices include three types of interior roller shade, blind and exterior screen that cover the window frame. The results show that interior roller shade has the most impact compared to its counterparts and illustrates 34.94(GJ) reduction in annual energy consumption. Although movable shading devices have a favorable effect in reducing energy consumption, they are less effective compared to overhangs.

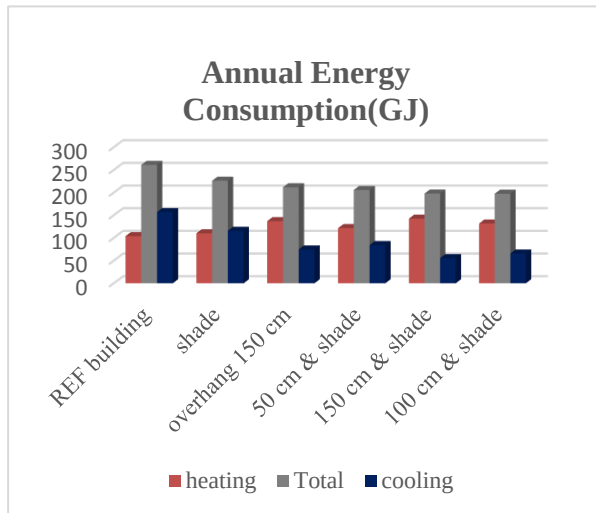


Figure 3 Annual energy consumption of building for heating and cooling in presence of shading devices

The effect of simultaneous use of overhangs and movable shading devices

In order to evaluate the amount of energy saving due to the use of both external and internal shading devices, overhangs and movable shading devices have been simulated simultaneously for the building in 9 different modes. Based on results, the overhang with a depth of 100 cm and interior roller shade shows the greatest reduction in this section with an amount equal to 24.34% compared to the base case. Figure 3 shows the effect of the selected shading devices in each section on the cooling and heating load of the building.

4- Conclusion

In this research, the effect of using movable shading devices and overhangs in a typical office building in Kerman city has been studied, using Energy Plus software. In general, the use of shading devices in hot seasons is effective to reduce the energy consumption for cooling applications, due to restriction of direct sunlight penetration into the building. This amount of reduction is different by considering the conditions of the equipment needed for shading, location and the ability of the equipment used to control the sunlight. overhangs have a better performance, compared to movable shading devices. The highest amount of reduction in energy consumption is shown by the building equipped with interior roller shade & overhang 100 (CM) with a reduction of 24.34% per year.



ارزیابی تأثیر سایه‌انداز متحرک داخلی و ثابت خارجی بر مصرف انرژی یک ساختمان اداری در اقلیم کرمان*

مقاله پژوهشی

ابراهیم جهان‌شاهی جواران^(۳)سید محمدحجت محمدی^(۲)سید محمدرضا موسوی مطلقیان^(۱)

doi: 10.22067/jacsm.2024.86057.1233

چکیده پنجره‌ها بخش قابل توجهی از اتلاف انرژی در ساختمان را به دلیل عبور تابش و حرارت خورشید، به خود اختصاص می‌دهند. استفاده از وسایل سایه‌انداز یک استراتژی مناسب در جهت بهبود وضعیت مصرف انرژی در ساختمان‌ها است. در این مقاله مشخصات فیزیکی یک ساختمان اداری در شهر کرمان، در نرم‌افزار اسکچاپ مدل‌سازی شده است. سپس با مشخص کردن مصالح، مدل ساختمان توسط نرم‌افزار اپن‌استودیو تکمیل شده است. در نهایت محاسبات مربوط به میزان مصرف انرژی در شرایط حضور سایه‌اندازهای ثابت خارجی و متحرک داخلی و همچنین به‌کارگیری همزمان آن‌ها، در نرم‌افزار انرژی پلاس انجام شده است. نتایج نشان داد که استفاده از سایه‌اندازهای ثابت خارجی عملکرد به مراتب بهتری در راستای کاهش مصرف انرژی نسبت به سایه‌اندازهای متحرک داخلی دارند. در این راستا سایه‌انداز ثابت خارجی با عمق (cm) ۱۵۰ با کاهش ۱۸/۹۲ درصدی در مصرف انرژی سالیانه نسبت به حالت پایه، بهترین نتیجه را به ثبت رسانده است. در بخش استفاده ترکیبی از سایه‌اندازهای داخلی و خارجی، استفاده همزمان سایه‌انداز ثابت خارجی با عمق (cm) ۱۰۰ و سایه‌انداز متحرک داخلی پرده ساده با صرفه‌جویی (GJ) ۶۳/۵۷ در مصرف انرژی سالیانه ساختمان، بیشترین میزان کاهش مصرف انرژی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی مصرف انرژی ساختمان، ساختمان اداری، انرژی پلاس، سایه‌انداز داخلی، سایه‌انداز خارجی.

مقدمه

اتلافات را در این بخش به خود اختصاص می‌دهند. مهم‌ترین عامل در این اتلاف، ورود نور خورشید و حرارت ناشی از آن می‌باشد. استفاده از وسایل سایه‌انداز و روش‌های کنترل نورخورشید به عنوان انتخابی هوشمندانه در راستای بهینه‌سازی و بهره‌گیری به هنگام از نورخورشید در فصول مختلف، می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در جهت کاهش اتلافات از طریق پنجره‌ها و جدارهای نورگذر معرفی شود. در پژوهشی [5] استفاده از سایه‌بان ثابت خارجی به عنوان یک استراتژی غیرفعال خورشیدی معرفی شده است. در این مطالعه که از نرم‌افزار شبیه‌ساز در جهت مدل‌سازی یک مدرسه سه طبقه در شرایط آب و هوایی مالزی بهره گرفته شده است، به مقایسه سایه‌بان‌های

امروزه ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی و ۳۵ درصد از کل تولید دی‌اکسیدکربن در کشور به بخش ساختمان اختصاص یافته است [1]. مصرف انرژی پس از رشد صنعت و شهرنشینی شدت یافته است. شهرنشینی با تأثیر بر تولید قادر است تا بر مصرف انرژی، تأثیری روزافزون بگذارد [2]. از طرفی با افزایش نگرانی‌ها در مورد گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی، توجه بیشتری به تلفات انرژی در ساختمان‌ها معطوف شده است [3]. بر اساس اعلام دفتر مقررات ملی ساختمان وزارت راه و شهرسازی [4]، ۵۰ درصد از مصرف انرژی در بخش ساختمان در ساختمان‌های عمومی و اداری تلف می‌شود که پنجره‌ها بخش قابل توجهی از

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱۰/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۱۵ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر و تبدیل انرژی، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر و تبدیل انرژی، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان.

Email: smh.mohammadi@kgut.ac.ir

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

عمودی، افقی و ترکیبی پرداخته شده است. در این پژوهش استفاده از تمام طراحی‌ها نتایج مثبتی در پی داشته است. اقبال‌شاه و همکاران [6] اثرات پیکربندی‌های مختلف سایه را بر روی یک نمای مات مقایسه کرده‌اند. سپس، یک مطالعه شبیه‌سازی برای تعیین کمیت اثرات سیستم‌های سایه‌انداز بر روی نماهای مات با مقادیر انتقال حرارتی متفاوت انجام داده‌اند. نتایج این مطالعه مزایای متعددی را برای استقرار سیستم‌های سایه‌انداز بر روی نماهای کدر ساختمان نشان داده است که شامل کاهش حرارت رسانایی ساختمان، بارهای خنک‌کننده ساختمان، دمای ریزاقلیم در نزدیکی نما و همچنین کاهش بالقوه انتشار کربن بر روی چرخه زندگی ساختمان است. در مقاله‌ای دیگر، الهوایی و همکاران [7] به بررسی تأثیر استفاده از وسایل سایه‌انداز خارجی بر عملکرد انرژی یک هتل بلند مرتبه در شرایط اقلیمی گرم و مرطوب پرداخته‌اند. ارزیابی استفاده از وسایل سایه‌انداز خارجی در چهار جبهه ساختمان در مقابل استفاده از عایق‌های بهبود یافته پلی‌اورتان و فایبرگلاس از دیدگاه مصرف انرژی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر (Design Builder) مورد بررسی قرار گرفته است.

لی و همکاران [8] یک دستگاه سایه‌انداز خودکار دو فلزی (Bimetal) را بر اساس اثر حرارتی تابش خورشیدی پیشنهاد کرده‌اند که مکانیسم سایه‌زنی را از طریق تغییر زاویه خمش دو فلز گرم شده اجرا می‌کند. بر اساس نتایج محاسبات شبیه‌سازی، افزایش گرمای داخلی را می‌توان حدود ۵۸ درصد در تابستان و ۱/۵۳ درصد در زمستان کاهش داد که کاربرد مؤثر آن در پکن را نشان می‌دهد. در پژوهشی دیگر [9] نقش وسایل سایه‌انداز در جهت بهبود شرایط آسایش دمایی و بصری در ساختمانی با نمای شیشه مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از پرده سایه‌انداز متحرک خارجی نسبت به پرده متحرک داخلی به ویژه در نمای جنوبی بسیار ارجح‌تر ارزیابی شده و استفاده از فیلم‌های کنترلی نور در تمامی جهات مطلوب ارزیابی شده است. کریم‌دوست و معرفت [10] به بررسی پارامتریک عملکرد نورگیرها با هدف بهبود روشنایی در یک ساختمان چهار طبقه با استفاده از روش رادیوسیتی پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان داد که ضلع نورگیر تأثیر به‌سزایی در میزان نوری که وارد ساختمان می‌شود دارد و نتایج به دست آمده می‌تواند در بهبود طراحی و معماری از حیث میزان دسترسی به

نور طبیعی به طبقات ساختمان بسیار مؤثر باشد. بوراتی [11] به ارزیابی وسایل سایه‌انداز، استفاده از شیشه‌هایی با ضریب عبور کم در نما و جهت‌گیری مناسب ساختمان یک مدرسه برای اقلیم گرم و خشک شیراز پرداخته است. استفاده از وسایل سایه‌انداز خارجی افقی و عمودی بسیار مؤثرتر از دو فاکتور دیگر ارزیابی شده است، به طوری که استفاده از وسایل سایه‌انداز تا ۴۸٪، استفاده از شیشه با ضریب عبور کم در نما تا ۲۹٪ و جهت‌گیری بهینه جغرافیایی ۲۵٪ کاهش در مصرف انرژی سالیانه را نسبت به حالت پایه به ثبت رسانده‌اند. در پژوهش عرب‌سلگار و همکاران [12] به بررسی اثر پدیده کوران بر فاکتورهای آسایش حرارتی بر اساس مدل فنگر در یک ساختمان با دیوار شیشه‌ای پرداخته شده است. در این مقاله رویکرد به‌کارگیری سیستم گرمایش جابه‌جایی اجباری با هدف کاهش اثرات کوران در سه نوع مختلف با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده است. نتایج پژوهش حاکی از آن است که استفاده از دمنده‌های ترکیبی در بالا و پایین پنجره دارای تطبیق قابل قبولی با استانداردهای آسایش حرارتی اشره و ایزو ۷۷۳۰ است.

در پژوهش پارک و همکاران [13] به ارزیابی استفاده از سایه‌انداز در حضور مواد تغییر فاز دهنده و بدون حضور آن‌ها پرداخته شده است. از نتایج حاصل شده در این پژوهش کاهش ۴۴ درصدی مصرف انرژی مورد نیاز سرمایش است. البته از دیدگاه اقتصادی بیان شده در حالتی که از وسایل سایه‌انداز با مواد تغییر فاز دهنده استفاده شود، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر ارزیابی شده، اگر چه دوره بازگشت سرمایه به میزان سه سال نسبت به حالتی که از مواد تغییر فاز دهنده استفاده نشده، کاهش یافته است. کریمتات و همکاران [14] در یک مقاله مروری به بررسی استفاده از وسایل سایه‌انداز در ساختمان‌ها پرداخته‌اند. بر اساس بررسی آن‌ها کاهش مصرف انرژی از طریق ایجاد تغییرات در معماری و نمای ساختمان امکان‌پذیر است. بر اساس نتایج این مقاله محافظت از پنجره‌ها در تابستان و اجازه استفاده حداکثری پنجره‌ها و محیط داخل در زمستان از پرتو خورشید کمک شایانی به کاهش بار مصرفی خواهد کرد. مطالعات پیشین اگر چه تحلیلی جامع بر نقش نور طبیعی و

سایه‌انداز بر مصرف انرژی مورد نیاز جهت تأمین شرایط آسایش، یک ساختمان با کاربری اداری در شش طبقه که نمای اصلی آن رو به جنوب است و شامل ۱۷ پنجره در نمای جنوبی می‌باشد، در نرم‌افزار انرژی پلاس [16] شبیه‌سازی شده است. شکل (۱) نمای ساختمان شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد. این ساختمان اداری که در شرایط اقلیمی شهر کرمان قرار دارد از شنبه تا چهارشنبه از ساعت ۷:۳۰ تا ۱۶:۰۰ فعال است و برای روزهای آخر هفته تعطیل می‌باشد.

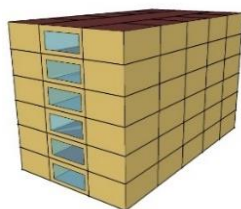
محاسبات میزان مصرف انرژی در یک بازه زمانی یک ساله که شامل فصول گرم و سرد سال است انجام شده و فرضیات در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی به قرار زیر است.

۱. دمای طراحی ساختمان ۲۲ درجه سانتی‌گراد برای دمای تنظیم گرمایش و ۲۶ درجه سانتی‌گراد برای دمای تنظیم سرمایش می‌باشد.

۲. با توجه به اینکه تخمین مناسبی از دمای زمین در طول سال در دسترس نمی‌باشد، از دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد به صورت میانگین در طول سال استفاده شده است.

۳. ساختمان در راستای محور جنوب طراحی شده و هیچ گونه زاویه‌ای با این محور ندارد.

۴. الگوریتم محاسبات انتقال حرارت سطوح ساختمان در معادلات انتقال حرارت بر اساس گرمای محسوس لحاظ شده و از رطوبت سطوح و عدم یکپارچگی آن‌ها و مصالح صرف نظر شده است. در مرحله شبیه‌سازی این پژوهش از سه نرم‌افزار اسکچاپ (Sketch up) [17]، اپن استودیو (Open studio) [18] و انرژی پلاس (Energy plus) استفاده شده است.



(ب) نمای شمالی



(الف) نمای جنوبی

شکل ۱ ساختمان مدل شده در نرم‌افزار اسکچاپ

برهم‌کنش آن با پنجره در ساختمان و تأثیر وسایل سایه‌انداز در این بین بر مصرف انرژی ارائه داده‌اند، لیکن خلأ تأثیر یک برنامه زمانی به‌کارگیری از وسایل سایه‌انداز متحرک داخلی در کنار استفاده همزمان با وسایل سایه‌انداز ثابت خارجی و تأثیر عوامل یاد شده بر مصرف انرژی ساختمان احساس می‌شود. بنابراین در این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از وسایل سایه‌انداز داخلی و خارجی در شرایط آب و هوایی شهر کرمان پرداخته شده است. لذا سایه‌بان‌های ثابت خارجی در ۳ عمق مختلف و سایه‌اندازهای متحرک داخلی در ۳ نوع متفاوت در نرم‌افزار شبیه‌ساز، مدل‌سازی شده است. در ادامه، تأثیر انواع مختلف سایه‌انداز بر میزان مصرف انرژی محاسبه شده است و مقایسه‌ای بین تأثیر آن‌ها بر مصرف انرژی صورت گرفته است. همچنین استفاده ترکیبی از هر دو نوع سایه‌انداز و تأثیر کمی آن‌ها بر میزان کاهش مصرف انرژی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه بین وسایل سایه‌انداز مدل‌شده و تأثیر استفاده همزمان از آن‌ها در کنار یک برنامه زمان‌بندی به‌کارگیری از دیدگاه مصرف انرژی در شرایط اقلیمی شهر کرمان برای یک ساختمان با کاربری اداری از نوآوری‌های پژوهش حاضر است.

شرایط اقلیمی و جغرافیایی شهر کرمان

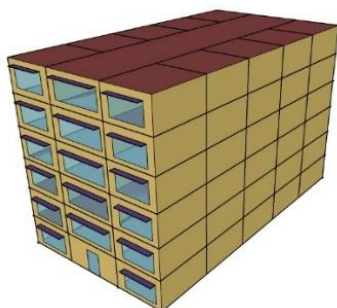
دشت کرمان [15] در دامنه دو رشته کوه که از شمال شرقی و جنوب غربی آن می‌گذرند، گسترده شده است. ارتفاع این دشت از سطح دریا متغیر و حداکثر ۲۱۰۰ متر در نواحی جنوب شرقی و حداقل ۱۶۵۰ متر در نواحی شمال غرب است. در اقلیم کرمان عواملی مانند ارتفاعات و کویر نقش عمده‌ای در شرایط آب و هوایی شهر دارند و این اقلیم را به شهری خشک تا فراخشک بدل کرده‌اند.

اختلاف شدید درجه حرارت در فصول سرد و گرم و حتی در شب و روز از ویژگی‌های این اقلیم است. میانگین درجه حرارت سالانه این شهر ۱۵ درجه سانتی‌گراد و تحت تأثیر بادهای موسمی و خشک است. طول جغرافیایی این شهر $57^{\circ}8'E$ و عرض آن $30^{\circ}28'N$ است.

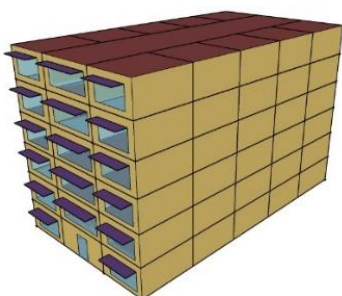
بیان مسئله

در این پژوهش به منظور ارزیابی تأثیر استفاده از وسایل

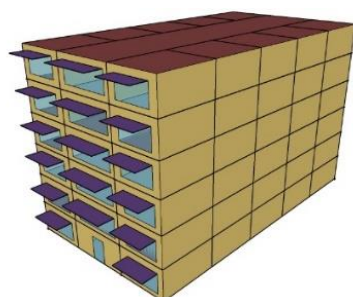
ترسیم پلان اولیه ساختمان و تبدیل آن به یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار اسکچاپ، تعریف و تخصیص مصالح مورد استفاده در



(الف) سایه‌بان ثابت خارجی با عمق ۵۰ cm



(ب) سایه‌بان ثابت خارجی با عمق ۱۰۰ cm



(ج) سایه‌بان ثابت خارجی با عمق ۱۵۰ cm

شکل ۳ سایه‌بان‌های خارجی مدل شده در نرم‌افزار اسکچاپ در سه عمق مختلف

تخصیص مصالح به هندسه ساختمان در نرم‌افزار اپن

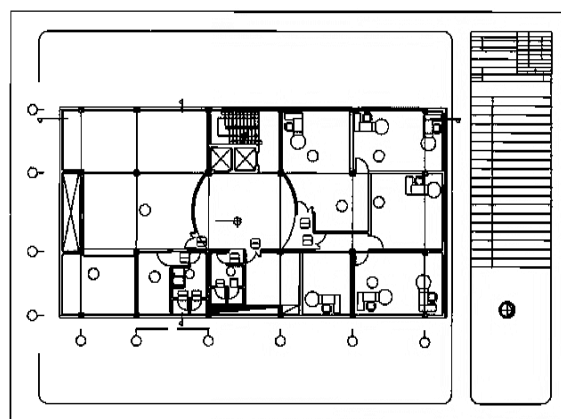
استودیو

قابلیت‌های موجود در نرم‌افزار اپن استودیو این امکان را ایجاد می‌کند که برای هندسه ایجاد شده در نرم‌افزار اسکچاپ، مصالح مورد نیاز را تعریف کرد و به قسمت‌های مختلف ساختمان اختصاص داد. مصالح ایجاد شده در این نرم‌افزار بر اساس استانداردهای موجود و ویژگی‌های تعریف شده برای آن‌ها بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [19] انتخاب شده است که در جداول (۱) تا (۳) به تفکیک ملاحظه می‌شود.

نرم‌افزار اپن استودیو و در نهایت محاسبه انرژی مصرفی مورد نیاز برای تأمین آسایش حرارتی با نرم‌افزار انرژی پلاس صورت گرفته است.

ترسیم هندسه ساختمان در نرم‌افزار اسکچاپ

ترسیم هندسه ساختمان، دیوارهای داخلی و خارجی، نما و سقف و بازشوها و جدارهای نورگذر و ایجاد یک مدل سه‌بعدی از ساختمان با استفاده از نرم‌افزار اسکچاپ انجام شده است. پلان اولیه ساختمان مدل شده در نرم‌افزار اسکچاپ در شکل (۲) قابل مشاهده است.



شکل ۲ پلان ساختمان مدل شده در نرم‌افزار اسکچاپ

از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی ساختمان مدل شده در اسکچاپ موارد زیر هستند:

۱. تعداد ۶۶ فضای حرارتی ایجاد شده.
۲. تعداد ۴۴۴ سطح هندسی ایجاد شده.
۳. تعداد ۲۴ سطح زیر مجموعه شامل پنجره و در.

مدل‌سازی سایه‌بان خارج ثابت در نرم‌افزار اسکچاپ

با توجه به اینکه سایه‌بان‌های ثابت خارجی از اجزای هندسی ساختمان هستند، مدل‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار اسکچاپ و بر روی ۱۷ پنجره ایجاد شده است. شکل (۳) سایه‌بان‌های ثابت خارجی را در نمای جنوبی ساختمان و در سه عمق ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

جدول ۱ مصالح مربوط به سقف ساختمان از خارجی ترین لایه به داخلی ترین لایه [19]

ردیف	نوع مصالح		ضخامت (m)
	گروه اصلی	زیرگروه	
۱	عایق رطوبتی	ورق پیش ساخته قیر	۰/۰۰۵
۲	اندود و ملات آهکی یا سیمانی	-	۰/۰۲
۳	بتن با سنگدانه بسیار سبک	متشکل از پرلیت یا ورمیکولیت	۰/۰۶
۴	تیرچه و بلوک پلی استایرن منبسط	ارتفاع بلوک ۲۰ سانتی متر، عرض پاشنه تیرچه ۱۴ سانتی متر، فاصله محورها ۶۴ سانتی متر	۰/۲۵
۵	اندود و ملات آهکی یا سیمانی	-	۰/۰۲
۶	گچ	قطعات پیش ساخته گچی	۰/۰۱

جدول ۲ مصالح مربوط به کف طبقات از خارجی ترین لایه به داخلی ترین لایه [19]

ردیف	نوع مصالح		ضخامت (m)
	گروه اصلی	زیرگروه	
۱	بتن و فرآورده های بتنی	موزاییک	۰/۰۲
۲	اندود و ملات آهکی یا سیمانی	-	۰/۰۲
۳	عایق رطوبتی	ورق پیش ساخته قیر	۰/۰۰۵
۴	بتن با سنگدانه بسیار سبک	متشکل از پرلیت یا ورمیکولیت	۰/۰۶
۵	تیرچه و بلوک پلی استایرن منبسط	ارتفاع بلوک ۲۰ سانتی متر، عرض پاشنه تیرچه ۱۴ سانتی متر، فاصله محورها ۶۴ سانتی متر	۰/۲۵
۶	گچ	قطعات پیش ساخته گچی	۰/۰۱

جدول ۳ مصالح مربوط به دیوار نما از خارجی ترین لایه به داخلی ترین لایه [19]

ردیف	متریال		ضخامت (m)
	گروه اصلی	زیرگروه	
۱	آجر پلاک در نما	آجرنما	۰/۰۳
۲	اندود و ملات آهکی یا سیمانی	-	۰/۰۲
۳	عایق رطوبتی	ورق پیش ساخته قیر	۰/۰۰۵
۴	بتن و فرآورده های بتنی	بتن هوادار اتوکلاو شده	۰/۰۶
۵	تیرچه و بلوک پلی استایرن منبسط	ارتفاع بلوک ۲۰ سانتی متر، عرض پاشنه تیرچه ۱۴ سانتی متر، فاصله محورها ۶۴ سانتی متر	۰/۲۵
۶	لایه هوای محبوس	سطح افقی - جریان حرارت رو به بالا	۰/۰۶
۷	عایق های حرارتی معدنی	پشم شیشه	۰/۰۱
۸	گچ	قطعات پیش ساخته گچی	۰/۰۱

روش تحقیق

محاسبات انجام شده در این پژوهش توسط نرم‌افزار انرژی پلاس انجام می‌شود [23]. این نرم‌افزار یک موتور محاسباتی می‌باشد، لذا کار آن بر پایه تعریف ورودی‌ها بر مبنای متن و عدد و انجام محاسبات و ایجاد خروجی‌های متنی و عددی است. می‌توان معادلات حاکم را بر اساس معادلات محاسباتی توسط هسته نرم‌افزار بیان کرد. در حالت کلی این معادلات شامل محاسبه تأثیر تابش و رسانش و محاسبه برهم‌کنش انتقال حرارت و جرم است. بنابراین، بالانس انرژی ناشی از تابش روی سطوح خارجی ساختمان از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (۱)$$

در رابطه (۱) $q''_{\alpha sol}$ شار حرارتی تابش (با طول موج کوتاه) خورشید، q''_{conv} تبادل شار حرارت جابه‌جایی با هوا، q''_{ko} شار حرارت رسانشی به دیوار، q''_{LWR} تبادل خالص شار حرارتی تابش (با طول موج بلند) سطح با هوا و محیط اطراف است که بر اساس قانون استفان بولتزمن از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$q''_{LWR} = \varepsilon \sigma F_{gnd} (T_{gnd}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{air} (T_{gir}^4 - T_{surf}^4) \quad (۲)$$

در رابطه (۲) ε ضریب صدور (با طول موج بلند) سطح، σ ثابت استفان بولتزمن، F_{gnd} ضریب دید دیوار نسبت به زمین، F_{sky} ضریب دید دیوار نسبت به آسمان، F_{air} ضریب دید دیوار نسبت به هوا، T_{surf} دمای سطح خارجی دیوار، T_{gnd} دمای سطح زمین، T_{sky} دمای آسمان و T_{air} دمای هوا می‌باشد.

اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، از پژوهش گوش و نئوگی [24] استفاده شده است که در آن به بررسی اثر طراحی پنجره و پنجره‌بندی و سایه‌اندازی بر مصرف انرژی در ساختمان و ارزیابی عملکرد یک سیستم جدید سایه‌اندازی پرداخته شده است. لذا ورودی‌های مختلف از جمله دماهای برنامه‌ریزی شده، ترموستات ساختمان، مصالح استفاده شده در کف و سقف و دیوارها، سیستم تهویه مطبوع، تعداد افراد حاضر و سایر موارد وارد نرم‌افزار انرژی پلاس گردیده است. در نهایت مصرف انرژی سالیانه ساختمان بر واحد سطح که عبارت است

شبیه‌سازی ساختمان در نرم‌افزار انرژی پلاس

از جمله مراحل که در این بخش تنظیم و شبیه‌سازی شده است، فایل آب و هوایی شهر کرمان [20] به همراه گرم‌ترین و سردترین روز سال، تعریف برنامه زمان‌بندی ساعت کار سیستم‌های تهویه مطبوع و تأسیسات، تعریف و تنظیم سیستم تأسیساتی و سایه‌اندازهای متحرک داخلی است [21]. لازم به ذکر است که این نرم‌افزار یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی حال حاضر دنیاست که یک شبیه‌سازی جامع انرژی از ساختمان را ایجاد و محاسبه می‌کند.

شبیه‌سازی سایه‌اندازهای داخلی در نرم‌افزار انرژی

پلاس

سایه‌اندازهای متحرک داخلی به دلیل اینکه از اجزای هندسی ساختمان به شمار نمی‌روند، در این قسمت شبیه‌سازی می‌شوند. سه نوع سایه‌انداز شبیه‌سازی شده برای استفاده در پنجره‌های نمای جنوبی شامل سه نوع پرده ساده، کرکره، توری [22] هستند، که در شکل (۴) نمونه‌ای از آن‌ها نشان داده شده است. در راستای بهبود عملکرد مصرف انرژی ساختمان، از یک برنامه زمانی برای به کارگیری سایه‌اندازها استفاده شده است. این برنامه به گونه‌ای تعریف شده است که در فصول سرد سال در زمان حضور نور خورشید سایه‌انداز را حذف و در زمان عدم حضور نور خورشید سایه‌انداز را به منظور کاهش اتلاف پنجره‌ها، فعال می‌کند. عکس این شرایط در تابستان اعمال می‌شود.



(ب) کرکره



(الف) پرده



(ج) توری

شکل ۴ سایه‌اندازهای متحرک انتخاب شده

سایه‌اندازه‌های ثابت خارجی در سه عمق ۵۰ سانتی‌متر، ۱۰۰ سانتی‌متر و ۱۵۰ سانتی‌متر، در جدول (۵) قابل مشاهده است. بر این اساس، بیشترین میزان کاهش مصرف انرژی را ساختمان مجهز به سایه‌اندازه ثابت خارجی با عمق ۱۵۰ سانتی‌متر به ثبت رسانده است. نتایج این بخش با پژوهشی [25] که در اقلیم مدیترانه‌ای کشور ایتالیا صورت گرفته است مشابه است، به طوری که در هر دو مطالعه با افزایش عمق سایه‌اندازه ثابت خارجی توانایی آن برای کاهش بار سرمایشی افزایش یافته است و سایه‌اندازه با عمق بیشتر تأثیر بیشتری در کاهش سالانه مصرف انرژی دارد.

جدول ۵ میزان مصرف انرژی سالیانه در شرایط حضور سایه‌بان‌های ثابت خارجی

عمق سایه‌بان (cm)	مصرف انرژی سالیانه (GJ)	کاهش مصرف انرژی (GJ)	درصد کاهش مصرف انرژی (%)
۵۰	۲۲۶/۱۰	۳۵/۰۴	۱۳/۴۲
۱۰۰	۲۱۲/۵۳	۴۸/۶۱	۱۸/۶۱
۱۵۰	۲۱۱/۷۳	۴۹/۴۱	۱۸/۹۲

نتایج شبیه‌سازی سایه‌بان ثابت خارجی در سه عمق عملکرد مثبتی را از لحاظ کاهش مصرف انرژی نشان می‌دهد. با افزایش عمق سایه‌بان به دلیل پوشش دهی بیشتر زوایای ارتفاع خورشیدی و به طبع افزایش مدت زمان سایه‌اندازی عملکرد آن در راستای کاهش مصرف بار سرمایشی بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است سایه‌بان مدل‌شده در این بخش سایه‌بان افقی است لذا توانایی سایه‌اندازی به‌طور پیوسته در طول روز ندارد و در بعضی زوایا و ساعات نزدیک به طلوع و غروب خورشید متناسب با عمق سایه‌بان این امکان وجود ندارد. با نگاهی مقایسه‌ای به پژوهش تجربی [26] صورت گرفته در زمینه استفاده از وسایل سایه‌انداز خارجی بر مصرف انرژی یک ساختمان ورزشی که کاهش ۳۹ درصدی از میزان انرژی ورودی از جدارهای نور گذر به ساختمان را در فصل تابستان نشان داده، می‌توان دریافت که نتایج حاصل شده در این بخش با نتایج تجربی هم‌راستا و هم‌جهت است.

از یک ساختمان معیار با ابعاد ۳×۵×۵ مترمکعب و یک پنجره به ابعاد ۱×۲ مترمربع، واقع در نمای جنوبی ساختمان که به سایه‌اندازه ثابت خارجی به عمق ۰/۵ متر مجهز شده است، برای سه شهر با شرایط آب و هوایی مختلف توسط نرم‌افزار انرژی پلاس محاسبه شده و نتایج حاصل در جدول (۴) مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۴ اعتبارسنجی نتایج

انرژی سالیانه محاسبه شده (MJ/m ²)	Kolkata (India)	Naples (USA)	Hanoi (Vietnam)
مرجع [24]	۱۰۶۲/۱۷	۷۸۵/۵۸	۸۴۸/۹۷
پژوهش حاضر	۱۰۲۰/۹۸	۸۱۵/۲۵	۸۶۱/۳۹
میزان تغییرات	۴۱/۱۹	۲۹/۶۷	۱۲/۴۲
درصد تغییرات (%)	۳/۸۷	۳/۶۴	۱/۴۴

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج موجود در مرجع [24] اختلاف قابل قبولی دارند که می‌تواند ناشی از اختلاف بین فایل‌های آب و هوایی و اطلاعات کتابخانه‌ای مورد استفاده در دو پژوهش باشد.

نتایج و بحث

نتایج به دست آمده در سه بخش ارائه شده است:

۱. نتایج حاصل از تأثیر سایه‌اندازه‌های ثابت خارجی.
۲. نتایج حاصل از تأثیر وسایل سایه‌انداز داخلی متحرک.
۳. نتایج حاصل از تأثیر وسایل سایه‌انداز ثابت خارجی و سایه‌اندازه‌های متحرک داخلی به صورت همزمان.

لازم به ذکر است که میزان مصرف انرژی برای ساختمان اداری در حالت پایه یعنی شرایطی که از هیچ یک از سایه‌اندازه‌های داخلی و خارجی استفاده نشده است، برابر با ۲۶۱/۱۴ GJ در شرایط اقلیمی شهر کرمان می‌باشد که از این میزان ۱۰۴/۱۰ GJ آن سهم بار گرمایش و ۱۵۷/۰۴ GJ آن سهم بار سرمایش است.

نتایج مدل‌سازی انرژی ساختمان در حضور

سایه‌اندازه‌های ثابت خارجی

نتایج مدل‌سازی این بخش که حاصل مدل‌سازی ساختمان اداری در شرایط آب و هوایی شهر کرمان است، در حضور

نتایج مدل‌سازی انرژی ساختمان در حضور سایه‌اندازهای متحرک داخلی

سایه‌اندازهای متحرک داخلی شامل سه نوع پرده ساده، پرده کرکره و پرده توری می‌باشند و پوشش دهنده قاب پنجره هستند. در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی انرژی ساختمان تجهیز شده به سه نوع مختلف سایه‌انداز داخلی، مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج در جدول (۶) نمایش داده شده است.

جدول ۶ میزان مصرف انرژی سالیانه در شرایط حضور سایه‌اندازهای داخلی

نوع سایه‌انداز داخلی	مصرف انرژی سالیانه (GJ)	کاهش مصرف انرژی (GJ)	درصد کاهش مصرف انرژی (%)
پرده ساده	۲۲۶/۲۰	۳۴/۹۴	۱۳/۳۷
پرده کرکره	۲۳۶/۲۸	۲۴/۸۶	۹/۵۱
پرده توری	۲۳۱/۷۸	۲۹/۳۶	۱۱/۲۴

از جدول (۶) می‌توان دریافت که بیشترین کاهش در میزان مصرف انرژی سالیانه را سایه‌انداز داخلی پرده ساده در شرایط اقلیمی کرمان به خود اختصاص داده است که بخشی از این عملکرد به دلیل توانایی این پرده در فیلتر کردن مناسب نور خورشید در فصل گرم نسبت به دو پرده دیگری و بخشی دیگر به دلیل جلوگیری از تبادل حرارت هوای محیط داخل با پنجره‌ها در فصل سرد است. اگر چه سایه‌اندازهای متحرک داخلی تأثیر مطلوبی در کاهش مصرف انرژی دارند اما در مقایسه با سایه‌اندازهای ثابت خارجی تأثیر کمتری دارند. در پژوهشی دیگر [9] نیز که به مقایسه سایه‌اندازهای داخلی و خارجی پرداخته شده است نتایج مشابهی حاصل شده است و عملکرد سایه‌اندازهای خارجی بهتر از سایه‌اندازهای داخلی ارزیابی شده است. سایه‌اندازهای ثابت خارجی به دلیل توانایی در جلوگیری از تابش مستقیم خورشید قبل از پنجره و عدم تبادل حرارت با آن عملکرد بهتری در فصول گرم سال دارند. سایه‌اندازهای متحرک داخلی اجازه برخورد تابش مستقیم خورشید با پنجره و تبادل حرارت پنجره با محیط پیرامون آن را می‌دهند و به طبع تأثیر کمتری در کاهش دما و انرژی مصرفی ساختمان دارند.

نتایج مدل‌سازی انرژی ساختمان در استفاده همزمان از سایه‌انداز ثابت خارجی و سایه‌اندازهای متحرک داخلی در راستای ارزیابی میزان صرفه‌جویی ناشی از استفاده از وسایل سایه‌انداز به صورت ترکیبی، سایه‌اندازهای داخلی و خارجی به صورت همزمان برای ساختمان در ۹ حالت مجزا شبیه‌سازی و بر اساس عمق سایه‌بان خارجی طبقه‌بندی شده است. ترکیب آن‌ها به منظور بهبود و پوشش نقاط ضعف یکدیگر و افزایش تأثیرگذاری بر عملکرد انرژی ساختمان انجام شد. نتایج شبیه‌سازی برای ساختمان مجهز به سایه‌انداز ثابت خارجی با عمق ۵۰ سانتی‌متر و سایه‌اندازهای داخلی در جدول (۷) مشاهده می‌شود.

استفاده از سایه‌انداز ثابت خارجی با عمق ۵۰ سانتی‌متر در ترکیب با سایه‌اندازهای متحرک داخلی کارایی آن‌ها را از دیدگاه مصرف انرژی افزایش داده است. در حالی که استفاده منفرد از پرده ساده بهترین عملکرد را نسبت به سایر سایه‌اندازهای متحرک داخلی دارد، استفاده ترکیبی از آن با سایه‌انداز ثابت خارجی به عمق ۵۰ سانتی‌متر نسبت به سایر سایه‌اندازهای متحرک داخلی کارایی بهتری را نشان می‌دهد. بر این اساس سایه‌انداز ثابت خارجی با عمق ۵۰ سانتی‌متر و پرده ساده مصرف انرژی سالیانه را ۲۱/۱۴ درصد کاهش داده است که معادل ۵۵/۲۰ گیگاژول در سال است. نتایج حاصل از ترکیب سایه‌انداز خارجی با عمق ۱۰۰ سانتی‌متر و سه نوع سایه‌اندازهای متحرک داخلی در جدول (۸) نمایش داده شده است.

شایان ذکر است که همانند بخش قبل ساختمان تجهیز شده با سایه‌انداز خارجی با عمق ۱۰۰ سانتی‌متر و پرده ساده کمترین میزان انرژی مصرفی در شرایط یکسان شبیه‌سازی برای این بخش را به ثبت رسانده‌اند. میزان مصرف انرژی سالیانه حاصل از به‌کارگیری سایه‌انداز خارجی با عمق ۱۵۰ سانتی‌متر و سایه‌اندازهای متحرک داخلی در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول ۷ میزان مصرف انرژی سالیانه در شرایط حضور سایه بان ثابت خارجی با عمق ۵۰ سانتی متر در ترکیب با سایه اندازهای داخلی متحرک

نوع سایه انداز ترکیبی با سایه انداز خارجی با عمق ۵۰ cm	مصرف انرژی سالیانه (GJ)	کاهش مصرف انرژی (GJ)	درصد کاهش مصرف انرژی (%)
پرده ساده	۲۰۵/۹۴	۵۵/۲۰	۲۱/۱۴
پرده کرکره	۲۱۵/۲۰	۴۵/۹۴	۱۷/۵۹
پرده توری	۲۰۹/۶۹	۵۱/۴۵	۱۹/۷۰

جدول ۸ میزان مصرف انرژی سالیانه در شرایط حضور سایه بان ثابت خارجی با عمق ۱۰۰ سانتی متر در ترکیب با سایه اندازهای داخلی متحرک

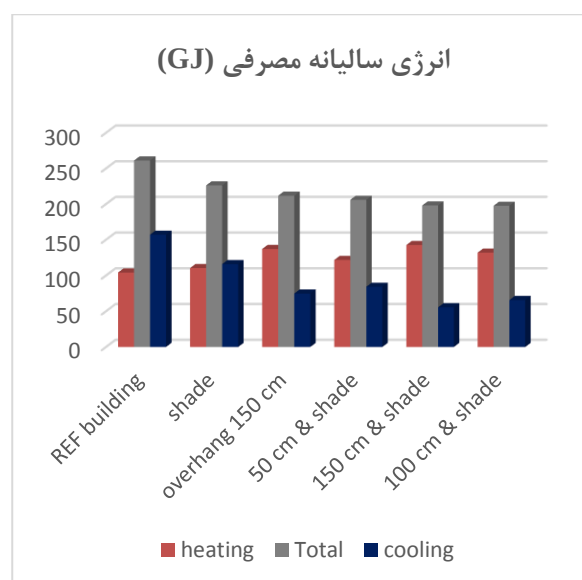
نوع سایه انداز ترکیبی با سایه انداز خارجی با عمق ۱۰۰ cm	مصرف انرژی سالیانه (GJ)	کاهش مصرف انرژی (GJ)	درصد کاهش مصرف انرژی (%)
پرده ساده	۱۹۷/۵۷	۶۳/۵۷	۲۴/۳۴
پرده کرکره	۲۰۶/۲۲	۵۴/۹۲	۲۱/۰۳
پرده توری	۱۹۹/۵۴	۶۱/۶۰	۲۳/۵۹

جدول ۹ میزان مصرف انرژی سالیانه در شرایط حضور سایه بان ثابت خارجی با عمق ۱۵۰ سانتی متر در ترکیب با انواع سایه اندازهای داخلی متحرک

نوع سایه انداز ترکیبی با سایه انداز خارجی با عمق ۱۵۰ cm	مصرف انرژی سالیانه (GJ)	کاهش مصرف انرژی (GJ)	درصد کاهش مصرف انرژی (%)
پرده ساده	۱۹۸/۰۵	۶۳/۰۹	۲۴/۱۶
پرده کرکره	۲۰۶/۸۲	۵۴/۳۲	۲۰/۸۰
پرده توری	۱۹۹/۲۷	۶۱/۸۷	۲۳/۶۹

بر اساس نتایج، بیشترین میزان کاهش مصرف انرژی مربوط به سایه اندازهای ترکیبی ثابت خارجی با عمق ۱۵۰ سانتی متر و سایه انداز متحرک پرده ساده است. نتایج نشان داد که استفاده ترکیبی از وسایل سایه انداز باعث بهبود عملکرد آن‌ها و افزایش توانایی آن‌ها در کاهش مصرف انرژی می‌شود. تجهیز ساختمان با استفاده از آن‌ها تأثیر به سزایی در کاهش بار سرمایشی ساختمان دارد اما متأسفانه نمی‌توان تأثیر مخرب آن‌ها بر بار گرمایشی را نادیده گرفت. در این راستا وسایل سایه اندازی که در هر جدول بهترین عملکرد را از دیدگاه مصرف انرژی دارند، از دیدگاه سرمایش و گرمایش در شکل (۵) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

مشاهده می‌شود که با افزایش عملکرد وسایل سایه انداز در کاهش بار سرمایشی ساختمان، اثر مخرب آن‌ها بر بار گرمایشی نیز افزایش می‌یابد. اما تأثیر آن‌ها بر کاهش بار سرمایشی بیشتر از تأثیر آن‌ها بر افزایش بار گرمایشی است. از این رو، کارایی آن‌ها قابل قبول ارزیابی می‌شود. حفاظت از پنجره‌ها در فصل گرما به



شکل ۵ مقایسه نموداری میزان مصرف سالیانه انرژی به تفکیک سرمایش و گرمایش برای ساختمان مجهز به وسایل سایه انداز

استفاده همزمان از سایه‌بان ثابت خارجی با عمق ۱۰۰ سانتی‌متر و سایه‌انداز متحرک داخلی از نوع پرده ساده است. این کاهش مصرف انرژی به میزان ۶۳/۵۷ گیگاژول در سال است که سهمی معادل ۲۴/۳۴٪ در کاهش مصرف انرژی نسبت به ساختمان پایه را نشان می‌دهد.

در شرایط آب و هوایی کرمان با توجه به اینکه غالب انرژی ساختمان در جهت تأمین بار سرمایشی مصرف می‌شود و همچنین نسبت کاهش بار سرمایشی در مقایسه با افزایش بار گرمایشی با استفاده از وسایل سایه‌انداز بیشتر است، به‌کارگیری وسایل سایه‌انداز مثبت ارزیابی می‌شود و بر اساس نتایج این کار پژوهشی تأثیر مناسبی در کاهش مصرف سالانه انرژی ساختمان دارند.

فهرست علائم

F_i : ضریب دید
 q'' : نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح (W/m^2)
 T : دما ($^{\circ}C$)

نمادهای یونانی

ε : ضریب صدور تابش
 σ : ثابت استیفان بولتزمن

زیرنویس‌ها

air	هوا
asol	تابش (طول موج کوتاه) خورشید
conv	انتقال حرارت جابه‌جایی
gnd	زمین
k	انتقال حرارت رسانشی
LWR	تابش با طول موج بلند
o	خارجی
sky	آسمان
surf	سطح

واژه‌نامه

Design Builder	دیزاین بیلدر
Bimetal	دو فلزی

کاهش بار سرمایشی کمک می‌کند، در حالی که حداکثر استفاده پنجره‌ها از تابش پرتو خورشیدی به کاهش بار گرمایشی کمک می‌کند. بنابراین با استفاده از وسایل سایه‌انداز در تابستان و حذف آن‌ها در زمستان، می‌توان عملکرد آن‌ها را به میزان قابل توجهی ارتقا بخشید و کارایی آن‌ها را از دیدگاه انرژی و صرفه‌جویی در مصرف آن افزایش داد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر به‌کارگیری سایه‌اندازهای خارجی و داخلی در یک ساختمان اداری نمونه در شهر کرمان، با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت کلی استفاده از وسایل سایه‌انداز در فصول گرم به دلیل کنترل و مهار تابش مستقیم خورشید مثبت ارزیابی می‌شود و تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی مورد نیاز در بخش سرمایش دارد. این میزان از کاهش با در نظر گرفتن شرایط وسیله مورد استفاده برای سایه‌زنی، مکان قرارگیری و چگونگی توانایی وسیله سایه‌انداز در کنترل و فیلتر کردن نور خورشید متفاوت است.

سایه‌اندازهای ثابت خارجی در مقایسه با سایه‌اندازهای متحرک داخلی به دلیل کنترل و جلوگیری از تابش مستقیم خورشید به پنجره مانع از افزایش دمای پنجره و تبادل حرارت با محیط پیرامون پنجره می‌شوند و کارایی بهتری از جهت کاهش مصرف انرژی و بار سرمایشی دارند. هر چه عمق سایه‌انداز ثابت خارجی بیشتر باشد، به دلیل افزایش توانایی در جلوگیری از تابش مستقیم نور خورشید و پوشش‌دهی بیشتر زوایای ارتفاع خورشیدی و افزایش مدت زمان سایه‌اندازی، میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیز بیشتر است. به عنوان مثال برای سایه‌بان با عمق ۱۵۰ سانتی‌متر، کاهش مصرف به میزان ۴۹/۴۱ گیگاژول محاسبه شده است که کاهش در حدود ۱۸/۹۲٪ را نشان می‌دهد و بهترین کارایی را در بخش استفاده منفرد از وسایل سایه‌انداز نشان می‌دهد.

استفاده از وسایل سایه‌انداز در فصول سرد سال به دلیل جلوگیری از تابش مستقیم نور خورشید به عنوان عاملی مزاحم در جهت کاهش مصرف انرژی ارزیابی می‌شود.

در شرایط استفاده همزمان از سایه‌اندازهای ثابت خارجی و سایه‌اندازهای متحرک داخلی، ۹ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در این میان، بیشترین میزان کاهش مصرف انرژی در

تقدیر و تشکر

Sketch up

اسکیچاپ

Open studio

اپن استودیو

Energy plus

انرژی پلاس

مراجع

- [1] F. Amini, M. A. Shafizadeh, L. S. Fatahi, M. Tuanpour, P. Suleimanpour, M. Farmad, N. Gol Garhamani, M. Khodi, Energy balance sheet for 2019 Deputy of Electricity and Energy Affairs, Electricity and Energy Master Planning Office, Tehran, Ministry of Energy, 2022. (In Persian)
- [2] A. Yari nezhad, A. Mahravan, "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," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 1, pp. 41-60, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81531.1175>.
- [3] A. Amiri, A. Yarinezhad, "Investigating the Effect of Phase Change Materials on Energy Consumption in Lightweight Prefabricated Relief Buildings," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 4, pp. 35-52, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.78503.1136>.
- [4] The Islamic republic News Agency, Available: <https://irna.ir/xjbKR> , [Accessed Fall 2022]. (In Persian)
- [5] M. S. Shahdan, S. S. Ahmad, M. A. Hussin, "External shading devices for energy efficient building," Series, *Earth and Environmental Science*, vol. 118, p. 012034, 2018. 10.1088/1755-1315/117/1/012034.
- [6] I. Shah, B. Soh, C. Lim, S. Lau, A. Ghahramani, "Thermal transfer and temperature reductions from shading systems on opaque facades: Quantifying the impacts of influential factors," *Energy Build*, vol. 278, p. 112604, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112604>.
- [7] W. Alhuwayil, M. Mujeebu, A. Algarny, "Impact of External Shading Strategy on Energy Performance of Multi-Story Hotel Building in Hot humid Climate", *Energy*, vol. 169, pp. 1166 -1174, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.069>.
- [8] Z. Li, S. Zhang, J. Chang, F. Zhao, Y. Zhao, J. Gao, "Simulation study on light environment performance and heat gain of applying a bimetal automatic shading device to rooms," *Energy and Buildings*, vol. 211, p. 109820, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109820>.
- [9] G. Evolaa, F. Gullob, L. Marlettaa, "The role of shading devices to improve thermal and visual comfort in existing glazed buildings," *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 346-355, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.543>.
- [10] M. Marefat, A. Karimdoost-Yasuri, "Parametric Study on Illumination Performance of Skylights for Daylighting Enhancement," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 21, no. 1, pp. 15-32, 2009. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/fum-mech.v21i1.7704>.
- [11] C. Buratti, E. Belloni, F. Merli, M. Mastoori, S. Sharifi, G. Pignatta, "Evaluating the Impact of Shading Devices, Glazing Systems, and Building Orientation on the Energy Consumption in Educational Spaces," *Environmental and Earth Sciences Proceedings*, vol. 12, no. 1, pp. 22, 2021. <https://doi.org/10.3390/envirosciproc2021012022>.
- [12] A. Arabsolghar, N. Heidari, M. Shafiey dehaj, A. Iranmanesh, "Investigation of Down-Draught Effect on The

- Thermal Comfort Indexes in The Building With Glazing Envelope,” *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 33, no. 1, pp. 35- 52, 2021. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.70588.1030>.
- [13] J. Park, B. Yun, S. 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 Build*, vol. 216, p. 109930, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109930>.
- [14] A. Kirimtat, B. Koyunbaba, I. Chatzikonstantinou, S. Sariyildiz, “Review of simulation modeling for shading devices in buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 23-49, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>.
- [15] Wikipedia, the free encyclopedia, Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kerman>, [Accessed Spring 2023].
- [16] Energy Plus energy simulation software Version 9.2.0 U.S. Department of Energy.
- [17] Sketch Up pro 2017 simulation software Version 17.1.174 64-bit, 2017.
- [18] Open Studio simulation software Version 2.9.1 U.S. National Renewable Energy Laboratory.
- [19] Iran's national building regulations, energy saving, topic 19, Road and Urban Development Research Center of the Ministry of Roads and Urban Development, Fourth edition, 2019. (In Persian)
- [20] L. L. K. Drury, B. Crawley, Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx). 2022. [Online]. Available: <http://climate.onebuilding.org>.
- [21] Energy plus input output reference U.S. Department of energy September 27, 2019.
- [22] Energy Plus Reference Data Set for Window, Blinds, Shade, Screen materials, Version 9.2.0 U.S. Department of Energy.
- [23] Energy plus engineering reference U.S. Department of energy September 27, 2019.
- [24] A. Ghosh, S. Neogi, “Effect of fenestration geometrical factors on building energy consumption and performance evaluation of a new external solar shading device in warm and humid climatic condition,” *Solar Energy*, vol. 169, pp. 94-104, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.025>.
- [25] L. Bellia, F. De Falco, F. Minichiello, “Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, no. 1, pp. 190-201, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.039>.
- [26] L. Evangelisti, C. Guattari, F. Asdrubali, R. D. L. Vollaro, “An experimental investigation of the thermal performance of a building solar shading device,” *Journal of Building Engineering*, vol. 28, p. 101089, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101089>.

Implementation Robust Control Technique to Lateral Stabilization for in-Wheel Motor Electric Vehicle

Mohammad amin Ghomashi¹ , Reza Kazemi²

 [10.22067/jacsm.2024.84743.1209](https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.84743.1209)

Abstract

In this research, with the aim of stabilizing an in-wheel motor electric vehicle, an adaptive sliding mode robust control strategy is developed based on the phase plane. The proposed control strategy consists of three levels. The first level includes an adaptive sliding mode controller. In this study, the system's state is adjusted to mitigate chattering, minimize response delay, and reduce tracking error. The second level involves a joint control algorithm, implemented based on the boundary model of the stable region in the vehicle sideslip angle rate phase plane. When the vehicle operates within the stable region, the adaptive sliding mode controller uses the yaw rate to determine the rotational torque. Conversely, when the vehicle exits the stable zone, the algorithm utilizes both the sideslip angle and yaw rate to stabilize the vehicle and return it to the stable region. The third level incorporates an optimal distribution function to allocate rotational torque across the four vehicle tires. To accurately represent the vehicle's real behavior, the nonlinear dynamics of the tires are considered. The proposed control algorithm is evaluated under various scenarios, including different operating conditions and critical/emergency situations. Simulation results demonstrate the algorithm's optimal performance and effectiveness. Additionally, MATLAB/CarSim software is used to validate the simulations.

Keywords: Sliding Mode, Stability, Sliding Surface, In-wheel Motor, Vehicle Dynamic.

1. Introduction

In the last decade, with the development of related technologies, the production of electric vehicles by the world's leading vehicle manufacturers and the growing demand of customers for these vehicles, their presence became prominent due to much less energy consumption and less pollution in the automotive industry. At the same time, with the advancement of vehicle control and the feeling of drivers to help them drive, especially in critical situations, the world's leading vehicle manufacturers started designing and producing electric vehicles. Also, the

approach to the development of autonomous driving electric vehicle is growing in advanced countries. Therefore, researchers have also conducted appropriate research in this field in the last five years. Considering the importance of safety issues, the discussion of stability in electric vehicles is a serious and important issue, especially in emergency and dangerous situations and maneuvers. In critical and emergency maneuvers, there are very strong couplings between longitudinal and transverse dynamics at several levels of dynamics, kinematics and tire forces. Therefore, the need for an integrated control system that can guide the vehicle in these maneuvers is well felt. In recent years, control methods have been proposed to track the vehicle's path. In a research, it has been attempted to provide an optimal control method for the foresight with a small side angle of the vehicle. In another research, an optimized prediction neural network model has been proposed, and the active front steering wheel angle is guided based on the prediction point and the current state of the vehicle. Analytical values of model parameters are obtained by analyzing the amount of error. In a research, researchers have attempted to design a track tracking controller based on the sliding mode technique by using a non-linear tire model and comparing them with a linear quadratic regulator controller. According to the conducted research and the results, it is clear that the sliding mode controller has a good performance in controlling the rotation angle of the vehicle around the yaw axis. In a research on the design of vehicle track tracking control based on linear matrix inequality, a saturated linear tire was used to obtain the dynamic model, which includes time-varying characteristics in the tire. Also, the proposed controller is compared with the controller based on the prediction of the model.

The structure of this paper is as follows: The second part introduces the dynamic model of the in-wheel motor electric vehicle. The adaptive stability control system based on the sliding mode control algorithm is introduced with details in the third section. In the fourth part, the results of the simulations are analyzed and reviewed. The

*Manuscript received October 4, 2023. Revised February 20, 2024, Accepted September 26, 2024.

¹ Corresponding Author: PhD student, Faculty of Mechanical Engineering, K.N.T University of Technology, Tehran, Iran.

Email: m.ghomashi@email.kntu.ac.ir

² Professor, Faculty of Mechanical Engineering, K.N.T University of Technology, Tehran, Iran.

conclusion is presented below.

2. Dynamic Modeling

2.1. Wheel Equation

The wheel is one of the subsystems in the analysis of the dynamic behavior of the car in acceleration and braking modes.

$$I_w \frac{d\omega_j}{dt} = T_{d_j} - T_{b_j} - F_{x_j} R - T_{Roll} \quad (1)$$

where I_w is the moment of rotational inertia of the wheel, F_x is the longitudinal force of the tire, R is the effective radius of the wheel, T_d, T_b represents the braking and thrust torque, respectively. Also, the rolling resistance can be calculated using equation (2).

$$T_{Roll} = f_r R F_z \quad (2)$$

that F_z, f_r represent the rolling resistance of the tire and the normal force of the tire, respectively.

The vehicle bicycle model is shown in figure (1).

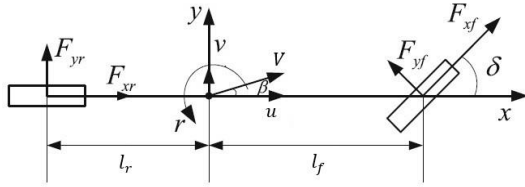


Figure 1. Vehicle bicycle model

2.2. Tire Dynamic

Assuming the linear dependence of the friction force of the tires on the vertical force of each tire, the longitudinal or transverse friction force of the tire can be expressed by equation number (3).

$$F_{\gamma_{t,\varepsilon}} = \mu_{k_{t,\varepsilon}} F_{z_{t,\varepsilon}} \cdot K \in \{x, y\} \cdot \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (3)$$

Where $F_{z_{t,\varepsilon}}$ represents the vertical load of each of the front and rear tires and $\mu_{k_{t,\varepsilon}}$ also represents the longitudinal or transverse friction coefficient of the tire. The vertical force of the tire is described by relations (4) to (7).

$$F_{z_{f,l}} = m \left[\frac{gl_r - a_x h_{cg} - F_{aero} h_{aero}/m}{2(l_f + l_r)} - \frac{l_r a_y h_{cg}}{(l_f + l_r)t_w} \right] - \frac{0.6F_{aero}}{4} \quad (4)$$

$$F_{z_{f,r}} = m \left[\frac{gl_r - a_x h_{cg} - F_{aero} h_{aero}/m}{2(l_f + l_r)} + \frac{l_r a_y h_{cg}}{(l_f + l_r)t_w} \right] - \frac{0.6F_{aero}}{4} \quad (5)$$

$$F_{z_{r,l}} = m \left[\frac{gl_f + a_x h_{cg} + F_{aero} h_{aero}/m}{2(l_f + l_r)} - \frac{l_f a_y h_{cg}}{(l_f + l_r)t_w} \right] - \frac{0.6F_{aero}}{4} \quad (6)$$

$$F_{z_{r,r}} = m \left[\frac{gl_f + a_x h_{cg} + F_{aero} h_{aero}/m}{2(l_f + l_r)} + \frac{l_f a_y h_{cg}}{(l_f + l_r)t_w} \right] - \frac{0.6F_{aero}}{4} \quad (7)$$

Where h_{cg}, h_{aero}, g represent the acceleration of gravity, the height of the center of aerodynamic force from the road surface and the height of the center of mass from the road surface, respectively. The expression $0.6F_{aero}$ represents the aerodynamic force that is applied to the car in the vertical direction. In this research, it is assumed that this force is equally divided between the tires. Also, the coefficient $\mu_{k_{t,\varepsilon}}$ can also be calculated using the magical Pejka formula.

$$\mu_{k_{t,\varepsilon}} = \frac{\sigma_{k_{t,\varepsilon}}}{\sigma_{t,\varepsilon}} \mu_{t,\varepsilon} \cdot k \in \{x, y\} \cdot \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (8)$$

$$\mu_{t,\varepsilon} = D_{t,\varepsilon} \sin(C_{t,\varepsilon} \arctan(B_{t,\varepsilon} \sigma_{t,\varepsilon})) \cdot \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (9)$$

where $B_{t,\varepsilon}, C_{t,\varepsilon}, D_{t,\varepsilon}$ are fixed coefficients that are specific for the tire and road in question. Also, in this research, it is assumed that these coefficients are the same for four tires. $\sigma_{t,\varepsilon}$ represents the total slip of the tire, which is a function of the longitudinal and transverse slips of the tire.

$$\sigma_{t,\varepsilon} = \sqrt{\sigma_{x_{t,\varepsilon}}^2 + \sigma_{y_{t,\varepsilon}}^2} \cdot \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (10)$$

The longitudinal slip of each of the front or rear tires is a function of the longitudinal speed of the contact point of the tire with the road surface and the longitudinal speed equivalent to the rotation of the wheel and with The relationship number (11) can be defined.

$$\sigma_{x_{t,\varepsilon}} = \frac{v_{rw_{t,\varepsilon}} - v_{cw_{t,\varepsilon}}}{\max(v_{rw_{t,\varepsilon}}, v_{cw_{t,\varepsilon}})} \cdot \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (11)$$

The longitudinal speed of the point of contact of each tire with the road surface can be calculated with the help of relations (12) to (15).

$$v_{cw_{f,l}} = v_{cg} - r \left(\frac{T}{2} - l_f \beta \right) \quad (12)$$

$$v_{cw_{f,r}} = v_{cg} + r \left(\frac{T}{2} + l_f \beta \right) \quad (13)$$

$$v_{cw_{r,l}} = v_{cg} - r \left(\frac{T}{2} + l_r \beta \right) \quad (14)$$

$$v_{cw_{r,r}} = v_{cg} + r \left(\frac{T}{2} - l_r \beta \right) \quad (15)$$

Also, the longitudinal speed equivalent to the rotation of the wheel can also be calculated from equation (16).

$$v_{rw_{t,\varepsilon}} = r_{w_{t,\varepsilon}} \omega_{t,\varepsilon} \cdot \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (16)$$

In order to calculate the transverse slip of the tire, the slip angle of the tire ($\alpha_{t,\varepsilon}$) should be determined first, slip angles of the front and rear tires can be determined using the relations number (17) to (20).

$$\alpha_{f,l} = \delta - \arctan\left(\frac{v + rl_f}{u - rt_w/2}\right) \quad (17)$$

$$\alpha_{f,r} = \delta - \arctan\left(\frac{v + rl_f}{u + rt_w/2}\right) \quad (18)$$

$$\alpha_{r,l} = -\arctan\left(\frac{v - rl_r}{u - rt_w/2}\right) \quad (19)$$

$$\alpha_{r,r} = -\arctan\left(\frac{v - rl_r}{u + rt_w/2}\right) \quad (20)$$

The parameters of the vehicle dynamic model are presented in table (1).

Table 1 Vehicle Parameters

Parameter	Symbol	Value
m	kg	1411
C_d	-	0.45
I_w	kgm^2	2.6
t_w	m	1.48
l_f	m	1.56
l_r	m	1.04
h_s	m	0.54
I_z	kgm^2	2031.4

3. Control Algorithm

The proposed control algorithm has three levels. The first level includes the adaptive sliding mode control algorithm. The outputs of this level are the rotational torque. The second level includes a joint controller which is concerned with checking and analyzing the stability of the vehicle based on its phase plane, the speed of the side slip angle of the vehicle - the side slip angle of the vehicle in order to balance the range of the two controllers. In the third level, the final torque is calculated and the required torque distribution of the wheels is done.

4. Results and Discussion

In this section, the effectiveness and efficiency of the proposed adaptive sliding mode control algorithm system is validated. In this scenario, the friction coefficient of the road surface and tire is assumed to be 0.45. And the input of the wheel steering angle is considered. And the performance of the proposed control algorithm is investigated and analyzed with the sliding mode control algorithm. In this maneuver, the longitudinal speed of the car is considered to be 100 km/h. The steering wheel angle is assumed to be a sinusoidal curve with a period of 2 seconds and an amplitude of 50 degrees. Figure number (2) shows the sinusoidal input curve of the wheel steering angle. The results of the simulation can be shown in figures (2) to (6). According to Figures (3) and (4), when the car is not under control, the values of the rotation angle of the car around the yaw axis and the side slip angle of the car become very large. While the vehicle is under the sliding mode control algorithm and the adaptive sliding mode control algorithm system, the values of the rotation angle of the vehicle around the yaw axis and the

side slip angle of the vehicle are very close to the ideal values. And according to the simulation results, it is clear that the adaptive sliding mode control algorithm system creates a better effect on the system performance. The changes of the steering wheel angle can be seen in figure number (5) according to time. Figure number (6) shows the tracking of the vehicle's movement path. And according to the obtained results, it is quite clear that the car quickly loses its stability without the presence of the control algorithm. While the vehicle under the control of the sliding mode algorithm and the adaptive sliding mode algorithm system is able to track the specified and ideal value, and the adaptive sliding mode control algorithm system has the lowest amount of error in tracking the movement path compared to the sliding mode control algorithm. According to figures (9) and (10), when the car is not under control, although the driver tries to control the car to maintain stability, the car is in a state of losing control and exiting the stable state, and finally, seriously. It deviates from the expected driving path and becomes unstable. But when the car is under sliding mode control and the adaptive sliding mode control algorithm system, it is always in a stable state and the car is able to perform the double lane change maneuver in the desired state, and the proposed control algorithm system has good efficiency and effectiveness.

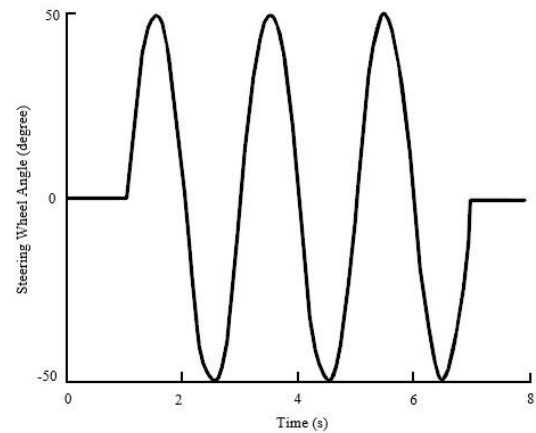


Figure 2 Steering wheel input

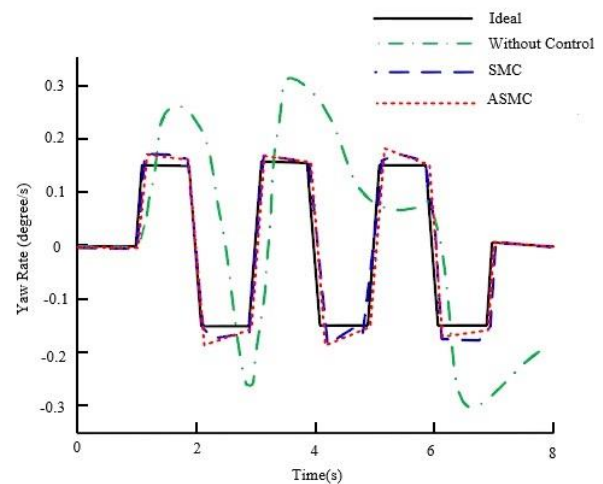


Figure 3 Changes of yaw rate over time

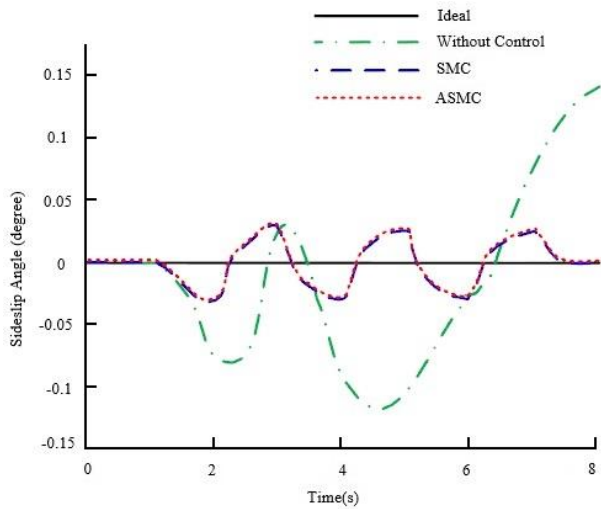


Figure 4 Changes of sideslip angle over time

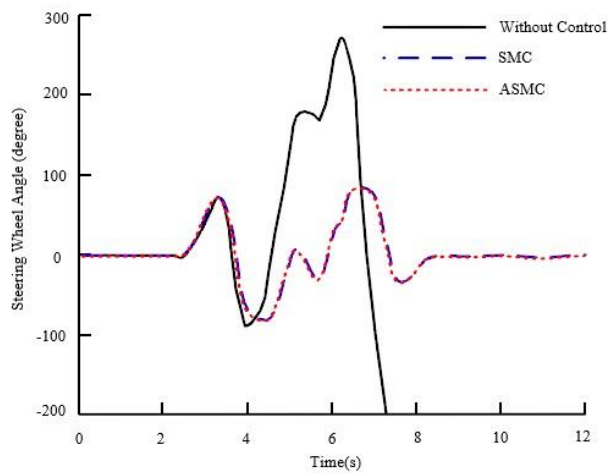


Figure 5 Changes of steering wheel angle over time

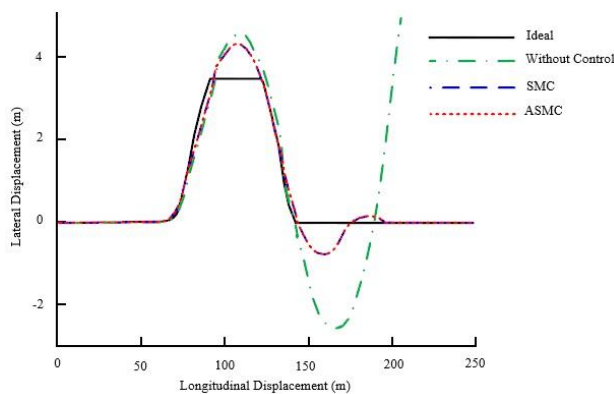


Figure 6 Vehicle tracking

5. Conclusions

In this research, an adaptive sliding mode control strategy based on the phase plane was proposed to stabilize the motor-in-wheel electric vehicle. The proposed control strategy includes three layers. The first layer includes the sliding mode control algorithm. In this research, the change of the system was done with the aim of eliminating the jump in the system and minimizing the response delay and tracking error. The second layer consists of a common

control algorithm, which was used to control the control algorithm of the first level based on the boundary model of the stability zone of the vehicle's side slip angle - the side slip angle of the vehicle. When the vehicle is in the stable zone, the adaptive sliding mode control algorithm uses the rotational angular velocity of the vehicle around the yaw axis to determine the rotational torque, and when the vehicle is outside the stable zone, the adaptive sliding mode control algorithm system uses the side slip angle. The car and the speed of the car's rotation angle around the yaw axis are used to stabilize and return the car to the stable area. The third layer includes an optimal torque distribution control algorithm that optimally distributes the rotational torque to the required torque of the four wheels of the electric vehicle. In this research, in order to consider the real behavior of the car, the nonlinear dynamic of the tire was implemented. The proposed control algorithm system was analyzed and investigated in different scenarios with different working conditions and emergency and critical conditions. In this article, in order to validate the results obtained from the simulation, the Simulink/MATLAB-Carsim software was used. The results of the performed simulations showed the optimal and effective performance of the proposed control algorithm system to stabilize and improve the steering of the motor-in-wheel electric vehicle.

In the continuation of this research and as future activities, it is possible to implement the proposed control algorithm in the discussion of collision avoidance. He also proposed an adaptive step-back method for the design of the upper layer controller in order to create a corrective torque.



پایاده سازی کنترل مقاوم مود لغزشی تطبیقی جهت پایدارسازی خودروی الکتریکی موتور در چرخ در شرایط اضطراری*

مقاله پژوهشی

رضا کاظمی^(۲)محمد امین قماش^(۱) 

doi 10.22067/jacsm.2024.84743.1209

چکیده در این پژوهش با هدف پایدارسازی خودروی الکتریکی موتور در چرخ، نسبت به توسعه یک استراتژی کنترل مقاوم مود لغزشی تطبیقی بر اساس صفحه فاز اقدام می‌گردد. استراتژی کنترل پیشنهادی شامل سه سطح می‌باشد. سطح اول شامل کنترلر مود لغزشی تطبیقی می‌باشد. در این پژوهش نسبت به تغییر وضعیت سیستم با هدف برطرف نمودن مشکل پرش در سیستم و به حداقل رساندن پاسخ تأخیر و خطای ردیابی اقدام می‌گردد. سطح دوم شامل یک الگوریتم کنترل مشترک می‌باشد که بر اساس مدل مرزی منطقه پایدار، صفحه فاز سرعت زاویه لغزشی جانبی خودرو - زاویه لغزش جانبی خودرو پایاده سازی می‌گردد. زمانی که خودرو در منطقه پایدار باشد، الگوریتم کنترلر مود لغزشی تطبیقی برای تعیین گشتاور چرخشی خودرو، از سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یابو استفاده می‌کند و هنگامی که خودرو خارج از منطقه پایدار قرار داشته باشد، الگوریتم کنترل مود لغزشی تطبیقی از زاویه لغزش جانبی خودرو و سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یابو، به منظور پایدارسازی و بازگرداندن خودرو به منطقه پایدار استفاده می‌کند. سطح سوم، شامل یک تابع توزیع بهینه جهت تخصیص گشتاور چرخشی به چهار تایر خودرو می‌باشد. به منظور در نظر گرفتن رفتار واقعی خودرو، دینامیک غیرخطی تأثیر لحاظ می‌گردد. الگوریتم کنترل پیشنهادی در سناریوهای مختلف با شرایط متفاوت کاری و شرایط بحرانی و اضطراری مورد تحلیل و بررسی واقع می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه سازی‌های انجام شده عملکرد مطلوب و اثربخش الگوریتم کنترل پیشنهادی را در پایدارسازی خودروی الکتریکی موتور در چرخ به نمایش می‌گذارد. همچنین جهت صحت‌گذاری شبیه سازی‌های انجام شده از نرم افزارهای متلب/کارسیم استفاده می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه سازی‌های انجام شده، اثربخشی الگوریتم کنترل پیشنهادی را در پایدارسازی خودروی الکتریکی موتور در چرخ به نمایش می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی مود لغزشی، پایداری، سطح لغزش، موتور در چرخ، دینامیک خودرو.

مقدمه

تحقیقات مناسبی داشته‌اند. با توجه به اهمیت مسائل ایمنی، بحث پایداری در خودروهای الکتریکی، یک مبحث جدی و پراهمیت به ویژه در شرایط و مانورهای اضطراری و خطرناک می‌باشد. در مانورهای بحرانی و اضطراری، جفت‌شدگی‌های بسیار قوی مابین دینامیک طولی و عرضی در چندین سطح دینامیک، سینماتیک و نیروهای تأیر وجود دارد. بنابراین، نیاز به یک سیستم کنترل پایدارساز که بتواند در این مانورها خودرو را هدایت نماید، به خوبی احساس می‌گردد. زمانی که خودروی الکتریکی موتور در چرخ با چهار چرخ مستقل در یک مسیر منحنی شکل با سرعت بالا دچار چرخش گردد یا به دلایلی در مسیر مستقیم با سرعت بالا دچار انحراف به سمت‌های جاده گردد. یک شتاب جانبی

در دهه اخیر با پیشرفت تکنولوژی‌های مرتبط، تولید خودروهای الکتریکی توسط خودروسازان مطرح دنیا و تقاضای رو به رشد مشتریان این خودروها سبب پررنگ شدن حضور آنها به سبب مصرف انرژی بسیار کمتر، آلایندگی کمتر در صنعت خودروسازی گردید. به طور همزمان با پیشرفت کنترل خودرو و احساس رانندگان در کمک به راندگی آنها به ویژه در شرایط بحرانی سبب گردید که خودروسازان مطرح دنیا نسبت به طراحی و تولید خودروهای الکتریکی اقدام نمایند. همچنین رویکرد به توسعه خودروهای خودران الکتریکی در کشورهای پیشرفته رو به رشد می‌باشد. لذا محققان نیز در پنج سال گذشته در این زمینه

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۷/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۱۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران. Email: m.ghomashi@email.kntu.ac.ir

(۲) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

قابل توجه و زاویه لغزش جانبی ایجاد می‌گردد که منجر به حوادث رانندگی شدید می‌گردد. مانند یک لغزش جانبی و یا بیش‌غلتي که اثرات شدید و مخربی بر روی پایداری و مانورپذیری خودرو می‌گذارد. بنابراین، جهت بهبود پایداری و مانورپذیری خودرو و اطمینان از ایمنی سرنشینان خودرو، بایستی در حین فرمان دادن به خودرو، سیستم کنترل در عملکرد خودرو اعمال گردد [4-1]. در برخی از پژوهش‌ها قابل مشاهده می‌باشد که کنترل گشتاور چرخشی خودرو می‌تواند سبب بهبود پایداری خودرو گردد [5,6]. روش کنترل مود لغزان به سبب استحکام و مقاوم بودن و راحتی در پیاده‌سازی به طور گسترده‌ای در مبحث مهندسی کنترل خودرو مورد استفاده واقع می‌گردد [9-7]. در سال‌های اخیر، پژوهشگران بیشتری نسبت به پیاده‌سازی روش کنترل مود لغزشی جهت کنترل پایداری خودرو اقدام کرده‌اند و به موفقیت‌های قابل قبولی هم دست یافته‌اند [12-10]. در پژوهشی نسبت به طراحی یک الگوریتم کنترل پیش‌بین جهت حصول گشتاور چرخشی اقدام شده است [13]. در پژوهش دیگری، نسبت به پیشنهاد روش کنترل مود لغزان فازی جهت بهبود ورودی کنترل و حصول گشتاور چرخشی اقدام گردیده است. [۱۴] در تحقیقاتی، اقدام به کاربرد الگوریتم کنترل مود لغزان به منظور کنترل پایداری شده است. در این پژوهش نرخ تغییر خطای متغیرها لحاظ نشده است و به همین دلیل دقت کنترل پایداری کاهش یافته است [15]. در تحقیق دیگری، تغییر خطای متغیرهای کنترل لحاظ شده است. ولی نسبت به تحلیل توزیع کننده گشتاور اقدامی نشده است [16]. در تحقیقاتی نسبت به بررسی و تحلیل کمی و کاستی‌های روش کنترل مود لغزشی اقدام شده است و اثر مسئله پرش در پایداری کنترلر بررسی گردیده است [17]. در پژوهشی، جهت سرکوب پرش در سیستم، از روش نرخ رویکرد نمایی در طراحی کنترل مود لغزشی استفاده شده است [18]. تابع اشباع به عنوان جایگزین تابع سیمبولیک جهت اطمینان از تداوم ورودی و حفظ دقت در سیستم و سرکوب پدیده پرش در سیستم در پژوهشی پیاده‌سازی گردیده است [19]. در تحقیقی روش کنترل مود لغزشی انتگرال‌گیر به منظور حصول گشتاور چرخشی مطلوب با کنترل زاویه لغزش جانبی خودرو و سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو به کار گرفته شده است [20]. یک الگوریتم کنترل غیرخطی بر اساس مدل مود لغزان و تئوری لیاپانوف برای حصول گشتاور

چرخشی اضافی ایدئال خودرو برای حفظ پایداری خودرو پیشنهاد گردیده است [21]. در پژوهشی نسبت به پیشنهاد یک روش کنترل مود لغزشی تطبیقی بهبود یافته در جهت تحلیل پایداری یک خودروی الکتریکی تجاری اقدام شده است [22] در برخی از تحقیقات، اقدام به تحلیل پایداری خودرو با استفاده از صفحه فاز شده است [25-23]. از صفحه فاز جهت تحلیل میزان تأثیر غیرخطی بودن رفتار تایلر بر روی مانورپذیری خودرو استفاده گردیده است و یک الگوریتم کنترل فرمان فعال یکپارچه جهت افزایش پایداری خودرو در شرایط پیچیده پیشنهاد شده است [26]. توزیع بردار گشتاور به همگرایی سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو به نقطه تعادل صفحه فاز کمک می‌کند [27] یک الگوریتم کنترل یکپارچه فرمان فعال در شرایط پیچیده جهت اطمینان از پایداری خودرو پیشنهاد گردیده است [28]. از قانون صفحه فاز به منظور تقسیم منطقه پایدار صفحه فاز خودرو در جهت تحلیل و ارزیابی پایداری خودرو استفاده شده است [29]. در پژوهشی بر اساس صفحه فاز نسبت به طراحی یک الگوریتم کنترل که بر اساس شبکه عصبی فازی و تناسبی، مشتق‌گیر، انتگرال‌گیر جهت گشتاور چرخشی خودرو برای حفظ پایداری اقدام گردیده است [30]. در پژوهشی بر اساس روش صفحه فاز بهینه شده، مناطق پایدار و روش مختلف کنترلی در مناطق مختلف در جهت هماهنگی مابین سیستم فرمان جلو فعال و سیستم کنترل گشتاور چرخشی به کار گرفته شده است [31]. در پژوهش دیگری نسبت به پیشنهاد الگوریتم کنترلر پایداری در ناحیه ناپایدار بر اساس دو صفحه فاز، صفحه فاز لغزش جانبی خودرو و صفحه فاز سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو اقدام شده است. الگوریتم کنترل پیشنهادی قادر به کنترل خودرو در ناحیه پایدار نمی‌باشد [32].

در تحقیقات فوق عمده‌تا از روش‌های مختلف کنترلی جهت بهبود پایداری چرخشی خودرو استفاده شده است. با این حال، هنوز برخی از مسائل برای بررسی و تحلیل در تحقیقات جاری وجود دارد. از یک طرف، به منظور طراحی الگوریتم کنترل مود لغزان، در اکثر پژوهش‌ها، قانون رسیدن سطح مود لغزشی از روش مختلفی استفاده شده است. با این حال، اغلب سطوح مودهای لغزشی به نرخ‌ها که مقادیر ثابتی می‌باشند، می‌رسند ولی سرعت رسیدن و سرکوب پرش در سیستم بحث چالش‌برانگیزی را مطرح می‌کند. از طرف دیگر، تعداد کمی پژوهش و تحقیق در

و بررسی عملکرد الگوریتم سیستم کنترل پیشنهادی اختصاص یافته است. در ادامه نیز نتیجه گیری ارائه گردیده است.

مدل دینامیکی

معادلات حرکت خودرو

در این پژوهش از مدل دو درجه آزادی که می تواند مقادیر سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو و زاویه لغزش جانبی خودرو را به دست دهد، استفاده می گردد. شکل شماره (۱) مدل دو درجه آزادی خودرو را نمایش می دهد [14]. با توجه به شکل شماره (۱)، معادلات به شرح روابط شماره (۱) و (۲) بیان می گردد [21].

$$\dot{r} = \frac{I_f C_f - I_r C_r}{I_z} \beta + \frac{I_f^2 C_f + I_r^2 C_r}{I_z u} r - \frac{I_f C_f}{I_z} \delta \quad (1)$$

$$\dot{\beta} = \frac{C_r + C_f}{mu} \beta - \left(1 + \frac{I_r C_r - I_f C_f}{mu^2}\right) r - \frac{C_f}{mu} \delta \quad (2)$$

که زاویه فرمان، زاویه لغزش جانبی خودرو و سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو به ترتیب با r, β, δ نشان داده می شود. همچنین فرض می گردد که خودرو تنها از طریق چرخ های جلو فرمان پذیر می باشد. فاصله مرکز جرم خودرو تا محور های جلو و عقب به ترتیب با نمادهای I_r و I_f معرفی می گردد. نیرو های تایلر نیز بر حسب مختصات محلی تایلر بیان می گردد. نیرویی که در راستای تایلر بوده با زیر نویس x و نیرویی که عمود بر تایلر می باشد با زیر نویس y مشخص می گردد. جرم خودرو و ممان اینرسی آن به ترتیب با m و I_z معرفی می گردد. سفتی گوشه تایر های جلو و عقب به ترتیب با C_r و C_f نمایش داده می شود. سرعت طولی خودرو با u معرفی می گردد.

زمانی که سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو و زاویه لغزش جانبی خودرو برابر صفر باشند، مقادیر ایدئال و مطلوب آن ها به شرح روابط شماره (۳) و (۴) حاصل می گردد [14].

$$r_{ref} = \min \left\{ |r_{max}| \cdot \left| \frac{u \delta}{(I_r + I_f)(Ku^2 + 1)} \right| \right\} \text{sign}(\delta) \quad (3)$$

$$\beta_{ref} = \min \left\{ |\beta_{max}| \cdot \left| \frac{(m I_f u^2) / (C_r (I_r + I_f)^2) + \frac{I_r}{I_r + I_f}}{1 + Ku^2} \right| \right\} \text{sign}(\delta) \quad (4)$$

مورد جفت شدگی مابین متغیر های کنترل مشاهده می گردد. به عنوان مثال، زاویه لغزش جانبی خودرو و سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو مؤلفه های اصلی سیستم کنترل می باشند. به دلیل جفت شدگی آن ها، جهت بهبود پایداری و مانور پذیری خودرو بایستی نسبت به کنترل آن ها به طور مشترک اقدام نمود. هدف از مطرح نمودن مسائل مطرح شده فوق، پیشنهاد یک سیستم الگوریتم کنترل مود لغزشی برای پایداری چرخشی خودرو بر اساس صفحه فاز زاویه لغزش جانبی خودرو - سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو می باشد. استراتژی کنترل پیشنهادی شامل سلسله مراتب و سطوحی می باشد. لایه بالایی شامل الگوریتم کنترل مود لغزشی تطبیقی می باشد. لایه میانی، شامل یک کنترلر مشترک می باشد که بر اساس مدل مرزی ناحیه پایدار صفحه فاز و با توجه به حالت های مختلف خودرو و روش های مختلف کنترلی جهت کنترل خودرو پیاده سازی می گردد. زمانی که خودرو در ناحیه پایدار می باشد، از کنترلر مود لغزشی تطبیقی برای سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو جهت تعیین و مشخص نمودن گشتاور چرخشی استفاده می گردد. زمانی که خودرو خارج از منطقه پایدار قرار داشته باشد، جهت تعیین گشتاور چرخشی توسط الگوریتم کنترل مود لغزشی، علاوه بر لحاظ سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو، نسبت به لحاظ زاویه لغزش جانبی خودرو نیز اقدام می گردد. لایه پایینی شامل یک الگوریتم کنترل توزیع بهینه گشتاور می باشد. که نسبت به تبدیل گشتاور چرخشی و توزیع بهینه گشتاور به چهار چرخ خودروی الکتریکی موتور در چرخ اقدام می گردد. در نهایت، با استفاده از نرم افزار های سیمولینک/متلب و کارسیم اقدام به شبیه سازی می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی های انجام شده، قابلیت های بالا و کارایی الگوریتم کنترل پیشنهادی را به نمایش می گذارد و به طور مؤثر خطای مابین واقعی و ایدئال را کاهش می دهد و سبب تقویت پایداری خودرو در زمان فرمان دادن می گردد.

ساختار بخش های مختلف این پژوهش به شرح ذیل می باشد. در ادامه مدل دینامیکی خودرو و دینامیک تایلر به تفصیل در بخش دوم ارائه شده اند. بخش بعد به بیان جزئیات صفحه فاز مورد استفاده در سیستم کنترلی می پردازد. در بخش چهارم، به شرح جزئیات الگوریتم کنترل طراحی شده که شامل سه سطح می باشد، پرداخته می شود. بخش چهارم به بیان نتایج حاصل از شبیه سازی

و

که

$$s = (1 - \sigma_{x_{t,\varepsilon}}) \left[\frac{\mu_{k_{t,\varepsilon}} F_{z_{t,\varepsilon}} (1 - u \sqrt{\sigma_{x_{t,\varepsilon}}^2 + (\tan \alpha)^2})}{2 \sqrt{C_{t,\varepsilon}^2 \sigma_{x_{t,\varepsilon}}^2 + C_{t,\varepsilon}^2 (\tan \alpha)^2}} \right] \quad (12)$$

که $F_{z_{t,\varepsilon}}$ معرف بار عمودی هر یک از تایرهای جلو و عقب بوده و $\mu_{k_{t,\varepsilon}}$ نیز بیانگر ضریب اصطکاک طولی یا عرضی تایر می باشد. نیروی عمودی تایر با روابط شماره (۱۳) الی (۱۶) توصیف می گردد [14].

$$F_{z_{f,l}} = m \left[\frac{gl_r - a_x h_{cg} - F_{aero} h_{aero}/m}{2(l_r + l_f)} - \frac{l_r a_y h_{cg}}{(l_r + l_f) t_w} \right] - \frac{0.6 F_{aero}}{4} \quad (13)$$

$$F_{z_{f,r}} = m \left[\frac{gl_r - a_x h_{cg} - F_{aero} h_{aero}/m}{2(l_r + l_f)} + \frac{l_r a_y h_{cg}}{(l_r + l_f) t_w} \right] - \frac{0.6 F_{aero}}{4} \quad (14)$$

$$F_{z_{r,l}} = m \left[\frac{gl_f + a_x h_{cg} + F_{aero} h_{aero}/m}{2(l_r + l_f)} - \frac{l_f a_y h_{cg}}{(l_r + l_f) t_w} \right] - \frac{0.6 F_{aero}}{4} \quad (15)$$

$$F_{z_{r,r}} = m \left[\frac{gl_f + a_x h_{cg} + F_{aero} h_{aero}/m}{2(l_r + l_f)} + \frac{l_f a_y h_{cg}}{(l_r + l_f) t_w} \right] - \frac{0.6 F_{aero}}{4} \quad (16)$$

که g ، h_{aero} و h_{cg} به ترتیب معرف شتاب جاذبه، ارتفاع مرکز اعمال نیروی آیرودینامیکی از سطح جاده و ارتفاع مرکز جرم از سطح جاده می باشد. عبارت $0.6 F_{aero}$ بیانگر نیروی آیرودینامیکی می باشد که در جهت قائم به خودرو اعمال می گردد [21]. در این پژوهش فرض می شود که این نیرو به صورت برابر بین تایرها تقسیم شده است. همچنین ضریب $\mu_{k_{t,\varepsilon}}$ نیز می تواند با استفاده از روابط شماره (۱۷) و (۱۸) محاسبه گردد [31].

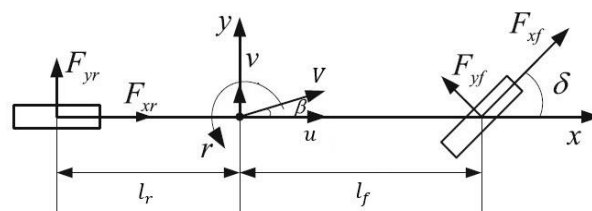
$$\mu_{k_{t,\varepsilon}} = \frac{\sigma_{k_{t,\varepsilon}}}{\sigma_{t,\varepsilon}} \mu_{t,\varepsilon} \cdot k \in \{x, y\} \cdot \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (17)$$

$$\mu_{t,\varepsilon} = D_{t,\varepsilon} \sin(C_{t,\varepsilon} \arctan(B_{t,\varepsilon} \sigma_{t,\varepsilon})) \cdot \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (18)$$

$$|\beta_{\max}| = \mu g \left(\frac{l_r}{u^2} + \frac{m l_f}{C_r (l_f + l_r)} \right) \quad (5)$$

$$|r_{\max}| = \frac{\mu g}{u} \quad (6)$$

که μ ضریب اصطکاک سطح جاده و تایر می باشد.



شکل ۱ مدل دینامیک دو درجه آزادی خودرو [14]

معادله چرخ

چرخ یکی از زیرسیستم ها در تحلیل رفتار دینامیکی خودرو در حالت های شتاب گیری و ترمز گیری می باشد. معادله حرکت چرخ را می توان با رابطه شماره (۷) بیان نمود [14].

$$I_w \frac{d\omega_j}{dt} = T_{d_j} - T_{b_j} - F_{x_j} R - T_{Roll} \quad (7)$$

که I_w ممان اینرسی دورانی چرخ، F_x نیروی طولی تایر، R شعاع مؤثر چرخ، ω_j سرعت دورانی چرخ و T_{d_j} ، T_{b_j} به ترتیب معرف گشتاور ترمزی و رانشی می باشد. همچنین گشتاور مقاوم غلتشی نیز با استفاده از رابطه شماره (۸) قابل محاسبه می باشد [21].

$$T_{Roll} = f_r R F_z \quad (8)$$

که f_r و F_z به ترتیب معرف مقاومت غلتشی تایر و نیروی نرمال تایر می باشد.

دینامیک تایر

با فرض وابستگی خطی نیروی اصطکاک تایرها به نیروی عمودی هر تایر، می توان نیروهای طولی و عرضی تایر را با روابط شماره (۹) و (۱۰) بیان کرد [21].

$$F_{x_{t,\varepsilon}} = C_{t,\varepsilon} \frac{\sigma_{x_{t,\varepsilon}}}{1 - \sigma_{x_{t,\varepsilon}}} f(s) \quad \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (9)$$

$$F_{y_{t,\varepsilon}} = C_{t,\varepsilon} \frac{\sigma_{x_{t,\varepsilon}} \tan \alpha}{1 - \sigma_{x_{t,\varepsilon}}} f(s) \quad \tau \in \{f, r\} \cdot \varepsilon \in \{l, r\} \quad (10)$$

که

$$f(s) = \begin{cases} s(2-s) & s < 1 \\ 1 & s \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

حالت اول ($\sigma_{x_{t,\varepsilon}} \leq 0$):

$$\sigma_{y_{t,\varepsilon}} = \frac{v_{rw_{t,\varepsilon}} \sin(\alpha_{t,\varepsilon})}{v_{cw_{t,\varepsilon}}}, \quad \tau \in \{f, r\}, \varepsilon \in \{l, r\} \quad (30)$$

حالت دوم ($\sigma_{x_{t,\varepsilon}} > 0$):

$$\sigma_{y_{t,\varepsilon}} = \tan(\alpha_{t,\varepsilon}), \quad \tau \in \{f, r\}, \varepsilon \in \{l, r\} \quad (31)$$

پارامترهای مدل دینامیکی خودروی مورد نظر در جدول شماره (۱) ارائه شده‌اند.

جدول ۱ پارامترهای خودرو [14]

نماد پارامتر	واحد	مقدار
m	kg	۱۴۱۱
C _d	-	۰/۴۵
I _w	kgm ²	۲/۶
t _w	m	۱/۴۸
a	m	۱/۵۶
b	m	۱/۰۴
h _s	m	۰/۵۴
I _z	kgm ²	۲۰۳۱/۴
A _F	m ²	۲/۰۷

پیاده‌سازی صفحه فاز

زمانی که خودرو در شرایط ناپایدار می‌باشد، صفحه فاز زاویه لغزش جانبی خودرو - زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو مستعد اشتباه در محاسبات می‌باشد. ولی صفحه فاز زاویه لغزش جانبی خودرو - سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو دارای دقت بیشتری می‌باشد [33]. بنابراین در این پژوهش، صفحه فاز سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو - زاویه لغزش جانبی خودرو به عنوان معیاری برای ناپایداری خودرو پیاده‌سازی می‌گردد. با توجه به مدل دو درجه آزادی خودرو، زاویه لغزش جانبی خودرو و سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو به عنوان متغیرها حاصل می‌گردد و سیستم مرتبه دوم به شرح روابط شماره (۳۲) و (۳۳) بیان می‌گردد [23].

$$\dot{\beta} = g_1(\beta, r) \quad (32)$$

$$\dot{r} = g_2(\beta, r) \quad (33)$$

که g_1 و g_2 به ترتیب توابع بیانگر $\dot{\beta}$ و $\dot{r}$ می‌باشند. با توجه به رابطه‌های شماره (۳۲) و (۳۳)، صفحه فاز سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو - زاویه لغزش جانبی خودرو حاصل شده در شکل شماره (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

که $B_{t,\varepsilon}, C_{t,\varepsilon}, D_{t,\varepsilon}$ ضرایب ثابتی هستند که برای تایر و جاده مورد نظر مشخص می‌باشند. همچنین در این پژوهش فرض می‌شود که این ضرایب برای چهار تایر یکسان باشند. $\sigma_{t,\varepsilon}$ بیانگر لغزش کل تایر بوده که تابعی از لغزش‌های طولی و عرضی تایر می‌باشد [31].

$$\sigma_{t,\varepsilon} = \sqrt{\sigma_{x_{t,\varepsilon}}^2 + \sigma_{y_{t,\varepsilon}}^2}, \quad \tau \in \{f, r\}, \varepsilon \in \{l, r\} \quad (19)$$

لغزش طولی هر یک از تایرهای جلو یا عقب تابعی از سرعت طولی نقطه تماس تایر با سطح جاده ($v_{cw_{t,\varepsilon}}$) و سرعت طولی معادل دوران چرخ ($v_{rw_{t,\varepsilon}}$) بوده و با رابطه شماره (۲۰) قابل تعریف می‌باشد [31].

$$\sigma_{x_{t,\varepsilon}} = \frac{v_{rw_{t,\varepsilon}} - v_{cw_{t,\varepsilon}}}{\max(v_{rw_{t,\varepsilon}}, v_{cw_{t,\varepsilon}})}, \quad \tau \in \{f, r\}, \varepsilon \in \{l, r\} \quad (20)$$

سرعت طولی نقطه تماس هر یک از تایرها با سطح جاده را می‌توان با کمک روابط شماره (۲۱) الی (۲۴) محاسبه نمود [32].

$$v_{cw_{f,l}} = v_{cg} - r \left(\frac{T}{2} - l_f \beta \right) \quad (21)$$

$$v_{cw_{f,r}} = v_{cg} + r \left(\frac{T}{2} + l_f \beta \right) \quad (22)$$

$$v_{cw_{r,l}} = v_{cg} - r \left(\frac{T}{2} + l_r \beta \right) \quad (23)$$

$$v_{cw_{r,r}} = v_{cg} + r \left(\frac{T}{2} - l_r \beta \right) \quad (24)$$

همچنین سرعت طولی معادل دوران چرخ نیز از رابطه شماره (۲۵) قابل محاسبه می‌باشد [33].

$$v_{rw_{t,\varepsilon}} = r_{w_{t,\varepsilon}} \omega_{t,\varepsilon}, \quad \tau \in \{f, r\}, \varepsilon \in \{l, r\} \quad (25)$$

که $\omega_{t,\varepsilon}$ سرعت دورانی چرخ می‌باشد.

جهت محاسبه لغزش عرضی تایر، ابتدا باید زاویه لغزش تایر ($\alpha_{t,\varepsilon}$) معین گردد [34]. زاویه‌های لغزش تایرهای جلو و عقب را می‌توان با استفاده از روابط شماره (۲۶) الی (۲۹) تعیین نمود.

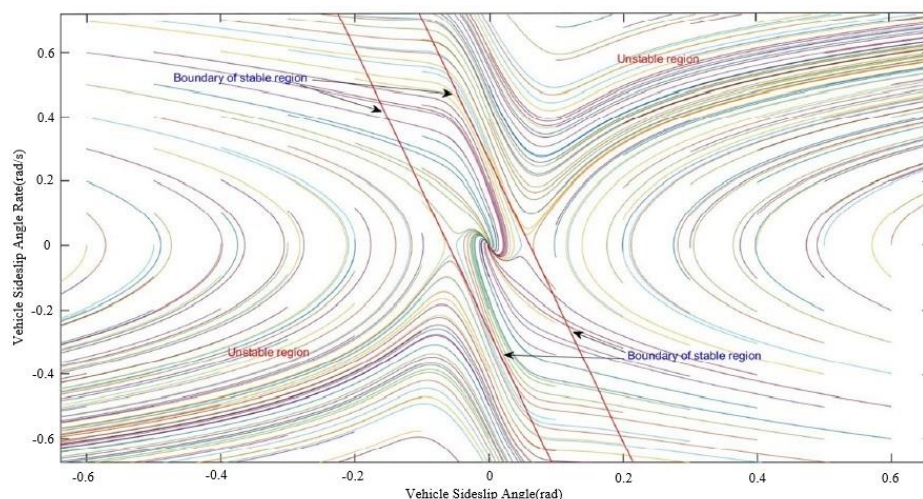
$$\alpha_{f,l} = \delta - \arctan\left(\frac{v + rl_f}{u - rt_w/2}\right) \quad (26)$$

$$\alpha_{f,r} = \delta - \arctan\left(\frac{v + rl_f}{u + rt_w/2}\right) \quad (27)$$

$$\alpha_{r,l} = -\arctan\left(\frac{v - rl_r}{u - rt_w/2}\right) \quad (28)$$

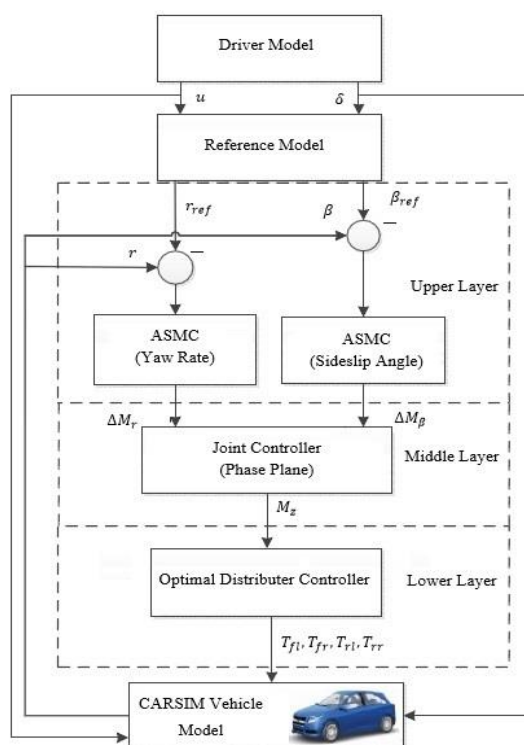
$$\alpha_{r,r} = -\arctan\left(\frac{v - rl_r}{u + rt_w/2}\right) \quad (29)$$

حال که زاویه لغزش مشخص گردید، با کمک روابط (۳۰) و (۳۱) می‌توان لغزش عرضی را محاسبه نمود [21].



شکل ۲ صفحه فاز لغزش جانبی خودرو

الگوریتم کنترل مود لغزشی تطبیقی را شامل می شود که خروجی های این سطح، گشتاور چرخشی می باشد. سطح دوم، شامل یک کنترلر مشترک می باشد که نسبت به بررسی و تحلیل پایداری خودرو بر اساس صفحه فازش سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو - زاویه لغزش جانبی خودرو جهت متعادل نمودن دامنه دو کنترلر می پردازد. در سطح سوم نسبت به محاسبه گشتاور نهایی و توزیع گشتاورهای مورد نیاز چرخ ها اقدام می گردد.



شکل ۳ ساختار کنترل پایداری

جهت نشان دادن منطقه پایداری، از دو خط موازی متقارن برای تقسیم مسیر فاز به ناحیه های پایدار و ناپایدار استفاده می شود. منطقه ای که توسط دو خط مرزی احاطه شده است، منطقه پایدار می باشد که در شکل شماره (۲) نشان داده شده است. معادله مرزی به شرح رابطه شماره (۳۴) بیان می گردد [24].

$$|\beta + \eta\beta| \leq \varphi \quad (34)$$

که η نمایانگر شیب خط مرزی می باشد. نقطه قطع خط مرزی با φ نشان داده می شود. مقادیر به عوامل مؤثر بر صفحه فاز مربوط می باشد. در کاربرد عملی، تأثیر زاویه فرمان چرخ جلو بر روی مرز پایداری صفحه فاز سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو - زاویه لغزش جانبی خودرو را می توان در نظر نگرفت [27]. بنابراین در این پژوهش تنها تأثیر ضریب اصطکاک سطح جاده و تأیر لحاظ می گردد. با افزایش ضریب اصطکاک سطح جاده و تأیر، رهگیری مرز پایدار φ افزایش می یابد. و شیب η کاهش می یابد. بنابراین ناحیه پایدار با افزایش ضریب اصطکاک سطح جاده و تأیر، که با وضعیت واقعی تطابق دارد، افزایش می یابد. با توجه به رابطه شماره (۳۴) و لحاظ روابط شماره (۳۵) و (۳۶)، معادلات مرزی تکمیل می گردد [25].

$$\eta = 0.785\mu^2 - 3.798\mu - 0.637 \quad (35)$$

$$\varphi = 0.0792\mu^2 - 0.149\mu + 0.035 \quad (36)$$

طراحی الگوریتم کنترل پایداری

الگوریتم کنترل پیشنهادی دارای سه سطح می باشد. سطح اول،

$$\dot{S}_{r0} = -K_{r0}\text{sign}(S_r) - \tau_r S_r \quad (42)$$

که

$$K_{r0} = \frac{\lambda}{\varepsilon} + (1 + \frac{1}{|e_r|} - \varepsilon)e^{-\zeta|S_r|} \quad (43)$$

که پارامترهای $\lambda > 0$ ، $\zeta > 0$ ، $0 < \varepsilon < 1$ می‌باشد. اگر وضعیت سیستم از سطح لغزش دور باشد، $|S_r| \rightarrow \infty$ و K_{r0} تمایل به مقدار ثابت (λ/ε) دارد. بنابراین سرعت نزدیک شدن افزایش می‌یابد. در حالیکه اگر وضعیت سیستم به سطح مود لغزشی نزدیک باشد، $|S_r| \rightarrow 0$ و K_{r0} به مقدار ثابت $(\lambda/\varepsilon + 1/|e_r| + 1 - \varepsilon)$ میل می‌کند. با کاهش e_r ، سرعت نزدیک شدن به تدریج به صفر نزدیک می‌شود، بنابراین به طور اثربخشی مسئله پرش و نوسانات در سیستم کاهش می‌یابد. با وارد نمودن روابط شماره (۳)، (۴)، (۳۷) و (۳۸) در رابطه شماره (۳۹)، رابطه شماره (۴۴) به عنوان مشتق سطح لغزش حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned} \dot{S}_r &= C_r \dot{e}_r + \ddot{e}_r = C_r \dot{e}_r + \ddot{r} - \ddot{r}_{ref} \\ &= C_r \dot{e}_r + \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z} (\beta) + \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z} (\delta) + \frac{M_r}{I_z} - \ddot{r}_{ref} \end{aligned} \quad (44)$$

گشتاور چرخشی در رابطه شماره (۴۵) قابل توصیف می‌باشد.

$$\begin{aligned} M_r &= -I_z [C_r \dot{e}_r - \ddot{r}_{ref} + K_{r0} \text{sign}(S_r) + \tau_r S_r] + \\ &(l_f C_f - l_r C_r) \beta + \left(\frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{u} \right) \dot{r} - (l_f C_f) \delta \end{aligned} \quad (45)$$

در این پژوهش به منظور سرکوب بیشتر پدیده پرش و نوسانات در سیستم، به جای تابع علامت، تابع اشباع که در رابطه شماره (۴۶) بیان گردیده است، پیاده‌سازی می‌گردد.

$$\text{sat}(S_r) = \begin{cases} 1 & S_r > Q \\ K_\phi S_r & |S_r| \leq Q \cdot K_\phi = (1/Q) \\ 1 & S_r < -Q \end{cases} \quad (46)$$

که Q لایه مرزی می‌باشد و K_ϕ یک ثابت می‌باشد.

الگوریتم کنترل مود لغزشی جهت زاویه لغزش جانبی خودرو

زاویه لغزش جانبی خودرو بیشترین حساسیت را نسبت به

الگوریتم کنترل مود لغزشی جهت سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو

جهت طراحی الگوریتم کنترل مود لغزشی، نسبت به طراحی سطح لغزش اقدام می‌گردد. ویژگی‌های مود لغزشی سبب استحکام سیستم در مقابل اغتشاش‌های خارجی می‌گردد. با توجه به مدل دینامیکی خودرو، رابطه (۱) و (۲) بازنویسی می‌گردد. که رابطه (۳۷) و (۳۸) حاصل می‌گردد [21].

$$\dot{r} = \frac{l_r^2 C_r + l_f^2 C_f}{I_z u} r + \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z} \beta - \frac{l_f C_f}{I_z} \delta + \frac{M_j}{I_z} \quad (37)$$

$$\dot{\beta} = - \left(\frac{l_r C_r - l_f C_f}{mu^2} + 1 \right) r + \frac{C_r + C_f}{mu} \beta - \frac{C_f}{mu} \delta \quad (38)$$

که M_j گشتاور چرخشی اضافی می‌باشد. z مربوط به متغیر کنترل می‌باشد. زمانی که متغیر کنترل، سرعت زاویه چرخشی حول محور یاو باشد، $z = r$ لحاظ می‌گردد. و هنگامی که متغیر کنترل زاویه لغزش جانبی خودرو می‌باشد، $z = \beta$ لحاظ می‌شود. سطح لغزش الگوریتم کنترل به صورت رابطه شماره (۳۹) تعریف می‌گردد.

$$S_r = C_r e_r + \dot{e}_r \quad (39)$$

با انجام عملیات مشتق‌گیری از رابطه شماره (۳۹)، رابطه شماره (۴۰) به عنوان مشتق سطح لغزش بیان می‌گردد.

$$\dot{S}_r = C_r \dot{e}_r + \ddot{e}_r \quad (40)$$

که e_r بیانگر خطای مابین مقدار واقعی و ایده‌آل متغیر کنترل می‌باشد. C_r ضریب وزنی می‌باشد. در این پژوهش یک قانون رویکرد مود لغزشی با ویژگی‌های رویکرد نمایی جهت سرکوب و خنثی نمودن پدیده پرش در سیستم به شرح رابطه شماره (۴۱) پیشنهاد می‌گردد.

$$\dot{S}_r = -K_r \text{sign}(S_r) - \tau_r S_r \quad (41)$$

که K_r و τ_r مقادیر ثابت مثبت می‌باشند. اگر K_r یک مقدار ثابت لحاظ گردد، کنترلر قادر به حصول اطمینان جهت قانون رسیدن برای سرکوب پدیده پرش در سیستم نمی‌باشد. بنابراین در این پژوهش جهت حل مشکل، K_r به صورت یک پارامتر تطبیقی که با تغییر حالت سیستم تغییر می‌کند، مورد طراحی واقع می‌گردد.

(۵۲)

پس از لحاظ گشتاور چرخشی M_r ، رابطه شماره (۵۳) قابل تعریف می باشد.

$$\dot{V} = S_r[-K_{r0}\text{sign}(S_r)] = \begin{cases} -K_{r0}|S_r| & |S_r| > Q \\ -K_{r0}K_r S_r^2 & |S_r| \leq Q \end{cases} \quad (53)$$

اگر $K_r > 0$ ، $K_{r0} > 0$ ، $\dot{V} \leq 0$ برقرار باشد، سیستم پایدار خواهد بود.

الگوریتم کنترل مشترک

میزان خروجی الگوریتم کنترلر سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاو به عنوان گشتاور چرخشی نهایی در منطقه کنترل پایداری لحاظ می گردد. میزان خروجی الگوریتم کنترلر زاویه لغزش جانبی خودرو به عنوان گشتاور چرخشی نهایی در منطقه کنترل ناپایدار لحاظ می گردد. عملکرد دو الگوریتم کنترلی به طور مشترک و هماهنگ در منطقه کنترل هماهنگ نسبت به لحاظ گشتاور چرخشی نهایی در نظر گرفته می شود. تقسیم بندی دامنه کنترل صفحه فاز سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو - زاویه لغزش جانبی خودرو در شکل (۴) نمایش داده می شود. با توجه به شکل، دو منحنی موازی قرمز رنگ، خطوط مرزی منطقه پایداری می باشند. دو خط چین موازی آبی رنگ، خطوط مرزی منطقه کنترل مشترک می باشد و منطقه های پایدار، ناپایدار و منطقه کنترل مشترک مشخص می باشد. زمانی که میزان μ کاهش می یابد، محدوده ناحیه پایداری صفحه فاز کاهش می یابد، بنابراین شرایط مرزی منطقه کنترل مشترک به شرح رابطه شماره (۵۴) قابل تعریف می باشد [24].

$$\mu \leq \left| \frac{1}{p}(\dot{\beta}) + \frac{E}{p}(\beta) \right| \leq 1 \quad (54)$$

در حوزه کنترل مشترک، دو الگوریتم کنترل مود لغزشی تطبیقی با هم همکاری مشترک و هماهنگی را دنبال می کنند. ضریب وزنی برای متعادل نمودن نسبت های دو الگوریتم کنترل تعریف می گردد. پس از لحاظ ضریب وزنی، در رابطه شماره (۵۵) نسبت به تعریف گشتاور چرخشی مجموع اقدام می گردد.

فرمان پذیری خودرو دارد [27]. بنابراین، جهت طراحی الگوریتم کنترل پیشنهادی نسبت به تعریف سطح لغزش جهت ممانعت از بزرگ شدن زاویه لغزش جانبی واقعی خودرو اقدام می گردد. سطح لغزش در رابطه شماره (۴۷) توصیف می گردد.

$$S_\beta = C_\beta e_\beta + \dot{e}_\beta \quad (47)$$

بعد از انجام فرایند مشتق گیری، مشتق سطح لغزش در رابطه شماره (۴۸) بیان می گردد.

$$\dot{S}_\beta = C_\beta \dot{e}_\beta + \ddot{e}_\beta \quad (48)$$

با توجه به رابطه های شماره (۴۲) و (۴۳)، وضعیت رویکرد مود لغزشی به صورت رابطه شماره (۴۹) تعریف می گردد.

$$\dot{S}_\beta = -K_{\beta 0}\text{sign}(S_\beta) - \tau_\beta S_\beta \quad (49)$$

با لحاظ روابط شماره (۳۷) و (۳۸) در رابطه شماره (۴۷)، گشتاور چرخشی در حالت زاویه لغزش جانبی خودرو در رابطه شماره (۵۰) قابل بیان می باشد.

$$M_\beta = I_f C_f \delta - (I_f C_f - I_r C_r) \beta - \frac{I_f^2 C_f + I_r^2 C_r}{u} (r) - I_z \left(K_{\beta 0} \text{sat}(S_\beta) + \tau_\beta S_\beta + C_\beta \dot{e}_\beta + \frac{C_r + C_f}{\mu u} (\dot{\beta}) - \frac{C_f}{\mu u} (\delta) - \ddot{\beta}_{\text{ref}} \right) / \left(\frac{I_f C_f - I_r C_r}{\mu u^2 - 1} \right) \quad (50)$$

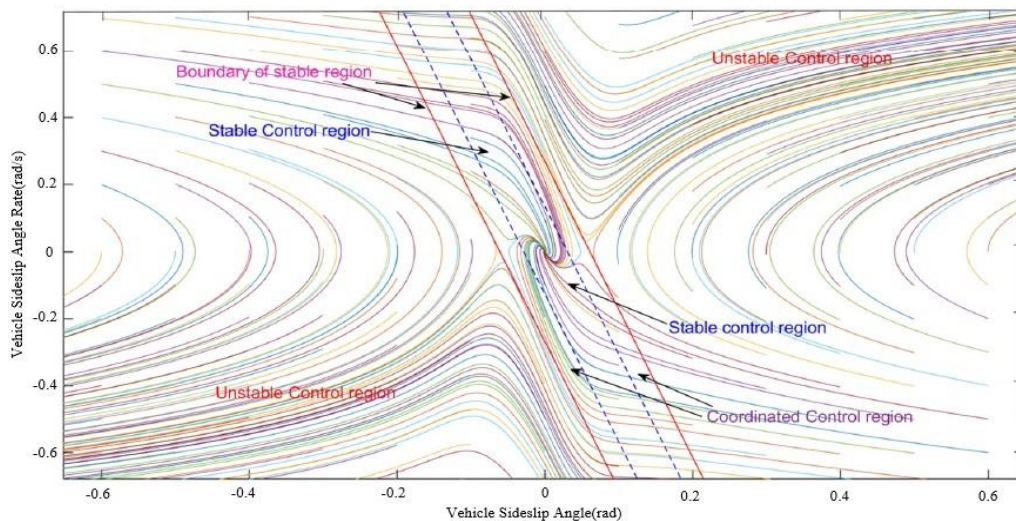
تحلیل پایداری الگوریتم کنترل

برای تحلیل و بررسی پایداری سیستم الگوریتم کنترل پیشنهادی، نسبت به تعریف تابع لیاپانوف به شرح رابطه شماره (۵۱) اقدام می گردد.

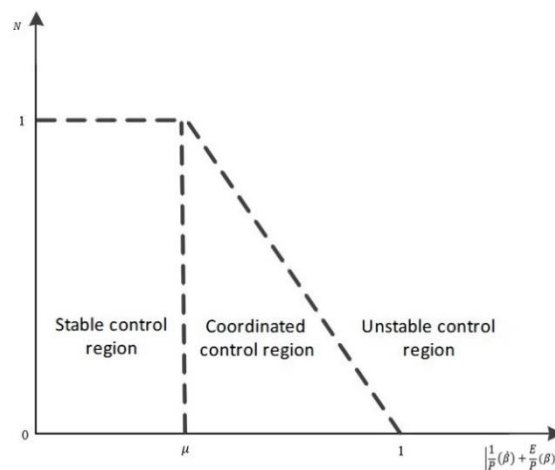
$$V = 0.5 S^2 \quad (51)$$

پس از انجام فرایند مشتق گیری، رابطه شماره (۵۲) حاصل می گردد.

$$\dot{V} = S_r \dot{S}_r = S_r \left[C_r \dot{e}_r + \frac{I_f C_f - I_r C_r}{I_z} (\dot{\beta}) + \frac{I_f^2 C_f + I_r^2 C_r}{u I_z} (\dot{r}) - \frac{I_f C_f}{I_z} (\delta) + \frac{M_r}{I_z} - \ddot{r}_{\text{ref}} \right]$$



شکل ۴ صفحه فاز سرعت لغزش جانبی خودرو - دلغزش جانبی خودرو



شکل ۵ رابطه مابین ضریب وزنی N و دامنه کنترل صفحه فاز سرعت لغزش جانبی خودرو - لغزش جانبی خودرو

$$M_z = \min\{M_{u_{\max}}, M_u\} \quad (57)$$

شکل (۵) بیانگر رابطه مابین ضریب وزنی N و دامنه کنترل صفحه فاز سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو - لغزش جانبی خودرو (مرز پایداری) می باشد.

توزیع گشتاور چرخشی بهینه

در لایه پایینی الگوریتم کنترل پیشنهادی از یک تابع توزیع بهینه استفاده می گردد. در این بخش نسبت به مسئله توزیع گشتاور چرخشی که تخصیص گشتاور چرخشی به هر تایر می باشد پرداخته می شود. گشتاور چرخشی M_z را می توان به صورت رابطه شماره (۵۸) بازنویسی و بیان نمود.

$$M_u = NM_r + (1 - N)M_\beta \quad (55)$$

رابطه مابین ضریب وزنی N و مرز پایداری در شکل شماره (۵) قابل نمایش می باشد. حداکثر گشتاور چرخشی قابل دسترس در رابطه شماره (۵۶) بیان می گردد.

$$M_{u_{\max}} = t\mu (F_{x_{fr}} + F_{x_{rr}} - F_{x_{fl}} - F_{x_{rl}})/2 \quad (56)$$

که $F_{x_{fr}}, F_{x_{rr}}, F_{x_{fl}}, F_{x_{rl}}$ به ترتیب بیانگر نیروهای طولی چهار چرخ خودروی الکتریکی موتور در چرخ می باشد. فاصله مابین چرخ های چپ و راست خودرو با t نمایش داده می شود. میزان حداکثر گشتاور چرخشی و میزان گشتاور چرخشی مورد مقایسه واقع می گردد و مقدار کوچک تر به عنوان گشتاور چرخشی نهایی به سطح پایینی سیستم الگوریتم کنترل تحویل داده می شود.

در اینجا، w_1 به عنوان تابعی از نیروی نرمال که متناسب با نیروی عمودی تایرها طراحی شده است و با افزایش نیروی عمودی، افزایش می‌یابد.

$$w_{1ij} = \frac{F_z}{F_{zij}} \quad (66)$$

که $F_z = \frac{mg}{4}$ و F_{zij} معرف نیروی عمودی هر تایر می‌باشد که در رابطه‌های شماره (۶۰) الی (۶۳) قابل تعریف می‌باشد.

$$F_{zfl} = b \left[\frac{mg}{2(a+b)} + \frac{m a_y h}{2t_w(a+b)} \right] - \frac{m a_x h}{2(a+b)} \quad (67)$$

$$F_{zfr} = b \left[\frac{mg}{2(a+b)} - \frac{m a_y h}{2t_w(a+b)} \right] - \frac{m a_x h}{2(a+b)} \quad (68)$$

$$F_{zrl} = a \left[\frac{mg}{2(a+b)} + \frac{m a_y h}{2t_w(a+b)} \right] + \frac{m a_x h}{2(a+b)} \quad (69)$$

$$F_{zrl} = a \left[\frac{mg}{2(a+b)} - \frac{m a_y h}{2t_w(a+b)} \right] + \frac{m a_x h}{2(a+b)} \quad (70)$$

که g معرف شتاب گرانشی می‌باشد. ارتفاع مرکز جرم خودرو با h نمایش داده می‌شود. شتاب‌های طولی و عرضی خودرو به ترتیب با a_x و a_y نشان داده می‌شود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی

در این پژوهش، نسبت به تحلیل و بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در مانورهای مختلف اقدام می‌گردد. جهت صحت‌گذاری شبیه‌سازی‌های انجام شده تحت شرایط چسبندگی متفاوت سطح جاده با سرعت‌های مختلف از نرم‌افزارهای متلب/کارسیم استفاده می‌گردد. جهت بررسی شبیه‌سازی‌های انجام شده، نسبت به پیاده‌سازی سناریوهای مختلف اقدام می‌گردد. همچنین یک مدل راننده در سیمولینک/متلب جهت شبیه‌سازی و اشتراک با کارسیم ایجاد شده است. ورودی‌های زاویه فرمان متفاوت بر اساس مدل راننده ایجاد شده، مورد استفاده واقع می‌گردد. در بخش اول، در سناریو تعریف شده، جهت تحلیل و مقایسه عملکرد الگوریتم کنترل مود لغزشی تطبیقی و کنترل مود لغزشی و نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، ورودی زاویه فرمان سینوسی فرض می‌گردد. در بخش دوم، نسبت به پیاده‌سازی یک مانور تعویض خط جهت تحلیل عملکرد الگوریتم کنترل پیشنهادی و نشان دادن اثربخشی سیستم الگوریتم پیشنهادی اقدام می‌گردد. همچنین شایان ذکر می‌باشد که عملکرد کنترل مود لغزشی تطبیقی با نماد ASMC و عملکرد کنترل مود لغزشی با نماد SMC در شکل‌ها نشان داده می‌شود.

$$M_z = t_w F_{xrr} - t_w F_{xrl} + (t_w \cos \delta + a \sin \delta) F_{xfr} + (a \sin \delta - t_w \cos \delta) F_{xfl} \quad (58)$$

که $F_x = [F_{xfl} \ F_{xfr} \ F_{xrl} \ F_{xrr}]^T$ نیروی طولی تایر می‌باشد. رابطه مابین T_{xij} و F_{xij} را می‌توان با رابطه شماره (۵۹) بیان نمود.

$$F_{xij} = \frac{T_{xij}}{R} \quad (59)$$

که R شعاع غلتشی چرخ می‌باشد. با انجام تغییر متغیر به شرح رابطه شماره (۶۰) و با بازنویسی رابطه شماره (۵۸)، رابطه شماره (۶۱) حاصل می‌گردد.

$$C = \begin{bmatrix} (-t_w \cos \delta + a \sin \delta) & (t_w \cos \delta + a \sin \delta) & -t_w & t_w \end{bmatrix} \quad (60)$$

که در رابطه شماره (۶۱) خواهیم داشت:

$$M_z = C F_x \quad (61)$$

جهت حصول توزیع گشتاور چرخشی بهینه، نسبت به تعریف تابع هزینه مطابق با رابطه شماره (۶۲) اقدام می‌گردد.

$$J = F_x^T w_1 F_x + (C F_x - M_z)^T w_2 (C F_x - M_z) \quad (62)$$

که w_1 ماتریس وزنی توزیع نیروی تایر $w_1 = \text{diag}[w_{fl} \ w_{fr} \ w_{rl} \ w_{rr}]$ می‌باشد که جهت تنظیم بزرگی نیروهای تایر مورد استفاده واقع می‌گردد. w_2 ماتریس وزنی تنظیم کننده بوده که برای تنظیم بزرگی $(C F_x - M_z)$ مورد استفاده واقع می‌گردد.

با توجه به رابطه شماره (۶۲) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial F_x} &= w_1 F_x + C^T w_2 (C F_x - M_z) \\ &= (w_1 + C^T w_2 C) F_x - C^T w_2 M_z \end{aligned} \quad (63)$$

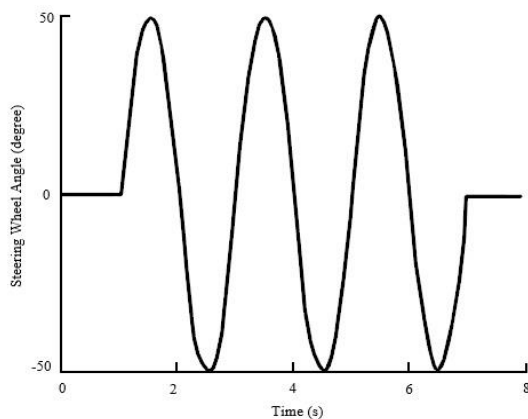
و

$$\frac{\partial^2 J}{\partial^2 F_x} = w_1 + C^T w_2 C \quad (64)$$

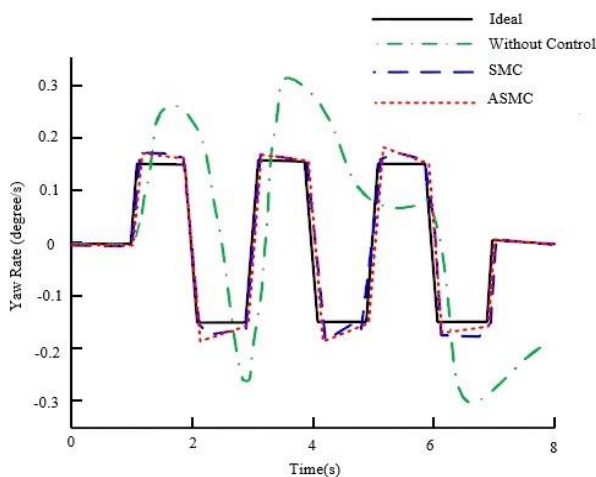
از رابطه شماره (۶۲) می‌دانیم که اگر $w_1 > 0$ و $C^T w_2 C > 0$ باشد، $\frac{\partial^2 J}{\partial^2 F_x} > 0$ بنابراین تابع هزینه دارای حداقل میزان می‌باشد و F_x رابطه شماره (۶۵) را دنبال می‌کند.

$$F_x = (w_1 + C^T w_2 C)^{-1} C^T w_2 M_z \quad (65)$$

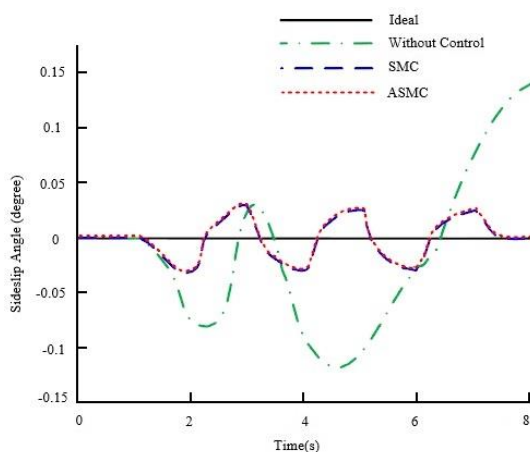
در حالت مطلوب می‌باشد و سیستم الگوریتم کنترل پیشنهادی دارای کارایی مطلوب و اثربخشی می‌باشد.



شکل ۶ ورودی زاویه فرمان چرخ



شکل ۷ تغییرات سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاء بر حسب زمان

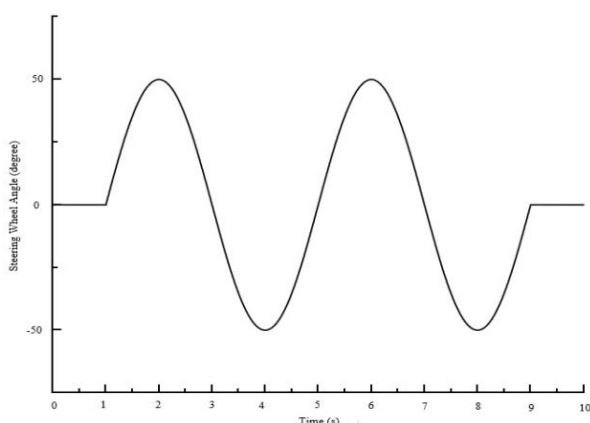


شکل ۸ تغییرات زاویه لغزش جانبی خودرو بر حسب زمان

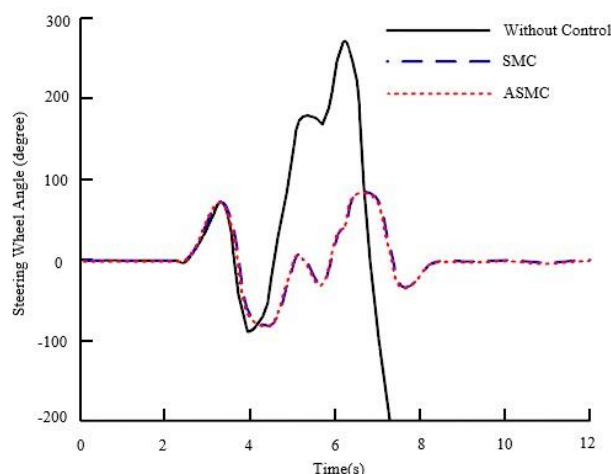
سناریو اول

در این بخش، اثربخشی و کارایی سیستم الگوریتم کنترل مود لغزشی تطبیقی پیشنهادی صحه‌گذاری می‌گردد. در این سناریو، میزان ضریب اصطکاک سطح جاده و تایر ۰/۴۵ فرض می‌گردد. و ورودی زاویه فرمان چرخ به صورت سینوسی لحاظ می‌گردد. و عملکرد الگوریتم کنترل پیشنهادی با الگوریتم کنترل مود لغزان مورد بررسی و تحلیل واقع می‌گردد. در این مانور، میزان سرعت طولی خودرو، ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت لحاظ می‌گردد. زاویه فرمان چرخ یک منحنی سینوسی با دوره ۲ ثانیه و یک دامنه ۵۰ درجه‌ای فرض می‌گردد. شکل شماره (۶) نشان‌دهنده منحنی ورودی سینوسی زاویه فرمان چرخ می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های شماره (۶) الی (۱۰) قابل نمایش می‌باشد. با توجه به شکل‌های شماره (۷) و (۸)، زمانی که خودرو تحت کنترل نمی‌باشد، مقادیر سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاء و زاویه لغزش جانبی خودرو بسیار بزرگ می‌گردد. در حالی که خودرو تحت الگوریتم کنترل مود لغزشی و سیستم الگوریتم کنترل مود لغزان تطبیقی می‌باشد، مقادیر سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاء و زاویه لغزش جانبی خودرو بسیار نزدیک به مقادیر ایدئال می‌باشد و با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مشخص می‌باشد که سیستم الگوریتم کنترل مود لغزان تطبیقی اثر بهتری را در عملکرد سیستم ایجاد می‌نماید. تغییرات زاویه فرمان چرخ بر حسب زمان در شکل شماره (۹) قابل مشاهده می‌باشد. در شکل شماره (۱۰) ردیابی مسیر حرکت خودرو نشان داده می‌شود و با توجه به نتایج حاصل شده، کاملاً مشخص می‌باشد که خودرو بدون حضور الگوریتم کنترل به سرعت پایداری خود را از دست می‌دهد. در حالی که خودرو تحت کنترل الگوریتم مود لغزشی و سیستم الگوریتم کنترل مود لغزان تطبیقی قادر به ردیابی مقدار مشخص شده و ایدئال می‌باشد و سیستم الگوریتم کنترل مود لغزان تطبیقی در ردیابی مسیر حرکت دارای کمترین میزان خطا در مقایسه با الگوریتم کنترل مود لغزشی می‌باشد. با توجه به شکل‌های شماره (۹) و (۱۰) زمانی که خودرو تحت کنترل نمی‌باشد، اگر چه راننده در کنترل خودرو جهت حفظ پایداری سعی می‌نماید اما خودرو در حالت از دست دادن کنترل و خروج از حالت پایدار می‌باشد و در نهایت، به طور جدی از مسیر رانندگی مورد انتظار منحرف شده و ناپایدار می‌گردد اما زمانی که خودرو تحت کنترل مود لغزشی و سیستم الگوریتم کنترل مود لغزان تطبیقی می‌باشد، همیشه در حالت پایدار می‌باشد و خودرو قادر به انجام مانور تعویض خط دوگانه

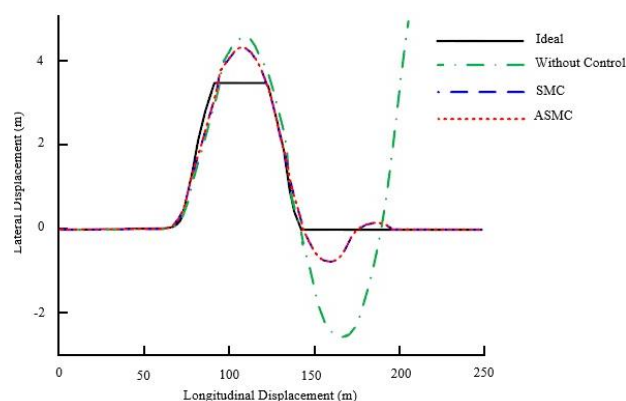
بر حسب زمان و زاویه لغزش جانبی خودرو بر حسب زمان را نمایش می‌دهند. با توجه به شکل شماره (۱۳) به‌کارگیری الگوریتم کنترل سبب ردیابی مقدار ایدئال سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاء در مقایسه با حالت بدون کنترل می‌گردد. در حالت با حضور الگوریتم کنترل پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم کنترل مود لغزان میزان حداکثر خطا از میزان $0/045$ رادیان بر ثانیه به میزان $0/011$ رادیان بر ثانیه کاهش می‌یابد و سبب بهبود پایداری خودرو می‌گردد و نشان دهنده عملکرد اثربخش و مطلوب الگوریتم کنترل پیشنهادی می‌باشد. با توجه به شکل شماره (۱۴) به‌کارگیری الگوریتم کنترل سبب ردیابی مقدار ایدئال زاویه لغزش جانبی خودرو در مقایسه با حالت بدون کنترل می‌گردد. در حالت با حضور سیستم الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم کنترل مود لغزان میزان حداکثر خطای زاویه لغزش جانبی خودرو از میزان $0/06$ رادیان به $0/02$ رادیان کاهش می‌یابد و سبب بهبود پایداری خودرو می‌گردد و نشان‌دهنده عملکرد مطلوب و اثربخش الگوریتم کنترل پیشنهادی می‌باشد. شکل شماره (۱۵) نشان دهنده صفحه فاز سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو - زاویه لغزش جانبی خودرو می‌باشد. با توجه به شکل شماره (۱۵) در حالت بدون حضور سیستم کنترلی، مسیر صفحه فاز در محدوده ناپایدار می‌باشد و در نتیجه خودرو ناپایدار می‌گردد و زمانی که سیستم کنترل مود لغزشی فعال می‌باشد، مسیر صفحه فاز در مرز محدوده پایدار قرار دارد در حالی که با فعال شدن سیستم الگوریتم کنترل پیشنهادی، مسیر صفحه فاز در محدوده پایدار قرار می‌گیرد و خودرو کاملاً پایدار می‌باشد. بنابراین الگوریتم کنترل پیشنهادی در این پژوهش جهت بهبود پایداری خودرو در زمان رانندگی بسیار مؤثر و دارای کارایی مطلوبی می‌باشد. در شکل شماره (۱۶) توزیع گشتاور چهار چرخ نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۱ ورودی زاویه فرمان چرخ



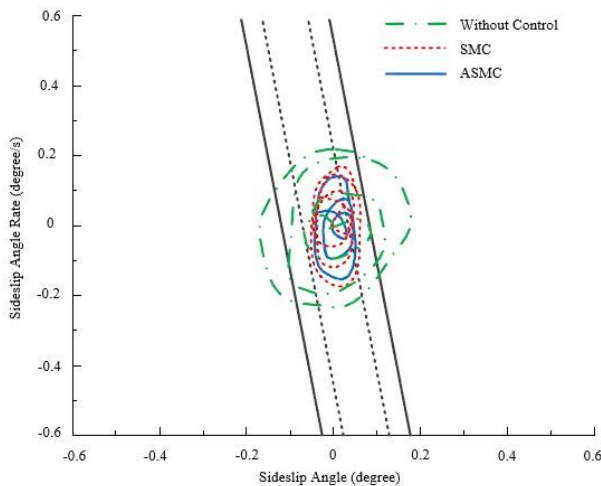
شکل ۹ تغییرات زاویه فرمان چرخ بر حسب زمان



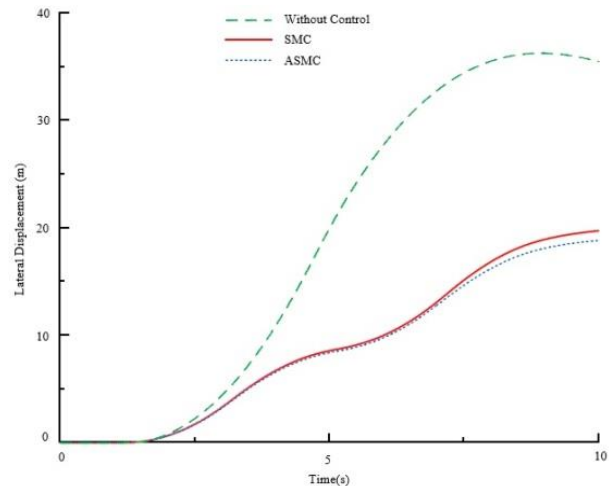
شکل ۱۰ ردیابی مسیر حرکت خودرو

سناریو دوم

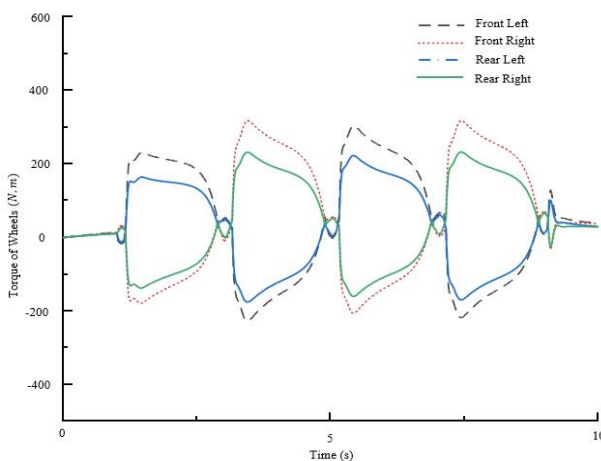
نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مانور تعویض خط با لحاظ ضریب اصطکاک سطح جاده و تأثیر به میزان $0/65$ و سرعت خودرو 70 کیلومتر بر ساعت در شکل‌های شماره (۱۱) الی (۱۶) نمایش داده می‌شود. زاویه سینوسی به عنوان ورودی به چرخ‌های جلو خودرو وارد می‌گردد. ورودی زاویه فرمان چرخ یک موج سینوسی را در بازه زمانی ۱ تا ۹ ثانیه ایجاد می‌کند و میزان زاویه فرمان چرخ در بازه‌های زمانی ۰ تا ۱ ثانیه و ۹ تا ۱۰ ثانیه صفر می‌باشد. شکل شماره (۱۱) نشان دهنده ورودی زاویه فرمان چرخ می‌باشد. شکل شماره (۱۲) میزان تغییرات جابه‌جایی عرضی را بر حسب زمان نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل شده، جابه‌جایی جانبی خودرو در حالت با حضور سیستم الگوریتم کنترل پیشنهادی در مقایسه با حالت بدون حضور کنترل کاهش یافته و در مقایسه با الگوریتم مود لغزان مطلوب‌تر می‌باشد و خودرو در حین طی مسیر پایدار می‌باشد. شکل‌های شماره (۱۳) و (۱۴) به ترتیب سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاء



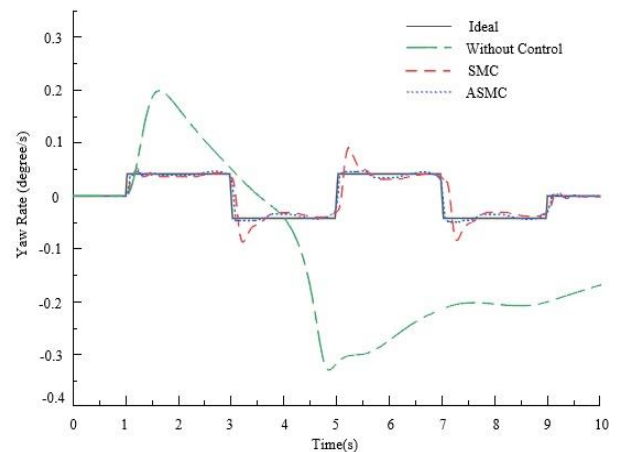
شکل ۱۵ صفحه فاز سرعت لغزش جانبی خودرو - لغزش جانبی خودرو



شکل ۱۲ تغییرات جابه‌جایی عرضی خودرو بر حسب زمان



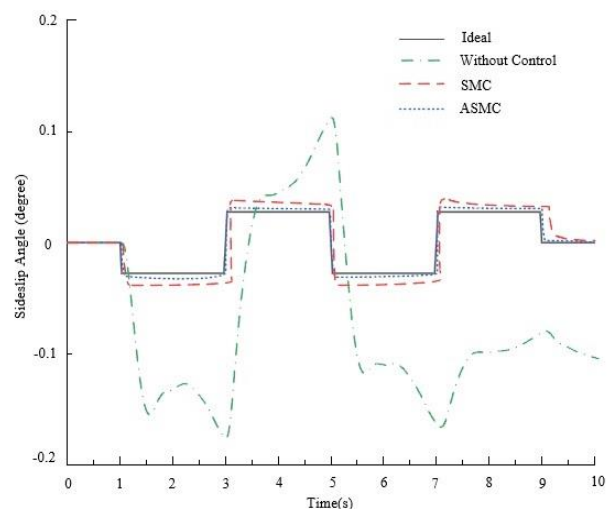
شکل ۱۶ توزیع بهینه گشتاور چرخ‌ها



شکل ۱۳ تغییرات سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور یاء بر حسب زمان

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نسبت به ارائه یک استراتژی کنترل مود لغزشی تطبیقی بر اساس صفحه فاز جهت پایداریسازی خودروی الکتریکی موتور در چرخ اقدام گردید. استراتژی کنترل پیشنهادی دربرگیرنده سه لایه می‌باشد. لایه اول شامل الگوریتم کنترل مود لغزشی است. در این پژوهش، نسبت به تغییر وضعیت سیستم با هدف برطرف نمودن پرسش در سیستم و به حداقل رساندن پاسخ تأخیر و خطای ردیابی اقدام گردید. لایه دوم شامل یک الگوریتم کنترل مشترک می‌باشد که بر اساس مدل مرزی منطقه پایداری صفحه فاز سرعت زاویه لغزش جانبی خودرو - زاویه لغزش جانبی خودرو جهت کنترل الگوریتم کنترل سطح اول مورد استفاده واقع گردید. هنگامی که خودرو در منطقه پایدار قرار



شکل ۱۴ تغییرات زاویه لغزش جانبی خودرو بر حسب زمان

ارتفاع محل اعمال نیروی آیرودینامیکی از سطح جاده	داشته باشد، الگوریتم کنترل مود لغزان تطبیقی جهت تعیین
$h_{aero}(m)$	گشتاور چرخشی، از سرعت زاویه چرخشی خودرو حول محور
r	یاو استفاده می‌کند و زمانی که خودرو خارج از منطقه پایدار قرار
$\dot{r}$	داشته باشد، سیستم الگوریتم کنترل مود لغزان تطبیقی از زاویه
g	لغزش جانبی خودرو و سرعت زاویه چرخشی خودرو حول
h	محور یاو جهت پایداری و بازگرداندن خودرو به منطقه پایدار
T_d	استفاده می‌کند. لایه سوم شامل یک الگوریتم کنترل توزیع بهینه
ω	گشتاور می‌باشد که گشتاور چرخشی را به گشتاور مورد نیاز
$\dot{\omega}$	چهار چرخ خودروی الکتریکی موتور در چرخ به طور بهینه
μ	توزیع می‌کند. در این پژوهش به منظور لحاظ رفتار واقعی
σ	خودرو، دینامیک غیرخطی تاثیر پیاده‌سازی شد. سیستم الگوریتم
σ_x	کنترل پیشنهادی در سناریوهای مختلف با شرایط متفاوت کاری
σ_y	و شرایط اضطراری و بحرانی مورد تحلیل و بررسی واقع گردید.
δ	در این مقاله به منظور صحنه‌گذاری بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی،
α	به کاربرد نرم‌افزارهای سیمولینک/ متلب - کارسیم اقدام گردید.
g	نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده، کارایی مطلوب و
β	اثربخش سیستم الگوریتم کنترل پیشنهادی را در جهت
v	پایداری و بهبود فرمان‌پذیری خودروی الکتریکی موتور در
u	چرخ به نمایش گذاشت.
F_z	در ادامه این پژوهش و به عنوان فعالیت‌های آتی می‌توان
F_x	نسبت به پیاده‌سازی الگوریتم کنترل پیشنهادی در بحث اجتناب
F_y	از برخورد اقدام نمود. همچنین نسبت به ارائه روش گام به عقب
T_d	تطبیقی جهت طراحی کنترل‌کننده لایه بالایی به منظور ایجاد
R	گشتاور چرخشی اصلاحی اقدام نمود.

واژه نامه

نمادها

Sliding Mode	مود لغزشی	m	جرم خودرو (kg)
Stability	پایداری	l_f	فاصله مرکز جرم خودرو تا محور جلوی خودرو (m)
Surface	سطح لغزش	l_r	فاصله مرکز جرم خودرو تا محور عقب خودرو (m)
In-wheel Motor	موتور در چرخ	C_d	ضریب بازدارندگی آیرودینامیکی (-)
Vehicle Dynamic	دینامیک خودرو	A_F	سطح آیرودینامیکی جلوی خودرو (m^2)
		F_{aero}	نیروی بازدارندگی آیرودینامیکی (N)

تقدیر و تشکر

مراجع

- [1] P. Hang, X. Chen, "Integrated chassis control algorithm design for path tracking based on four-wheel steering and

- direct yaw-moment control,” *Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 233, no. 6, pp. 625–641, 2019. <https://doi.org/10.1177/0959651818806075>
- [2] D. Chindamo, B. Lenzo, M. Gadola, “On the Vehicle Sideslip Angle Estimation: A Literature Review of Methods, Models, and Innovations,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 3, p. 355, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8030355>
- [3] T. Chen, L. Chen, X. Xu, Y. Cai, H. Jiang, X. Sun, “Sideslip Angle Fusion Estimation Method of an Autonomous Electric Vehicle Based on Robust Cubature Kalman Filter with Redundant Measurement Information,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 10, no. 2, p. 34, 2019. <https://doi.org/10.3390/wevj10020034>
- [4] T. Zhou, “Adaptive sliding control based on a new reaching law,” *Control and Decision*, vol. 31, no. 8, pp. 1335–1338, 2016. <https://doi.org/10.1002/adts.202300736>
- [5] K. Berntorp, R. Quirynen, T. Uno, et al., “Trajectory tracking for autonomous vehicles on varying road surfaces by friction-adaptive nonlinear model predictive control,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 58, no. 5, pp. 705–725, 2021. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1697456>
- [6] L. Zhai, R. Hou, T. Sun, and S. Kavuma, “Continuous steering stability control based on an energy-saving torque distribution algorithm for a four in-wheel-motor independent-drive electric vehicle,” *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 350, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11020350>
- [7] K. Zhang, Q. Sun, and Y. Shi, “Trajectory tracking control of autonomous ground vehicles using adaptive learning MPC,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 32, no. 12, pp. 5554–5564, 2021. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.3048305>
- [8] S. Zhang, X. Zhao, G. Zhu, et al., “Adaptive trajectory tracking control strategy of intelligent vehicle,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 16, no. 5, pp. 1–14, 2021. <https://doi.org/10.1177/1550147720916988>
- [9] D. Soudbakhsh and A. Eskandarian, “Comparison of linear and nonlinear controllers for active steering of vehicles in evasive manoeuvres,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 226, no. 2, pp. 215–232, 2012. <https://doi.org/10.1177/0959651811414503>
- [10] Q. K. Hou, S. H. Ding, and X. H. Yu, “Composite super-twisting sliding mode control design for PMSM speed regulation problem based on a novel disturbance observer,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 2591–2599, 2021. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2985054>
- [11] J. Zhang, H. Wang, M. Ma, M. Yu, and A. Yazdani, “Active front steering-based electronic stability control for steer-by-wire vehicles via terminal sliding mode and extreme learning machine,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 12, pp. 14713–14726, 2020. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3036400>
- [12] K. Mei, S. Ding, and W. X. Zheng, “Fuzzy adaptive SOSM based control of a type of nonlinear systems,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, no. 3, pp. 1342–1346, 2022. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3116812>
- [13] M. Rahman, M. Masrur, and M. N. Uddin, “Impacts of interior permanent magnet machine technology for electric vehicles,” *In Proceedings of the 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, 2012, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183226>
- [14] M. A. Ghomashi and R. Kazemi, “Motion trajectory control and robust control based on nonlinear bicycle model to

- stabilization for in-wheel motor electric vehicle in emergency scenario,” *Journal of Aerospace Mechanics*, vol. 20, no. 1, pp. 109-124, 2024. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403.20.1.7.9>
- [15] K. Hartani, A. Merah, and A. Draou, “Stability enhancement of four-in-wheel motor-driven electric vehicles using an electric differential system,” *Journal of Power Electronics*, vol. 15, no. 5, pp. 1244-1255, 2015. <https://doi.org/10.6113/JPE.2015.15.5.1244>
- [16] M. Sekour, K. Hartani, and A. Merah, “Electric vehicle longitudinal stability control based on a new multi machine nonlinear model predictive direct torque control,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, no.1, p. 4125384, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4125384>
- [17] E. Mousavinejad, Q.-L. Han, F. Yang, Y. Zhu, and L. Vlacic, “Integrated control of ground vehicles dynamics via advanced terminal sliding mode control,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 55, no. 2, pp. 268-294, 2019. <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1256489>
- [18] T. Ahmed, K. Hartani, and A. Allali, “New DTC strategy of multi machines single-inverter systems for electric vehicle traction applications,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 641-650, 2020. <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp641-650>
- [19] A. Cabrera, S. Gawal, and A. Martinoli, “A new collision warning system for lead vehicles in rear-end collisions,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2014, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/IVS.2012.6232244>
- [20] H. K. Lee, S. G. Shin, and D. S. Kwon, “Design of emergency braking algorithm for pedestrian protection based on multi-sensor fusion,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 1067-1076, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12239-017-0104-7>
- [21] M. A. Ghomashi, R. Kazemi, "Motion path following coordinated control for in-wheel motor electric vehicle via implementation robust control and optimal control," *Journal of Modeling in Engineering*, pp. 1-15, 2024. <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31752.2531>
- [22] A. Lopez, R. Sherony, S. Chien, L. Li, Y. Qiang, and Y. Chen, "Analysis of the braking behaviour in pedestrian automatic emergency braking," *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2015, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.185>
- [23] X. Wang, M. Zhu, M. Chen, and P. Tremont, "Drivers' rear end collision avoidance behaviors under different levels of situational urgency," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 71, pp. 419-433, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.08.014>
- [24] N. Guo, X. Zhang, Y. Zou, B. Lenzo, T. Zhang, and D. Göhlich, “A fast model predictive control allocation of distributed drive electric vehicles for tire slip energy saving with stability constraints,” *Control Engineering Practice*, vol. 102, no. 1, p. 104554, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104554>
- [25] C. Hu, R. Wang, F. Yan, and M. Chadli, “Composite nonlinear feedback control for path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 7, pp. 2063–2074, 2021. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2498172>
- [26] A. V. Mernone and J. N. Mazumdar, “A Mathematical Study of Peristaltic Transport of a Casson Fluid,” *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 35, no. 7–8, pp. 895-912, 2014. <https://doi.org/10.1016/S0895->

7177(02)00058-4

- [27] M. A. Ghomashi and R. Kazemi, "Implementation robust control technique to lateral stabilization for in-wheel motor electric vehicle," *Journal of Solid and Fluid Mechanics (JSFM)*, vol. 14, no. 2, pp. 111-126, 2024. <https://doi.org/10.22044/jsfm.2024.13967.3821>
- [28] Q. Xia, L. Chen, X. Xu, et al., "Coordination control method of autonomous ground electric vehicle for simultaneous trajectory tracking and yaw stability control," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 237, no. 5, pp. 941-957, 2022.
- [29] C. Hu, R. Wang, F. Yan, et al., "Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4033-4043, 2017. <https://doi.org/10.1177/09544070221087485>
- [30] J. Funke, M. Brown, S. M. Erlien, and J. C. Gerdes, "Collision avoidance and stabilization for autonomous vehicles in emergency scenarios," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 1204-1216, 2016. <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2599783>
- [31] H. Li, P. Li, L. Yang, et al., "Safety research on stabilization of autonomous vehicles based on improved-LQR control," *AIP Advances*, vol. 12, no. 1, p. 015313, 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0078950>
- [32] Pacejka, H. *Tire and Vehicle Dynamics*; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [33] Y. Liang, Y. Li, A. Khajepour, et al., "Holistic adaptive multi-model predictive control for the path following of 4WID autonomous vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 69-81, 2020. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3046052>
- [34] S. Ding, L. Liu, and W. X. Zheng, "Sliding mode direct yaw moment control design for in-wheel electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6752-6762, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2682024>
- [35] C. Fu, R. Hoseinnezhad, A. Bab-Hadiashar, et al., "Direct yaw moment control for electric and hybrid vehicles with independent motors," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 69, no. 1-4, pp. 1-24, 2021. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2015.073111>

CONTENTS

Numerical Simulation of the Effects of Inlet Velocity and Geometry on the Hydrodynamics of Turbulent Gas-Solid Flow in a Fluidized Bed Reactor	Morteza Rahmanpour - Sina Shenavar Amir Sorouradin Abadi	1
Numerical Simulation of Viscoelastic Fluid Mixing in a T-Y Shaped Micromixer	Fatemeh Khalilian - Morteza Bayareh	17
Electromechanical-Growth Model for Simulating Myocardial Concentric Hypertrophy in Systemic Hypertension	Soheila Shabani - Akbar Allahverdizadeh Pezhman Namashiri	29
Optimization of Engineering Problems with Discrete and Continuous Constraints Using Dynamic Adaptive Meta-Heuristic Algorithms	SayedMostafa Mousavi - Alireza Toloei MohammadHosein Toloei	53
Numerical Simulation of Heat Pipe-PEM Fuel Cell Coupling and Investigating the Effect of Geometrical Parameters on the Thermal Performance of Fuel Cell	Ebrahim Afshari - Mehdi Mortazavi Elnaz Zohravi	71
Evaluating the Effect of Movable Internal and Fixed External Shading Devices on the Energy Consumption of an Office Building in Kerman	Mohamad Reza Motlaghian - S.Mohammad Hojjat.Mohammadi - Ebrahim Jahanshahi Javaran	91
Implementation Robust Control Technique to Lateral Stabilization for in-Wheel Motor Electric Vehicle	Mohammad amin Ghomashi - Reza Kazemi	107



Ferdowsi University of Mashhad

JOURNAL OF APPLIED AND COMPUTATIONAL SCIENCES IN MECHANICS

ISSN: 2008-918X

Editor-in-Chief: Dr. Mehran Kadkhodayan

General Director: Dr. Hamid Niazmand

Concessionaire: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Dr. Akbar Afaghi Khatibi	Associate Professor	RMIT University, Australia
Dr. Kazem Abhary	Associate Professor	University of South Australia, Australia
Dr. Aliakbar Akbarzadeh	Professor	RMIT University, Australia
Dr. Hamed Haddad Khodaparast	Associate Professor	Swansea University, UK
Dr. Masoud Boroomand	Professor	Amirkabir University of Technology
Dr. S.Mohammad Reza Khalili	Professor	K.N. Toosi University of Technology
Dr. Ehsan Roohi	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Mahmoud Shariati	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Ebrahim Shirani	Professor	Isfahan University of Technology
Dr. Masoud Tahani	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Mohammad Reza Kazempour Mofrad	Professor	University of California, United States
Dr. Mehran Kadkhodayan	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Hamid Moeenfar	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Behdad Moghtaderi	Professor	University of Newcastle, Australia
Dr. Mohammad Reza Mahpeykar	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Simin Nasser	Professor	Kennesaw State University
Dr. Hamid Niazmand	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Mohammad Jonaidi	Assistant Professor	Kennesaw State University
Dr. Mohammad-Reza Pendar	Postdoctoral Fellow	University of Victoria
Dr. S. Mahmood Mousavi	Postdoctoral Fellow	University of Texas at Austin

Text Editor: E. Dehghan

Executive Director: T. Hooshmand

Typesetting: A. Noie

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics
Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

P. O. Box: 91775-1111, Mashhad, I.R. IRAN

Tel: +98 51 38806024

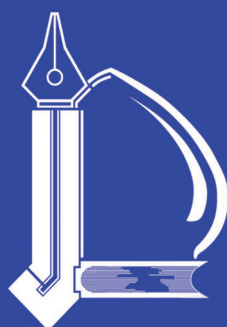
Fax: +98 51 38763301

Email: ejour@um.ac.ir

Web site: <http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir>

Indexed in: ISC, SID, Magiran, EBSCO, DOAJ

ISSN 2008 - 918X



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of
Applied and
Computational Sciences
in Mechanics

Serial No. 39

Numerical Simulation of the Effects of Inlet Velocity and Geometry on the Hydrodynamics of Turbulent Gas-Solid Flow in a Fluidized Bed Reactor

Morteza Rahmanpour - Sina Shenavar
Amir Sorouradin Abadi

1

Numerical Simulation of Viscoelastic Fluid Mixing in a T-Y Shaped Micromixer

Fatemeh Khalilian- Morteza Bayareh

17

Electromechanical-Growth Model for Simulating Myocardial Concentric Hypertrophy in Systemic Hypertension

Soheila Shabani - Akbar Allahverdizadeh
Pezhman Namashiri

29

Optimization of Engineering Problems with Discrete and Continuous Constraints Using Dynamic Adaptive Meta-Heuristic Algorithms

SayedMostafa Mousavi - Alireza Toloei
MohammadHosein Toloei

53

Numerical Simulation of Heat Pipe-PEM Fuel Cell Coupling and Investigating the Effect of Geometrical Parameters on the Thermal Performance of Fuel Cell

Ebrahim Afshari - Mehdi Mortazavi - Elnaz Zohravi

71

Evaluating the Effect of Movable Internal and Fixed External Shading Devices on the Energy Consumption of an Office Building in Kerman

Mohamad Reza Motlaghian - S.M Hojjat.Mohammadi
Ebrahim Jahanshahi Javaran

91

Implementation Robust Control Technique to Lateral Stabilization for in-Wheel Motor Electric Vehicle

Mohammad amin Ghomashi - Reza Kazemi

107

Vol. 37, No.1
Spring 2025