ISSN 2008 - 918X

شبیه‌سازی عددی یک میکروپمپ بر مبنای محرک پیزوالکتریک ۱
علی نبی‌فر خفری - مرتضی بیاره

شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت آشفته در بویلر با سیال فوق‌بحرانی و شرایط گرمایی نامتقارن ۱۵
سعید مقدم

تحلیل خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم-گرافین با نقص جای خالی و حفره به روش دینامیک مولکولی ۳۳
علی ابراهیمی - مسعود اجری

کاهش سپر تنشی در استخوان ران با استفاده از پروتزهای ران ساخته شده از مواد توزیع شده تابعی ۴۹
هستیار جلیل‌زاده - اکبر اللهوردی‌زاده - بهنام داداش‌زاده

مطالعه عددی اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر انتقال حرارت فروسیال در کانال با دو پله پیشرو ۶۹
حمیدرضا بهرامی - مهزیار قائدی

مطالعه اثر استفاده از پره‌های ایجاد کننده اغتشاش در دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری بر هیدرو دینامیک جریان و بهبود انتقال حرارت ۹۳
سید هادی پورحسینی - مجتبی باغبان

استفاده از مدل‌های اصطکاکی نوین به منظور بررسی خواص مکانیکی بافت سرطانی کبد ۱۰۷
معین طاهری - زهرا سادات اقدامی

سال ۳۶، شماره ۳

پائیز ۱۴۰۳

دانشگاه فردوسی مشهد

نشریه علوم کاربردی و محاسباتی

در مکانیک

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۳۷

نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

شماره پیاپی ۳۷

سال ۳۶، شماره ۳، ۱۴۰۳

نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

ISSN: 2008-918X

سردبیر: دکتر مهران کدخدایان **مدیر مسئول:** دکتر حمید نیازمند

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه:

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

ویراستار: الهام دهقان **ویرایش و صفحه‌آرایی:** سیده عاطفه نوعی

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

پست‌الکترونیکی: **mechanic-ferdowsi@um.ac.ir** وب سایت: **http://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

شبیه‌سازی عددی یک میکروپمپ بر مبنای محرک پیزوالکتریک	علی نبی‌فر خفری - مرتضی بیاره	۱
شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت آشفته در بویلر با سیال فوق‌بحرانی و شرایط گرمایی نامتقارن	سعید مقدم	۱۵
تحلیل خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم- گرافین با نقص جای خالی و حفره به روش دینامیک مولکولی	علی ابراهیمی – مسعود اجری	۳۳
کاهش سپر تنشی در استخوان ران با استفاده از پروتزهای ران ساخته شده از مواد توزیع شده تابعی	هستیار جلیل‌زاده – اکبر اللهوردی‌زاده بهنام داداش‌زاده	۴۹
مطالعه عددی اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر انتقال حرارت فروسیال در کانال با دو پله پیشرو	حمیدرضا بهرامی – مهزیار قائدی	۶۹
مطالعه اثر استفاده از پره‌های ایجاد کننده اغتشاش در دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری بر هیدرو دینامیک جریان و بهبود انتقال حرارت	سید هادی پورحسینی – مجتبی باغبان	۹۳
استفاده از مدل‌های اصطکاکی نوین به منظور بررسی خواص مکانیکی بافت سرطانی کبد	معین طاهری – زهرا سادات اقدامی	۱۰۷

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

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

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Numerical Simulation of a Micropump Based on Piezoelectric Actuator*

Research Article

Ali Nabifar Khafri[1], Morteza Bayareh[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.80610.1158

Abstract *This paper considers a three-dimensional micropump based on a piezoelectric actuator. The COMSOL software version 6.5 was used to simulate the performance of a micropump. First, a reference micropump was defined, which worked at a frequency of 60 Hz and a voltage of 1500 V capable of pumping a maximum flow rate of 0.038 ml/s. The influence of frequency, voltage, axial position of input and output of micropump, dimensions of piezoelectric actuator and membrane, and shape of actuator on the fluid output flow rate and pumped fluid volume were investigated. For example, the output flow rate of the micropump at 100 and 20 Hz frequency was 0.065 and 0.011 ml/s, respectively. By increasing the voltage from 1500 to 1875 V, the micropump output flow rate rose to 0.047 ml/s.*

Keywords: Microfluidic, Micropump, Piezoelectric actuator, Frequency, Voltage, Output flow

1. Introduction

In recent years, it has become possible to manufacture industrial equipment with high precision, such as micropumps. The need for a system that transports fluids on a small scale has prompted researchers to design a device that pumps fluid with an appropriate pressure and flow rate. Micropumps are a type of low-volume pump system that can pump, mix, or control small volumes of fluids [1]. Micropumps are generally fabricated by substrates, such as silicon, glass, or polymer, including polymethyl methacrylate or polydimethylsiloxane. Micropumps can be classified into two general categories mechanical and non-mechanical [2]. Mechanical micropumps have movable mechanical parts, such as diaphragm and control valves. In contrast, non-mechanical micropumps have no movable mechanical parts and instead move fluid through hydrodynamic, electro-osmotic, and capillarity effects [3]. The piezoelectric actuator with active valves was first used by Spencer et al. [4]. They reached a flow rate of 19 ml/V at a pressure of 1 mmHg/V.

In the present study, a micropump with a piezoelectric actuator was simulated and the effect of frequency, voltage, axial location of the input and output of the micropump, and the dimensions of the piezoelectric actuator and membrane were investigated. In addition, it is suggested to use an actuator with a rectangular cross-section instead of a cylindrical actuator. The geometry of the model, as shown in Figure 1, consists of an annular piezoelectric actuator on the top of the fluid field attached to a flexible membrane. Due to physical symmetry, only half of the geometry is considered. The fluid expands due to the application of external and actuator voltage. The membrane is stabilized by the movement of the actuator and exerts a force on the fluid below it that pulls the fluid from the left channel (inlet) and pushes it out the right channel (outlet). Figure 1 also shows the dimensions of the chamber inlet, chamber outlet, micropump chamber, membrane, and piezoelectric actuator.

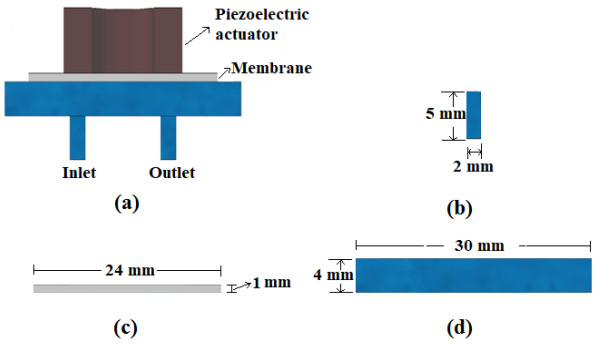


Figure 1. Scheme of the present problem: (a) general view of the designed micropump and its different parts, (b) dimensions of the inlet and outlet, (c) dimensions of the membrane, and (d) dimensions of the chamber

2- Governing equations

In a real micropump, a piezoelectric actuator with separate layers and electrical connections is used. Here, the thin metal layers are omitted and the actuator is modeled as an

*Manuscript received: January 14, 2023. Revised, March 19, 2023, Accepted, March 4, 2024.

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

[2] Corresponding Author:Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. **Email**: m.bayareh@sku.ac.ir.

integrated block of piezoelectric. As a result, a potential difference of 1500 V is applied to the whole piezoelectric, which corresponds to the electric field strength of 0.2 V/μm. The voltage required in a real device depends on the thickness of each layer in the driver. Equation 1 is used to calculate the voltage:

$$E = nTV \quad (1)$$

Where T, n, E, and V are the thickness of the piezoelectric layer, number of layers in the actuator, strength of the electric field, and applied voltage, respectively.

3- Results

Effect of frequency

Figure 2 shows the fluid output flow rate for different frequencies for a constant voltage of 1500 V and a membrane thickness of 1 mm. Piezoelectric dimensions are the same for all cases. At five different frequencies, the volume flow rate is calculated to determine the effect of frequency change in the piezoelectric actuator. As shown in Figure 2, the output flow rate of the micropump increases over time by enhancing the frequency. Moreover, the volume of fluid exiting from the micropump augments with the frequency.

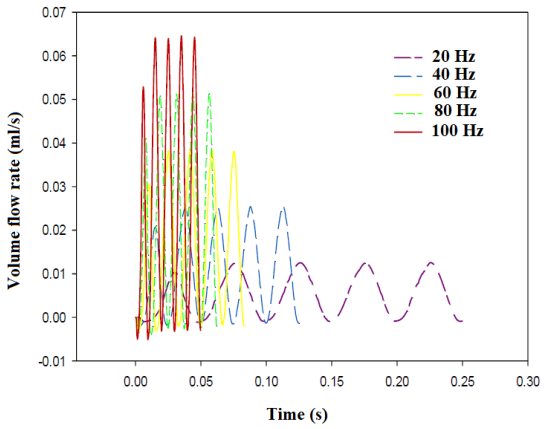


Figure. 2. Effect of frequency on the micropump output flow rate

Effect of voltage

To investigate the effect of voltage, the strength of the electric field was changed. The number of layers in simulations was 75 and was assumed to be constant. The thickness of the piezoelectric layer was 1 mm. According to the relationship between voltage and field strength (Equation 1), different voltages are obtained by changing the electric field strength. Figure 3 shows that as voltage is enhanced, the fluid velocity inside the chamber augments.

Effect of the dimensions of the piezoelectric actuator and membrane

The investigated piezoelectric was circular with an outer diameter of 15 mm and an inner diameter of 8 mm. The radius and thickness of the reference membrane were 12 and 1 mm, respectively. Figure 4 demonstrates that as the radius of the membrane decreases compared to the reference state, the output flow rate and volume of the pumped fluid are reduced. The larger the surface of the membrane above the fluid chamber, the higher the flow rate. Regarding the change in the size of the piezoelectric actuator, the output flow decreased by reducing the piezoelectric diameter. Therefore, by increasing the dimensions of the membrane and piezoelectric actuator, the output flow rate was enhanced, leading to an augmentation in the volume of the pumped fluid.

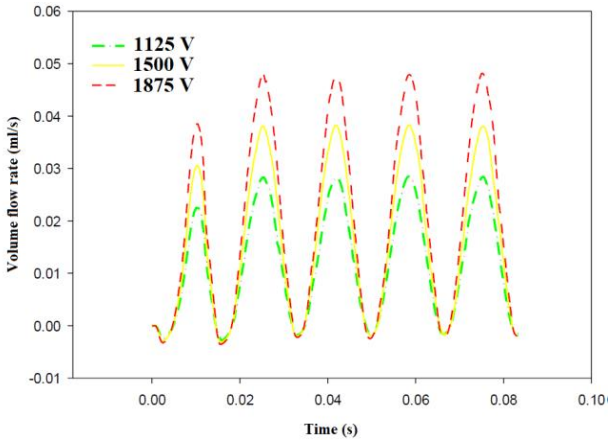


Figure 3. Effect of voltage on micropump output flow rate

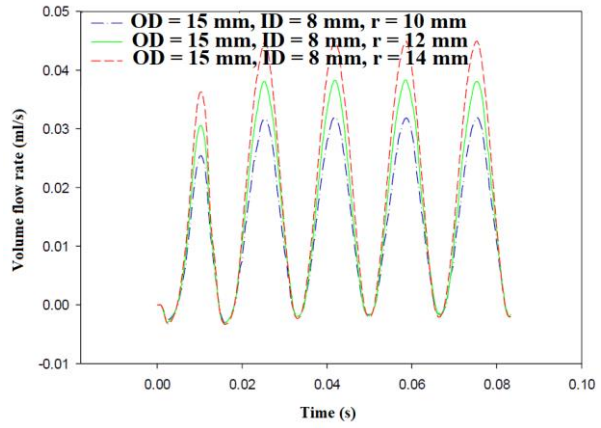


Figure 4. Effect of the membrane radius on the output flow rate of the micropump (in this diagram, OD, ID, and r are the outer diameter, inner diameter, and radius of the membrane, respectively)

4- Conclusion

The present paper considers a micropump with a circular-shaped piezoelectric actuator. The micropump has an inlet on the left side and an outlet on the right side of the chamber. The simulations were performed for the frequencies of 20-100 Hz and voltages of 1125-1875 V to achieve the maximum output flow rate and volume of pumped fluid. It is observed that increasing the frequency, voltage, and dimensions of the piezoelectric actuator and membrane resulted in an enhancement in the fluid flow rate and volume of the pumped fluid.

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد

شبیه‌سازی عددی یک میکروپمپ بر مبنای محرک پیزوالکتریک*

مقاله پژوهشی

علی نبی‌فر خفری[۱] مرتضی بیاره[۲]

DOI: *10.22067/jacsm.2024.80610.1158*

چکیده *مقاله حاضر به بررسی یک میکروپمپ سه‌بعدی بر مبنای محرک پیزوالکتریک می‌پردازد. برای شبیه‌سازی عملکرد میکروپمپ از نرم‌افزار کامسول نسخه ۵/۶ استفاده شده است. در ابتدا میکروپمپی به عنوان مبنا تعریف می‌شود که در فرکانس ۶۰ هرتز و ولتاژ ۱۵۰۰ ولت کار می‌کند که قادر به پمپاژ بیشینه دبی ۰/۰۳۸ میلی‌لیتر بر ثانیه است. سپس به بررسی تأثیر فرکانس، ولتاژ، مکان محوری ورودی و خروجی میکروپمپ، ابعاد محرک پیزوالکتریک و غشا و تغییرشکل محرک از استوانه‌ای به مستطیلی شکل بر دبی خروجی سیال مورد نظر و حجم سیال پمپ شده پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که تغییر فرکانس، ولتاژ، ابعاد محرک پیزوالکتریک و غشا، تأثیر مستقیم بر دبی خروجی و حجم سیال پمپ شده دارد؛ به طوری که با افزایش هر یک از این پارامترها، دبی خروجی سیال و حجم سیال پمپ شده افزایش پیدا می‌کند. دبی خروجی میکروپمپ در فرکانس ۱۰۰ و ۲۰ هرتز به ترتیب برابر ۰/۰۶۵ و ۰/۰۱۱ میلی‌لیتر بر ثانیه به دست می‌آید. با افزایش ولتاژ از ۱۵۰۰ به ۱۸۷۵ ولت، دبی خروجی میکروپمپ به مقدار ۰/۰۴۷ میلی‌لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد. نتایج بیانگر آن است که محرک پیزوالکتریک مستطیل شکل دارای بازدهی کمتری نسبت به محرک استوانه‌ای شکل است.*

واژه‌های کلیدی میکروفلوئیدیک، میکروپمپ، محرک پیزوالکتریک، فرکانس، ولتاژ، دبی خروجی.

مقدمه

در سال‌های اخیر با پیشرفت فناوری، امکان ساخت تجهیزات صنعتی با دقت بالاتر به وجود آمده است. در مورد میکروپمپ‌ها نیز این مسئله صدق می‌کند. نیاز به سیستمی که سیالات را در مقیاس کم انتقال دهد، پژوهشگران را بر آن داشت که دستگاهی را طراحی کنند که سیال را با فشار و دبی مناسب پمپاژ کند. میکروپمپ‌ها نوعی از سیستم‌های پمپ با حجم کم هستند که می‌توانند حجم کمی از سیالات را پمپاژ، ترکیب و یا کنترل کنند [1]. میکروپمپ‌ها به طور کلی با استفاده از تکنیک‌های میکروسیستم‌های الکترومکانیکی روی لایه‌های زیست سازگار مانند سیلیکون، شیشه یا پلیمر به عنوان مثال پلی متیل متاکریال یا پلی دی متیل سیلوکسان ساخته می‌شوند. میکروپمپ‌ها را می‌توان به دو دسته کلی میکروپمپ‌های مکانیکی یا غیرمکانیکی دسته‌بندی کرد [2]. میکروپمپ‌های مکانیکی دارای قطعات مکانیکی متحرک مانند دیافراگم‌های پمپاژ و دریچه‌های کنترلی هستند. در مقابل، میکروپمپ‌های غیرمکانیکی هیچ قطعه مکانیکی متحرکی ندارند و به جای آن از طریق اثرات هیدرودینامیکی، الکترواسموزی و موییینگی سیال را حرکت می‌دهند [3]. برای بیشتر کاربردهای پیزوالکتریک، یک بستر از ماده پیزوالکتریک با ضخامتی متفاوت روی صفحه بدون حرکت

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۲۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۲/۱۲می‌باشد.

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

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

Email: m.bayareh@sku.ac.ir

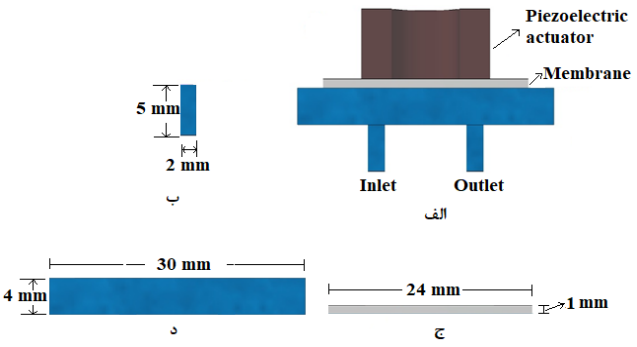
که معمولا از جنس فولاد ضد زنگ، برنج و یا پلیمر است، قرار می‌گیرد. بالاترین کرنش آزاد یک دیسک پیزوالکتریک توسط ولتاژ اعمال‌شده و محدوده پلاریزاسیون محرک پیزوالکتریک محاسبه می‌شود [4]. حداکثر جابه‌جایی دیسک پیزوالکتریک توسط کرنش حداکثر پیزوالکتریک، ابعاد و سفتی محرک و چگونگی مقیدکردن محرک پیزوالکتریک، مشخص می‌شود.

میکروپمپ‌های پیزوالکتریک به دلیل توانایی آن‌ها در کنترل دقیق اندازه‌گیری حجم بسیار کمی از سیالات یا گازها، اغلب در کاربردهای پزشکی استفاده می‌شوند. نخستین استفاده از محرک پیزوالکتریک با دریچه‌های فعال توسط اسپنسر و همکاران [5] انجام شد. این میکروپمپ پیزوالکتریک به دبی جریان ۱۹ میکرولیتر بر ولت در فشار ۱ میلی‌متر جیوه بر ولت رسید. پس از اسپنسر و همکاران، ون لینتر و همکاران [6] دریچه‌های چک غیر فعال را بررسی کردند. نتیجه این کار بهبود عملکرد میکروپمپ و رسیدن به دبی جریان ۰/۰۰۸ میلی‌لیتر در دقیقه در ولتاژ ۱۰۰ ولت و فرکانس ۱ هرتز بود. استم [7] با استفاده از نازل/ دیفیوزر در میکروپمپ، جریان ۱۶ میلی‌لیتر بر دقیقه با فشار برگشتی ۱۹/۶ کیلوپاسکال در فرکانس ۱۰۰ هرتز را به دست آورد. کوچ و همکاران [8] میکروپمپ پیزوالکتریکی را گزارش کردند که در آن از یک غشای سیلیکونی و یک دیسک پیزوالکتریک استفاده شده بود. شیرهای چک ورودی و خروجی از نوع غیر فعال بودند. دبی جریان این میکروپمپ، ۱۲۰ میکرولیتر بر دقیقه نتیجه شد در حالی که ولتاژ ۱۶۰ ولت، فرکانس ۲۰۰ هرتز و ضخامت دیسک پیزوالکتریک مورد استفاده ۱۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده بود. ساگر و همکاران [9] میکروپمپ پیزوالکتریکی را ساختند که در آن از شیرهای غیرفعال استفاده شده بود. برای این کار از سیال روغن سیلیکون استفاده کردند و برای ولتاژهای ۰ تا ۱۶۰۰ ولت و فرکانس‌های ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ هرتز آزمایش‌هایی انجام گرفت که دبی جریان ۲/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه در ولتاژ ۱۲۰۰ ولت و فرکانس ۴۵۰۰ هرتز به دست آمد. کن و همکاران [10] یک میکروپمپ پیزوالکتریک برای دارورسانی ارائه کردند که در آن از شیرهای یک‌طرفه طره‌ای مختلف استفاده شد و حداکثر دبی جریان ۳/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه را در فرکانس ۳۰۰۰ هرتز پمپ می‌کرد. لین و همکاران [11] یک میکروپمپ پیزوالکتریک بر پایه دیافراگم ارائه نمودند که جهت خنک‌سازی قطعات الکترونیکی صورت به کار گرفته شد. برای این میکروپمپ، دبی جریان ۷۲ میلی‌لیتر بر دقیقه در بازه فرکانس ۱۸۰-۷۰ هرتز به دست آمد. رواتی و همکاران [12] یک میکروپمپ پیزوالکتریک بر پایه کامپوزیت را طراحی کردند. شبیه‌سازی‌هایی با تغییر عمق و قطر محفظه در فرکانس ۲۰ هرتز صورت گرفت که حداکثر دبی جریان ۲۵۰ میکرولیتر بر دقیقه را نشان می‌داد. دبی این میکروپمپ با افزایش ولتاژ، افزایش پیدا می‌کرد زیرا دامنه جابه‌جایی دیافراگم با افزایش ولتاژ افزایش می‌یافت. راکش و همکاران [13] تأثیر فرکانس کاری و قطر سوزن را بر عملکرد میکروپمپ بررسی کردند. در حالتی که قطر میکروسوزن ۲۰۰ میکرومتر بود، مشاهده شد که با تغییر فرکانس از ۱۰۰ هرتز تا ۷۶۱۵ هرتز، فشار درون محفظه میکروپمپ و در نتیجه سرعت افزایش پیدا می‌کند. برای موارد مختلف قطر سوزن از ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، با ولتاژ ثابت ۲۰ ولت و فرکانس ۷۶۱۵ هرتز مشاهده شد که با کاهش قطر میکروسوزن، فشار و سرعت داخل میکروپمپ افزایش می‌یابد. اسدی و همکاران [14] عوامل الکترومکانیکی مؤثر بر محرک پیزوالکتریک را برای یک میکروپمپ بدون شیر بررسی کردند. دو محرک پیزوالکتریک با ضخامت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفتند و حداکثر جابه‌جایی دیافراگم ۱/۳۹۶۲ میکرومتر در ولتاژ ۴۰ ولت و فرکانس ۵ هرتز بود. لیو و همکاران [15] بر اساس ساختار سری مبکروپمپ‌های چند محفظه‌ای، یک میکروپمپ پیزوالکتریک با عملکرد خروجی بالا را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند دبی میکروپمپ چهار محفظه‌ای ۱/۶۹ برابر میکروپمپ دو محفظه‌ای و حدود ۳ برابر میکروپمپ تک محفظه‌ای است. یانگ و همکاران [16] سیستمی را پیشنهاد کردند که از یک میکروپمپ پیزوالکتریک، کنترل الکتریکی و سایر ماژول‌های مکانیکی تشکیل شده بود. میکروپمپ پیزوالکتریک دارای ساختار سری دو محفظه‌ای بود و از یک پلیمر زیست سازگار ساخته شده بود و برای رساندن انسولین مورد استفاده قرار می‌گرفت. سیستم پیشنهادی شکل ساده، نرخ شکست کم و سازگاری با شرایط کاری ولتاژ معمول داشت. نتایج نشان دادند که با ولتاژ ۳۶ ولت و فرکانس ۲۰۰ هرتز، جریان خروجی و فشار سیستم به ترتیب ۹/۶ میلی لیتر در دقیقه و۱۷/۳ کیلو پاسکال است. هالدکار و همکاران [17] طراحی جدیدی برای محرک پیزوالکتریک پیشنهاد دادند و با طراحی محرک دایره‌ای معمولی و تحلیل جریان سیال مقایسه نمودند. آنها از روش اجزای محدود برای این منظور استفاده کردند و نشان دادند که محرک جدید موجب بهبود عملکرد میکروپمپ می‌شود.

در کار حاضـــر، یک میکروپمپ با محرک پیزوالکتریک شبیه‌سازی می‌شود و تأثیر فرکانس، ولتاژ، مکان محوری ورودی

و خروجی میکروپمپ و ابعاد محرک پیزوالکتریک و غشا مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، استفاده از محرک با سطح مقطع مستطیلی به جای محرک استوانه‌ای پیشنهاد می‌شود و اثر آن بر دبی خروجی سیال مورد نظر و حجم سیال پمپ شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. استفاده از محرک با سطح مقطع مستطیلی برای طراحی میکروپمپ‌های چند محفظه‌ای اهمیت زیادی دارد چرا که قابلیت قرارگیری محفظه‌ها در کنار یکدیگر را افزایش می‌دهد. همچنین، ساخت مقاطع مستطیلی در ابعاد کوچک از لحاظ فناوری ساخت ساده‌تر است. هدف از شبیه‌سازی حاضر، دست‌یابی به یک میکروپمپ پیزوالکتریک با دبی خروجی و حجم سیال پمپاژ شده بالا است که می‌تواند در کاربردهای دارورسانی مورد استفاده قرار گیرد.

هندسه مدل، همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، شامل یک محرک پیزوالکتریک حلقوی در بالای میدان سیال است که به یک غشای انعطاف‌پذیر متصل است. به دلیل تقارن فیزیکی، فقط نیمی از هند سه مد نظر قرار می‌گیرد. سیال به دلیل اعمال ولتاژ خارج و محرک منبسط می‌شود. محیط غشا با حرکت محرک ثابت می‌شود و نیرویی به سیال پایینی آن وارد می‌کند که سیال را از سمت چپ (ورودی) به داخل می‌کشد و از کانال سمت راست (خروجی) بیرون می‌راند. شکل (۱) ابعاد ورودی محفظه، خروجی محفظه، محفظه میکروپمپ، غشا و محرک پیزوالکتریک را نیز نشان می‌دهد.



شکل ۱ طرح‌واره مسئله: الف) نمای کلی میکروپمپ طراحی شده و قسمت‌های مختلف آن، ب) ابعاد ورودی و خروجی محفظه، ج) ابعاد غشا و د) ابعاد محفظه

معادلات حاکم

در یک میکروپمپ واقعی، از محرک پیزوالکتریک با لایه‌های مجزا و اتصالات الکتریکی استفاده می‌شود. در اینجا، از لایه‌های فلزی نازک صرف نظر شده و محرک به عنوان یک بلوک یکپارچه از پیزوالکتریک مدل می‌شود. در نتیجه، اختلاف پتانسیل بالای ۱۵۰۰ ولت به کل پیزوالکتریک اعمال می‌شود که مربوط به قدرت میدان الکتریکی ۰/۲ ولت بر میکرومتر است. ولتاژ مورد نیاز در یک دستگاه واقعی به ضخامت هر لایه در محرک بستگی دارد. برای محاسبه ولتاژ از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$E = nTV \qquad (۱)$$

که T، n، E و V به ترتیب ضخامت لایه پیزوالکتریک، تعداد لایه‌ها در محرک، قدرت میدان الکتریکی و ولتاژ اعمال شده هستند.

ورودی سمت چپ میکروپمپ و خروجی سمت راست، با استفاده از شیرهای چک برای اطمینان از یک‌طرفه بودن جریان کار می‌کنند. در این مدل، شیر با یک شرط مرزی ساده بر اساس تلفات لوله‌کشی K-factor نشان داده می‌شود. زمانی که جریان بر خلاف شیر باشد تلفات زیاد است و هنگامی که جریان در جهت عملیات است، تلفات کم می‌شود. فشار برگشتی حاصل از شیر با معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$P = A\rho u_{av}^2 \qquad (۲)$$

که u_{av} سرعت متوسط سیال در مرز، ρ چگالی سیال و A ثابت بی‌بعدی است که بسته به علامت تغییر می‌کند. فشار برگشتی به عنوان یک تنش معمولی در انتهای یک طول کوتاه لوله اعمال می شود که تضمین می‌کند که جریان سیال در دامنه واقعی است. علی‌رغم این شرایط مرزی تقریبی، آنها را می‌توان برای نشان دادن یک شیر یا دیود ساده سیال به کار برد. ثابت‌های استفاده شده برای مرز خروجی با توجه به موارد استفاده شده در ورودی معکوس می‌شوند و جهت‌گیری متفاوت یک شیر مشابه را نشان می‌دهند.

بار الکتریکی روی سطح محرک پیزوالکتریک با اعمال تنش مکانیکی افزایش می‌یابد و بار الکتریکی نتیجه شده با فشار اعمالی تناسب دارد. بار الکتریکی تولیدی در واحد سطح با P نشان داده شده و σ به عنوان تنش مکانیکی شناخته می‌شود. ضریب کوپلینگ پیزوالکتریکی (d) ارتباط بین این پارامترها را طبق رابطه (۳) نشان می‌دهد.

$$P = d\,\sigma \qquad (۳)$$

علاوه بر این نشان داده شده است که با اعمال میدان الکتریکی

با شدت E کرنشی ایجاد می‌شود که با میدان الکتریکی متناسب است (اثر معکوس پیزوالکتریک). رابطه بین این دو متغیر به صورت معادله (۴) بیان می‌شود:

$$\epsilon = d\,E \qquad (۴)$$

در این معادله، d همان ضریب کوپلینگ پیزوالکتریک است. اغلب به جای P از متغیر D استفاده می شود که این متغیر بیانگر جابه‌جایی الکتریکی است. این پارامتر مطابق معادله (۵) تعریف می‌شود که در آن ε_0 گذردهی خلأ و ε_r گذردهی نسبی ماده است.

$$D = \varepsilon_0 E + p = \varepsilon_0\,\varepsilon_r\,E \qquad (۵)$$

برای بیشتر موارد $\varepsilon_r >> 1$ است، بنابراین می‌توان فرض کرد:

$$p = E\varepsilon_r\,\varepsilon_0 \qquad (۶)$$

همچنین، ضریب g تنش مکانیکی اعمالی را به میدان الکتریکی تولیدی مربوط می‌کند:

$$E = g\sigma \qquad (۷)$$

ضرایب d و g برای عملکرد مواد پیزوالکتریک که به عنوان محرک و حسگر می‌توانند عمل کنند، بسیار مهم هستند. هنگامی که میدان الکتریکی اعمالی مشخص شود، ماده‌ای با مقدار d بالا مناسب‌ترین مورد برای عملکرد تحریک است. همچنین مقدار g بالا برای حداکثر کردن عملکرد حسگرهایی که تحت تنش σ هستند، مناسب است.

محرک پیزوالکتریک بر اساس اصل کوپلینگ الکترومکانیک کار می‌کند که در آن میدان الکتریکی اعمال شده به محرک منجر به کرنش می‌شود. معادله حاکم برای انحراف غشای (W) به صورت زیر است:

$$\frac{\tilde{E}\,h^3}{12(1-\upsilon^2)}\nabla^4 W + h\rho_m\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = f - p \qquad (۸)$$

که $\tilde{E}$، h، υ و ρ_m نسبت پواسون، ضخامت، مدول یانگ مؤثر و چگالی پواسون هستند. f نیرویی است که به دلیل کرنش روی غشا وارد می شود. p فشار مکانیکی روی غشا است که ناشی از سرعت جریان در داخل محفظه پمپ است. این معادله نشان دهنده جفت شدن میدان سیال با میدان جامد است.

جریان سیال درون میکروپمپ تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است و توسط معادلات پیوستگی و ناویر- استوکس توصیف می‌شود:

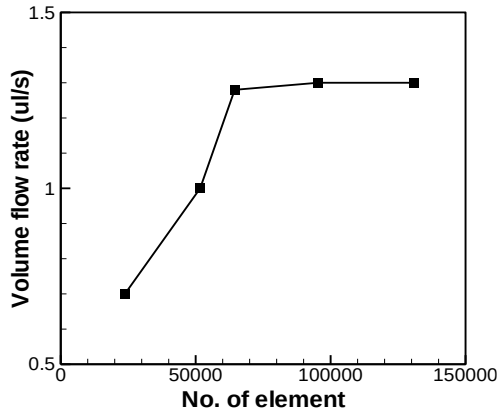
$$\nabla.\,u = 0 \qquad (۹)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u.\nabla.u\right) = -\nabla P + \mu\nabla^2 u \qquad (۱۰)$$

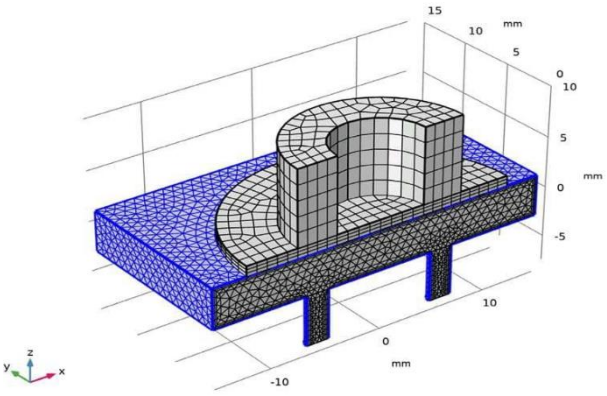
که ρ چگالی سیال، u سرعت، μ ویسکوزیته و P فشار است [18-20]. از معادلات (۳) تا (۸) می‌توان دید که جریان سیال توسط ارتعاش محرک و غشا هدایت می‌گردد. در عین حال، ارتعاش غشا توسط جریان سیال مقاومت می‌کند. بنابراین، شبیه‌سازی عددی دربرگیرنده اثر کوپلینگ جریان الکتریکی به جامد و جامد به سیال است.

استقلال حل از شبکه محاسباتی

برای استقلال حل از شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده، پنج شبکه با تعداد المان‌های متفاوت بررسی شده و برای هر مورد دبی جریان از طریق میکروپمپ نمایش داده شده است (شکل ۲-الف). جهت المان‌بندی هندسه مورد بررسی، میدان‌های جامد و سیال جداگانه در نظر گرفته شده‌اند تا میدان جامد و میدان سیال به طور جداگانه شبکه‌بندی شوند. برای میدان جامد از مش چهاروجهی و برای میدان سیال از مش سه‌وجهی با اندازه‌های مختلف استفاده شده است. شکل (۲-الف) بیانگر آن است که با افزایش تعداد المان‌ها از ۶۴۴۴۱، دبی جریان تغییر نمی‌کند. بنابراین، می‌توان این شبکه‌بندی را برای شبیه‌سازی‌ها و انجام محاسبات مورد استفاده قرار داد. شبکه مورد نظر در شکل (۲-ب) نشان داده شده است.



(الف)

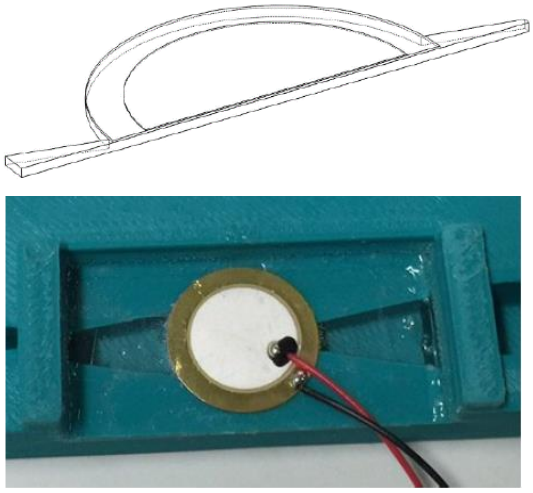


(ب)

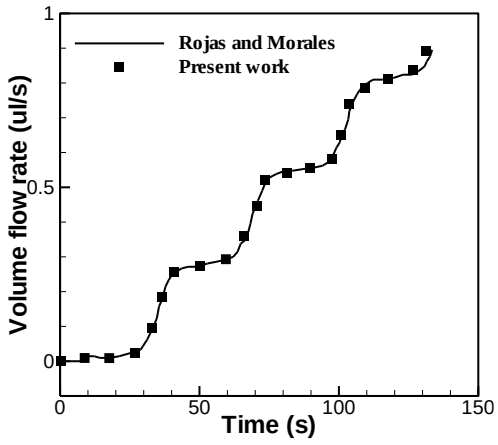
شکل ۲ الف) دبی جریان بر حسب زمان برای شبکه‌های مختلف و ب) شبکه مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌ها

اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از روش حل عددی، میکروپمپ پیزوالکتریک بدون شیر که بر اساس دیافراگم کار می‌کند و توسط روجاس و مورالس [18] معرفی گردیده مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل۳- الف). شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده و هندسه بهینه با استفاده از حل پارامتری تعیین گردیده است. سپس، شبیه‌سازی‌ها در فرکانس ۳۰ هرتز و ولتاژ ۳۰ ولت انجام و دبی جریان نسبت به زمان محاسبه گردید. در شکل (۳- ب) مقادیر محاسبه شده توسط روجاس و مورالس [21] با مقادیر به دست آمده از کار حاضر مقایسه شده است که نمایانگر دقت مناسب شبیه‌سازی حاضر است. روجاس و مورالس [21] نمونه آزمایشگاهی میکروپمپ مورد نظر را نیز فراهم کردند که در شکل (۳- الف) نشان داده شده است.

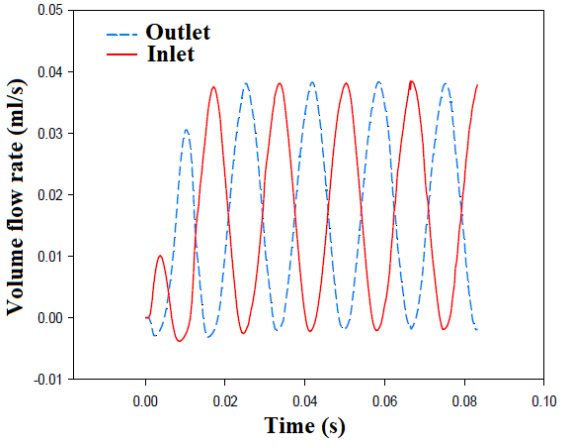


(الف)

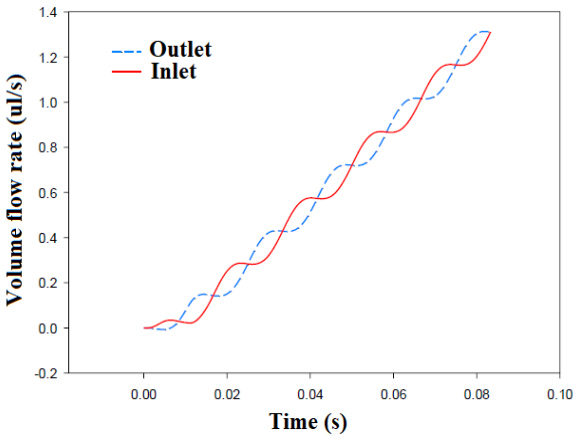


(ب)

شکل ۳ الف) هندسه میکروپمپ و ب) مقایسه حجم سیال خارج شده از میکروپمپ مورد بررسی با نتایج روجاس و مورالس [21]



(الف)



(ب)

شکل ۴ الف) تغییرات دبی بر حسب زمان در ورودی و خروجی میکروپمپ و ب) حجم سیال پمپ شده توسط میکروپمپ

نتایج

حالت مبنا

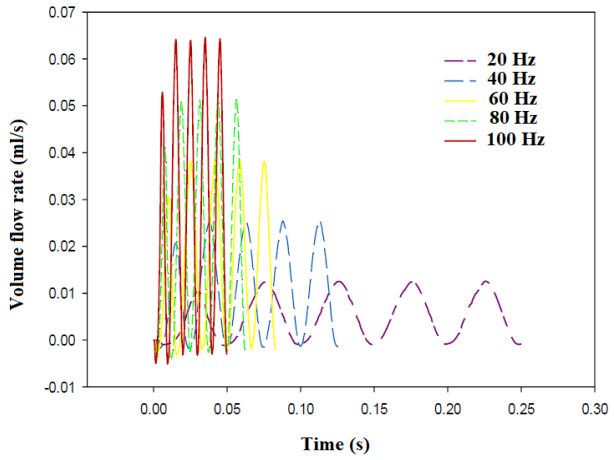
در این حالت، فرکانس دیسک پیزوالکتریک ۶۰ هرتز و ولتاژ کاری پیزوالکتریک برابر ۱۵۰۰ ولت است. جهت اعمال نیروی مرزی فشاری، به محفظه سیال و عمل پمپاژ سیال مورد استفاده که آب است، غشای انعطاف‌پذیر با ضخامت ۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. پس از انتخاب غشا با ضخامت مشخص، امکان تنظیم دبی جریان با استفاده از تغییر پارامترهای فرکانس و ولتاژ طبق رابطه $V = E\,T\,n$ وجود دارد. نتایج حاصل از این میکروپمپ در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) نشان داده شده است. شایان ذکر است که فرکانس، ارتعاشات و ولتاژ، دامنه انحراف غشا را تأمین می‌کنند. شکل (۴-الف) دبی ورودی و خروجی را نشان می‌دهد و حفظ حجم سیال درون دستگاه را تأیید می‌کند. ولتاژ کاری در ۳/۴ اول دوره فعال‌سازی افزایش می‌یابد. پس از آن، جریان دوره‌ای زمانی ثابت به سرعت برقرار می‌شود. تفاوت در جریان ورودی و خروجی با حجم سیال جابه‌جا شده توسط غشا به دلیل ضربه پیزوالکتریک مطابقت دارد و حفظ حجم سیال را تأیید می‌کند. شکل (۴-ب) جریان خالص سیال از طریق ورودی و خروجی را در طول زمان نشان می‌دهد که همواره در حال افزایش است. از این نمودار می‌توان حجم سیال پمپ شده توسط میکروپمپ را نشان داد.

اثر فرکانس بر عملکرد میکروپمپ

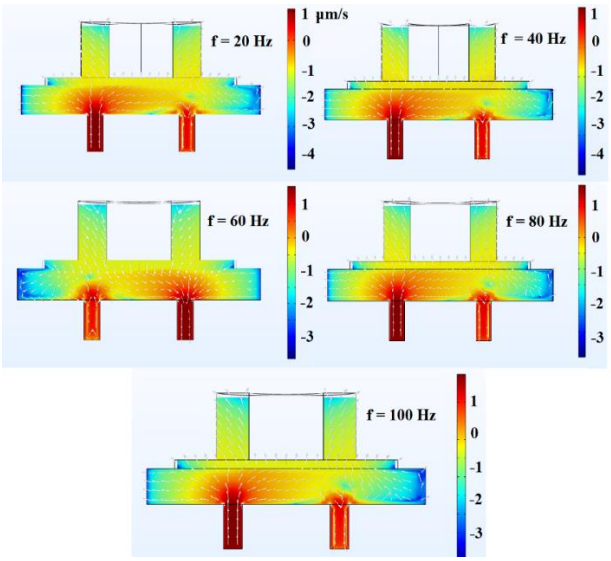
در شکل (۵) دبی خروجی سیال برای فرکانس‌های متفاوت برای ولتاژ ثابت ۱۵۰۰ ولت و ضخامت غشا ۱ میلی‌متر به نمایش درآمده است. ابعاد پیزوالکتریک برای تمامی حالت‌ها یکسان است. در پنج فرکانس متفاوت، دبی خروجی سیال محاسبه می‌گردد تا اثر تغییر فرکانس در محرک پیزوالکتریک مشخص گردد. همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، با افزایش فرکانس، دبی خروجی میکروپمپ بر حسب زمان افزایش پیدا می‌کند. همچنین حجم سیال خارج شده از میکروپمپ نیز با افزایش فرکانس روندی صعودی پیدا می‌کند. دبی خروجی میکروپمپ پیزوالکتریک برابر است با:

$$Q = \sqrt{n} \times C_V \times \Delta V \times f \qquad (۱۱)$$

که n تعداد محفظه‌های میکروپمپ پیزوالکتریک، C_V ضریب تأخیر شیر به محرک پیزو، ΔV تغییر حجم میکروپمپ پیزوالکتریک و f فرکانس کاری میکروپمپ پیزوالکتریک است. طبق این رابطه، زمانی که تعداد محفظه‌های میکروپمپ و ضریب تأخیر شیر ثابت باشند، فرکانس کاری و تغییر حجم میکروپمپ بر دبی خروجی تأثیر می‌گذارند. روند صعودی دبی خروجی میکروپمپ مورد بررسی با افزایش فرکانس، طبق این رابطه قابل استناد است. در شکل (۶) کانتور سرعت در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. با مشاهده کانتورهای سرعت در مقادیر مختلف فرکانس می‌توان گفت که با افزایش فرکانس کاری در میکروپمپ پیزوالکتریک، سرعت سیال در محفظه افزایش می‌یابد.



شکل ۵ نمودار بررسی اثر تغییر فرکانس بر دبی خروجی میکروپمپ



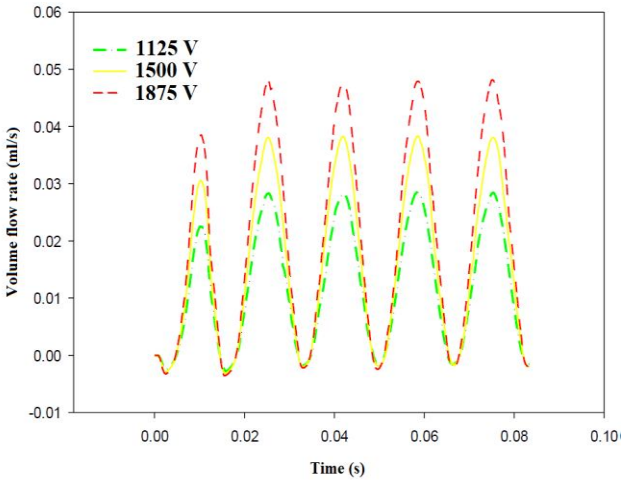
شکل ۶ کانتور سرعت در مقادیر مختلف فرکانس

اثر تغییر ولتاژ بر عملکرد میکروپمپ

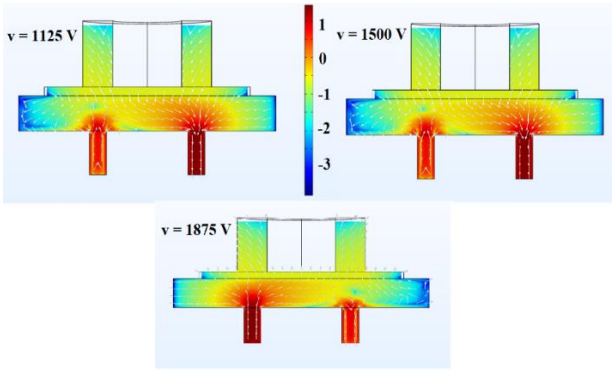
برای بررسی اثر تغییر ولتاژ، قدرت میدان الکتریکی تغییر داده می‌شود. تعداد لایه‌ها در محرک ۷۵ عدد است که ثابت در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه پیزوالکتریک ۱ میلی‌متر است و طبق رابطه بین ولتاژ و قدرت میدان معادله (۱)، با تغییر قدرت میدان الکتریکی، ولتاژهای مختلف حاصل می‌شود. این مقادیر در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل از تغییر ولتاژ در شکل (۷) قابل مشاهده است. در شکل (۸) نیز کانتور سرعت برای مقادیر مختلف ولتاژ نشان داده شده است. همان گونه که از شکل (۷) مشخص است، بر اساس رابطه (۴)، پیش‌بینی می‌شود با افزایش قدرت میدان الکتریکی و در نتیجه افزایش ولتاژ کاری میکروپمپ، جابه‌جایی غشای میکروپمپ افزایش یابد و در نتیجه دبی خروجی سیال افزایش پیدا کند. دبی این میکروپمپ با افزایش ولتاژ، افزایش پیدا کرده است زیرا دامنه جابه‌جایی دیافراگم با افزایش ولتاژ، افزایش می‌یابد. مشخص می‌شود که برای بالابردن دبی خروجی سیال و نیز حجم سیال پمپ شده، افزایش فرکانس و ولتاژ می‌تواند مفید باشد. شکل (۸) نیز بیانگر آن است که با افزایش ولتاژ، سرعت سیال درون محفظه بیشتر می‌شود.

جدول ۱ جدول تغییرات قدرت میدان الکتریکی بر حسب تغییرات ولتاژ مورد بررسی در میکروپمپ

ولتاژ(V)	قدرت میدان الکتریکی(v/um)
۱۱۲۵	۰/۱۵
۱۵۰۰	۰/۲
۱۸۷۵	۰/۲۵



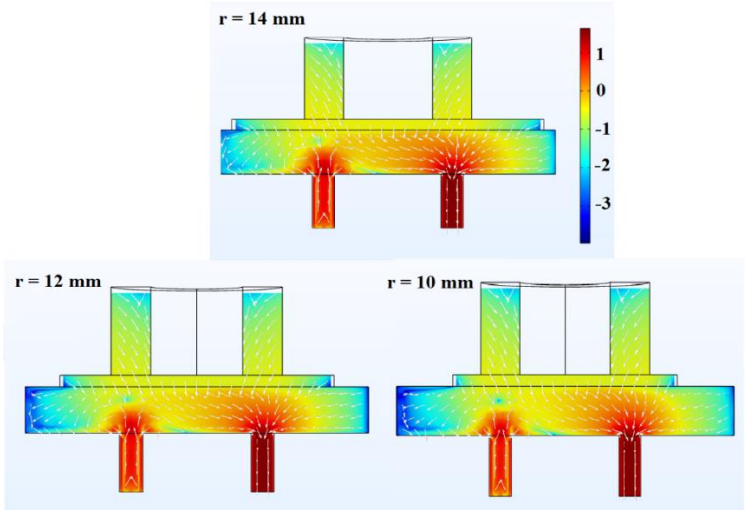
شکل ۷ اثر تغییر ولتاژ بر دبی خروجی میکروپمپ



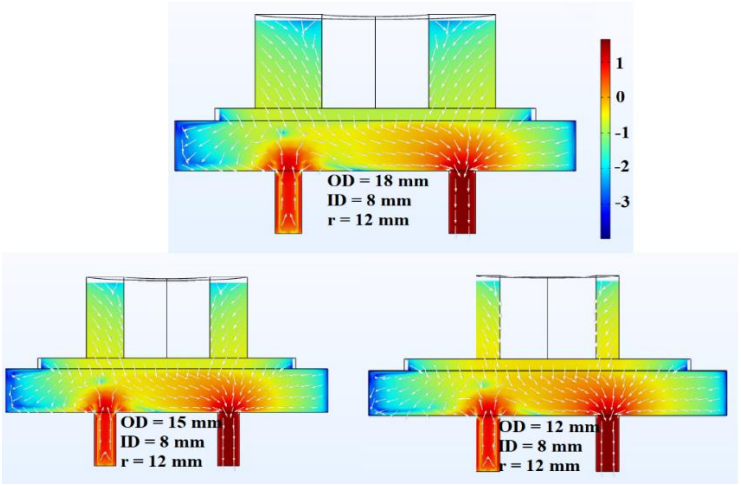
شکل ۸ کانتور سرعت در مقادیر مختلف ولتاژ

اثر تغییر ابعاد محرک پیزوالکتریک و تغییر غشا بر عملکرد میکروپمپ

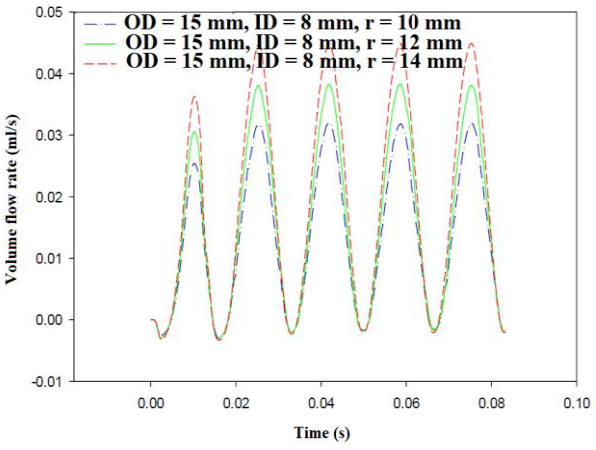
پیزوالکتریک مورد بررسی یک پیزوالکتریک حلقوی با قطر بیرونی ۱۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۸ میلی‌متر است. شعاع غشای حالت مرجع ۱۲ میلی‌متر و ضخامت آن ۱ میلی‌متر است. در شکل (۹) کانتور سرعت برای سه شعاع غشا ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۰) کانتور سرعت برای ابعاد مختلف محرک و غشا نشان داده شده است. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، با تغییر ابعاد محرک پیزوالکتریک و شعاع غشا، عملکرد میکروپمپ مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت غشا در تمامی این حالات ثابت و برابر با ۱ میلی‌متر است. طبق حالت مبنا، فرکانس و ولتاژ به ترتیب برابر با ۶۰ هرتز و ۱۵۰۰ ولت هستند. طبق شکل‌های (۹) و (۱۰) با افزایش سطح غشا و محرک پیزوالکتریک، سرعت سیال درون محفظه بیشتر می‌شود. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با کاهش شعاع غشا نسبت به حالت مبنا، دبی خروجی سیال و حجم سیال پمپ شده کاهش پیدا می‌کند؛ پس هر قدر سطح غشای بالای محفظه سیال بزرگ‌تر باشد، نتیجه مطلوب‌تر است. در مورد تغییر اندازه محرک پیزوالکتریک نیز، بر اساس شکل (۱۲)، با کاهش قطر دیسک پیزوالکتریک، دبی خروجی کاهش پیدا کرده است. پس با افزایش ابعاد غشا و ابعاد محرک پیزوالکتریک، افزایش دبی خروجی و به طبع آن، افزایش حجم سیال پمپ شده نتیجه خواهد شد. طبق رابطه (۱) زمانی که تعداد محفظه های میکروپمپ، ضریب تأخیر شیر و فرکانس کاری ثابت باشند، تغییر حجم میکروپمپ پیزوالکتریک تأثیر مستقیم بر دبی خروجی سیال دارد. در اینجا نیز با افزایش حجم میکروپمپ، دبی افزایش می‌یابد که با این رابطه تطابق دارد.



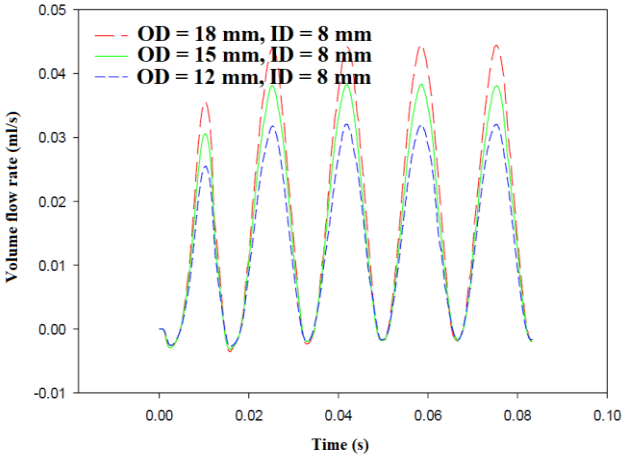
شکل ۹ کانتور سرعت در شعاع‌های غشای متفاوت



شکل ۱۰ کانتور سرعت در ابعاد مختلف محرک پیزوالکتریک



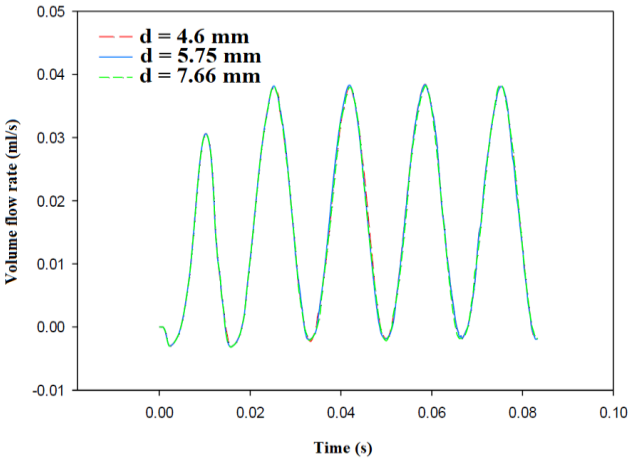
شکل ۱۱ اثر تغییر شعاع غشا بر دبی خروجی میکروپمپ (در این نمودار، OD، ID و r به ترتیب قطر خارجی، قطر داخلی و شعاع غشا هستند)



شکل ۱۲ اثر تغییر ابعاد محرک پیزوالکتریک بر دبی خروجی میکروپمپ (در این نمودار، OD و ID به ترتیب قطر خارجی و قطر داخلی هستند)

اثر تغییر مکان ورودی و خروجی سیال بر عملکرد میکروپمپ

در شکل (۱۳) اثر تغییر مکان ورودی و خروجی محفظه میکروپمپ بر دبی خروجی سیال درون محفظه نشان داده شده است. بقیه پارامترها طبق حالت مبنا است و تنها مکان محور طولی ورودی و خروجی تغییر کرده است. در یک حالت، قسمت ورودی و خروجی سیال نسبت به حالت مبنا از همدیگر فاصله می‌گیرند و در حالتی دیگر دو قسمت ورودی و خروجی به یکدیگر نزدیک می‌شوند، یعنی فاصله بین آنها کمتر می‌شود. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که با فاصله گرفتن دو قسمت ورودی و خروجی از همدیگر، چه این فاصله بیشتر و چه کمتر گردد، دبی خروجی سیال تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند. از رابطه (۱) می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که تغییری در فرکانس یا حجم میکروپمپ اعمال نشود، دبی تغییر نمی‌کند. در اینجا چون ابعاد میکروپمپ تغییر نکرده است، تغییر قابل ملاحظه‌ای در دبی خروجی میکروپمپ، مشاهده نمی‌شود.

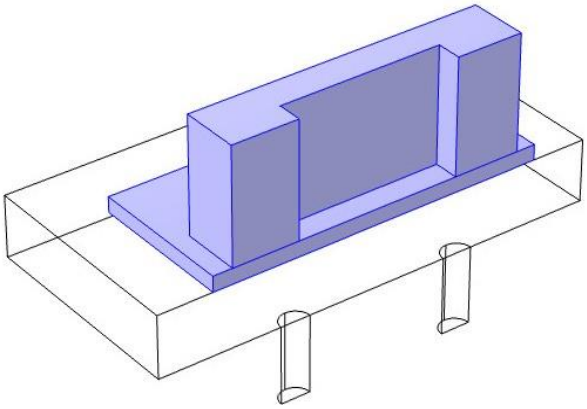


شکل ۱۳ اثر تغییر مکان ورودی و خروجی بر دبی خروجی میکروپمپ

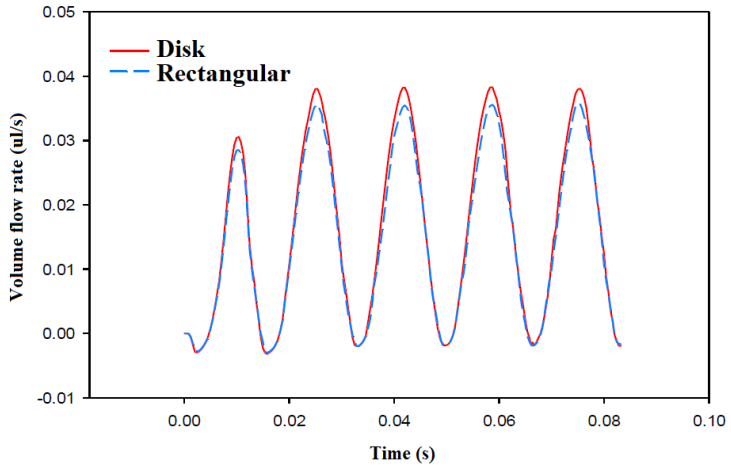
محرک پیزوالکتریک مستطیل شکل

اکثر میکروپمپ‌های پیزوالکتریک گزارش شده به شکل دیسک مدور پیاده‌سازی شده‌اند. محرک پیزوالکتریک می‌تواند دارای مقطع مستطیل شکل یا مربع شکل باشد تا امکان سری کردن محفظه‌ها برای کاربردهای عملی ساده‌تر باشد. در این بخش با تغییر حالت محرک پیزوالکتریک از حالت دیسک به حالت مستطیل، به بررسی این شکل از محرک پیزوالکتریک پرداخته شده است. در شکل (۱۴)، شکل کلی این میکروپمپ و در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، دبی خروجی و حجم سیال پمپ شده این نوع میکروپمپ و مقایسه آن با حالت مبنا نشان داده شده است. در این بررسی، غشا و محرک پیزوالکتریک، در دو شکل مستطیل و مدور دارای سطح مقطع یکسان هستند. در اینجا نیز برای استقلال حل از شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده، پنج شبکه با تعداد المان‌های متفاوت بررسی شده و برای هر مورد بیشینه دبی ورودی و خروجی و جریان خالص از طریق پمپ محاسبه شده است. نتایج نشان دادند که شبکه‌ای با تعداد ۶۵۹۳۵ المان برای شبیه‌سازی محرک مستطیلی کافی است.

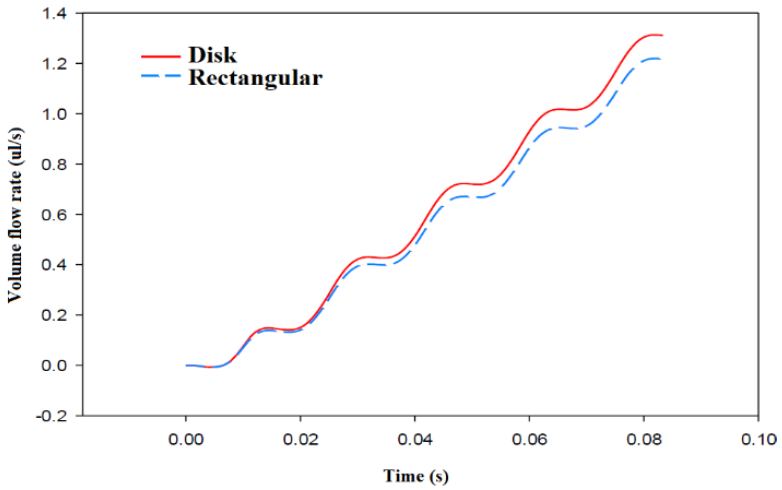
شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان می‌دهند که بین دو میکروپمپ پیزوالکتریک مورد بررسی با محرک‌های به شکل حلقوی و محرک مستطیل شکل، میکروپمپ با محرک حلقوی دبی خروجی بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین، حجم سیال پمپ شده از میکروپمپ با محرک حلقوی بیشتر است. با این حال، این افزایش چشم‌گیر نیست و از آنجا که قرار دادن محفظه‌های مستطیلی به صورت سری در کاربردهای عملی آسان‌تر است، می‌توان از محرک پیزوالکتریک با سطح مقطع مستطیلی برای ساخت میکروپمپ‌های چند محفظه‌ای استفاده کرد.



شکل ۱۴ طرح‌واره میکروپمپ با محرک پیزوالکتریک مستطیل شکل (قسمت جامد میکروپمپ شامل محرک پیزوالکتریک و غشا برجسته شده است)



شکل ۱۵ دبی خروجی میکروپمپ با محرک‌های پیزوالکتریک به صورت حلقوی و مستطیل شکل



شکل ۱۶ حجم سیال پمپ شده توسط میکروپمپ با محرک‌های حلقوی و مستطیل شکل

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، میکروپمپ با محرک پیزوالکتریک حلقوی شکل مورد بررسی قرار گرفته است. میکروپمپ مورد بررسی یک ورودی در سمت چپ و یک خروجی در سمت راست محفظه سیال آب را داراست. قسمت بالایی محفظه را غشا در بر گرفته است و محرک پیزوالکتریک نیز، روی غشا با قطر کمتر نسبت به غشا قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام گرفته است. شبیه‌سازی‌ها برای فرکانس‌های ۲۰ تا ۱۰۰ هرتز و ولتاژهای ۱۱۲۵ تا ۱۸۷۵ ولت صورت گرفته است تا بیشترین مقدار دبی خروجی و حجم سیال پمپ شده حاصل شود. همچنین، تأثیر تغییر ابعاد محرک پیزوالکتریک، تغییر ابعاد غشا، تغییر مکان ورودی و خروجی محفظه سیال و در نهایت تغییر شکل محرک پیزوالکتریک از حلقوی به مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میکروپمپ با محرک پیزوالکتریک حلقوی بازدهی بهتری نسبت به محرک پیزوالکتریکی مستطیل شکل دارد اما از جنبه عملی، ساخت میکروپمپ چند محفظه‌ای با استفاده از محرک‌های با سطح مقطع مستطیلی پیشنهاد مناسبی است. همچنین از نتایج شبیه‌سازی، می‌توان متوجه شد که با افزایش فرکانس، افزایش ولتاژ و بزرگ شدن ابعاد محرک پیزوالکتریک و غشا، دبی سیال در خروجی میکروپمپ و نیز حجم سیال پمپ شده افزایش پیدا می‌کند.

	واژه نامه
Micropump	میکروپمپ
Piezoelectric	پیزوالکتریک
Membrane	غشاء

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] E. K. Sackmann, A. L. Fulton, D. J. Beebe, "The present and future role of microfluidics in biomedical research," *Nature*, vol. 507, no. 1, pp. 181-189 (2014).

[2] S. Mohith, P. N. Karanth, S. M. Kulkarni, "Recent trends in mechanical micropumps and their applications: A review," *Mechatronics*, vol. 60, no. 1, pp.34-55 (2019).

[3] Y. N. Wang, L. M. Fu, "Micropumps and biomedical applications–A review," *Microelectronic Engineering*, vol. 195, no. 1, pp. 121-138 (2018).

[4] D. J. Laser, and J. G. Santiago, "A review of micropumps," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, pp. 35-64 (2004).

[5] W. J. Spencer, W. T. Corbett, L. R. Dominguez, B. D. Shafer, "An electronically controlled piezoelectric insulin pump and valves," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 25, pp. 153-156 (1978).

[6] H. T. G. van Lintel, F. C. M. van De Pol, S. Bouwstra, "A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon," *Sensors and Actuators*, vol. 15, pp. 153-167 (1988).

[7] E. Stemme, G. Stemme, "A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 39, pp. 159-167 (1993).

[8] M. Koch, N. Harris, A. G. R. Evans, N. M. White, A. Brunnschweiler, "A Novel Micromachined Pump Based On Thick-Film Piezoelectric Actuation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 70, pp. 98-103 (1998).

[9] L. Saggere, N. W. Hagood, D. C. Roberts, H. Li, J. L. Steyn, K. Turner, J. A. Carretero, "Design, Fabrication, and Testing of a Piezoelectrically Driven High Flow Rate micropump," *Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IEEE Cat. No.00CH37076)*, (2000).

[10] K. Junwu, Y. Zhigang, P. Taijiang, C. Guangming, W. Boda, "Design and test of a high-performance piezoelectric micropump for drug delivery," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 121, pp. 156-161 (2005).

[11] C. Y. Lin, H. K. Ma, B. R. Hou, H. Y. Wu, J. J. Gao, M .C. Kou, "Development and application of a diaphragm micro-pump with piezoelectric device," *Microsystem Technologies*, vol. 14, pp. 1001-1007 (2008).

[12] S. Revathi, and R. Padmanabhan, "Design and Development of Piezoelectric Composite-Based Micropump," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 27, no. 6, pp. 1105-1113 (2018).

[13] R. K. Haldkar, T. Sheorey, V. K. Gupta, "The Effect of Operating Frequency and Needle Diameter on Performance of Piezoelectric Micropump," *Advanced Materials*, pp. 567-578 (2018).

[14] H. Asadi Dereshgi, M. Z. Yildiz, N. Parlak, "Performance Comparison of Novel Single and BiDiaphragm PZT-Based Valveless Micropumps," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 13, pp. 401-412 (2020).

[15] X. Liu, X. Li, M. Wang, S. Cao, X. Wang, G. Liu, "A High-Performance Piezoelectric Micropump with Multi-Chamber in Series," *Applied Sciences*, vol. 12. no. 9, pp. 44-83 (2022).

[16] Z. Yang, L. Dong, M. Wang, G. Liu, X. Li, Y. Li, "A wearable insulin delivery system based on a piezoelectric micropump," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 347, p. 113909 (2022).

[17] R. K. Haldkar, A. Khalatkar, V. K. Gupta, T. Sheorey, "New piezoelectric actuator design for enhance the micropump flow," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 776-781 (2021).

[18] M. Bayareh, S. Mortazavi, "Equilibrium Position of a Buoyant Drop in Couette and Poiseuille Flows at Finite Reynolds Numbers," *Journal of Mechanics*, vol. 29, no. 1, pp. 53–58 (2013).

[19] 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).

[20] M. Bayareh, S. Mortazavi, "Binary collision of drops in simple shear flow at finite Reynolds numbers: Geometry and viscosity ratio effects," *Advances in Engineering Software*, vol. 42, no. 8, pp. 604–611, (2013).

[21] J. J. Rojas, J. E. Morales, "Design and simulation of a piezoelectric actuated valveless micropump," *In Proceedings of the COMSOL Conference*, Boston, pp. 1-3 (2015).

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

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

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Numerical Simulation of Turbulent Heat Transfer in Boiler with Supercritical Fluid and Asymmetric Thermal Conditions

Research Article

Saied Moghaddam[1]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.81867.1179

Abstract *Heat transfer in boiler with supercritical fluid is asymmetrical. Also, in this type of boilers, pipes are installed both horizontally and inclined. But usually in the previous works, heat transfer is considered symmetrically or the pipes are horizontal or vertical. Therefore, in the present paper, heat transfer in a boiler tube with supercritical fluid in which there are both horizontal and inclined parts is studied and analyzed. The heat flux of the pipe is considered asymmetric. Numerical simulation has been done using Fluent software. Also, the REFPROP database has been used to apply the supercritical fluid properties of water. In order to model the turbulence, the RNG k-ε model based on Reynolds-averaged Navier–Stokes has been used. The results show that the highest and lowest internal tube temperature reach near the pseudocritical temperature range (380 Celsius) at a height of 10 m and 15.5 m, respectively. The highest temperature of the tube wall changes from the beginning to the end of the tube between 603 °C and 666 °C. Also, the Nusselt number increases with the increase of the tube height and its value increases significantly near the pseudocritical temperature. In this range, the value of the Nusselt number reaches 6800, which is 3.6 times its value at the entrance of the tube.*

Key Words Supercritical boiler, Pseudocritical point, Numerical solution, Asymmetric thermal flux, Thermophysical properties

1. Introduction

Supercritical boilers are a type of power plant boilers. In these boilers, supercritical water conditions are used to evaporate water. Considering the large changes in water properties in the supercritical region, it is critical to investigate the heat transfer of water in the supercritical state in the boiler. The higher temperature and pressure of water vapor in boilers with supercritical fluid improve efficiency and, as a result, reduce greenhouse gas emissions. The pipes through which the supercritical water flows are located around the boiler body. The combustion gases pass through the boiler body. Therefore, the thermal conditions of the pipes are asymmetrical. That is, half of the walls of the pipes, which are located towards the center of the boiler body, are in the vicinity of the heat flux of combustion gases. The heat flux of the half of the pipe wall that is in contact with the external body of the boiler is also almost equal to zero (the external body of the boiler is thermal insulation).

Although many studies have investigated the supercritical water inside the pipe, most of them have considered thermal conditions symmetrical. Moreover, the flow is usually considered inside a horizontal or vertical pipe. Therefore, in the present research, the numerical solution of the supercritical water flow in a pipe of a real boiler that has both inclined and horizontal parts is considered. Furthermore, asymmetric heating conditions have been applied for the heat flux around the tube carrying the supercritical flow according to the operation of the boiler. Simultaneous investigation of these factors in a supercritical boiler can help to understand heat transfer and supercritical water flow in boiler tubes.

2. Material and Methods

The boiler of the Neka power plant in Mazandaran, Iran, is a type of boiler with a supercritical fluid and a nominal power of 440 MW. For this reason, the evaporator part of this boiler, which includes the supercritical flow of water, is considered to check heat transfer and supercritical fluid flow. The evaporator tubes are composed of two inclined and horizontal parts. The diameter of the pipes through which the supercritical flow of water passes is 28 mm and the thickness of the pipe wall is 5 mm. The length and height of the pipe are 100 and 20 m, respectively. The angle of the inclined pipe section is equal to 15 degrees. A sheet with a thickness of 3 mm and a height of 7 mm is installed on the pipes at the top and bottom. The heat flux in the inner part of the tube is 250 kW/m^2. The outer part of the tube is considered insulated. Moreover, the flow rate of water entering the pipe is equal to 2.247 kg/s, the

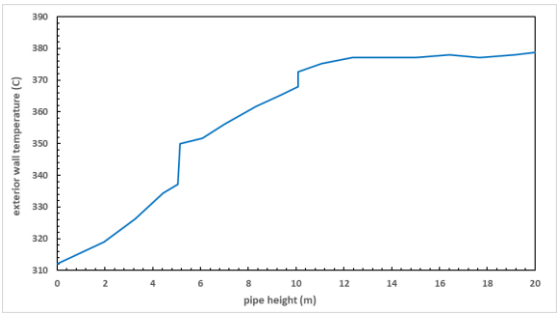
*Manuscript received: April 8, 2023. Revised, January 28, 2024, Accepted, April 9, 2023.

[1] Assistant Professor Department of Food Technology, Faculty of Agricultural Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. **Email:** saiedmoghaddam@ut.ac.ir

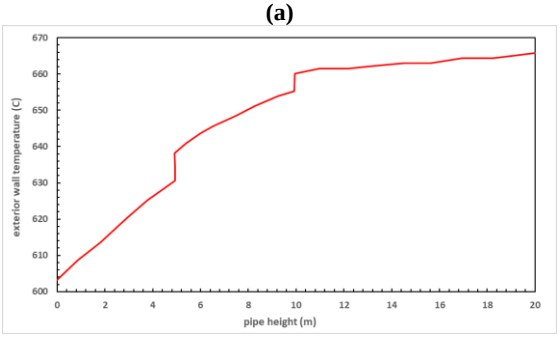
temperature of the entering water is 312ºC, and the water pressure at the entrance of the pipe is 24.12 MPa.
The water flow inside the pipe is turbulent. To simulate the flow, the equations of continuity, RANS, and energy were solved using the FLUENT software. The number of created grids was approximately nine million. The FLUENT software uses the REFPROP database for the supercritical fluid properties of water. The solver model was set to pressure-based and the flow condition was considered steady state. In addition, the acceleration of gravity was activated. The turbulence model RNG κ-ε was considered to simulate the turbulent fluid flow.

3. Results

One of the most important values in the design and operation of boiler tubes is the maximum temperature of the outer wall of the tubes. If the operating temperature exceeds the temperature that the pipe material can withstand, it will damage the pipes. In Figure 1, the minimum and maximum temperature changes of the outer wall of the pipes are plotted according to the height of the pipe. The minimum temperature of the external wall of the pipe changes from 312ºC to 381ºC and the maximum temperature of the external wall of the pipe changes from 603ºC to 666ºC. Therefore, the maximum temperature of the pipe wall increases between 603ºC and 666ºC from the beginning to the end of the pipe. The material of the pipe must be such that it can withstand this maximum temperature.



(a)



(b)

Figure 1: Changes in the minimum and maximum temperatures of the outer wall of the pipe according to the height of the pipe a) minimum temperature b) maximum temperature

For a more detailed examination of changes in the temperature of the pipe body and the temperature of the supercritical water, the temperature contour at the pipe outlet is drawn in Figure 9. The highest body temperature occurs in the plates installed on the boiler tubes. The temperature of the pipe on the insulation side is similar to the temperature of the fluid inside the pipe and is equal to 380ºC, and the temperature of the outer body of the pipe on the side where the heat flux enters is approximately 480ºC.

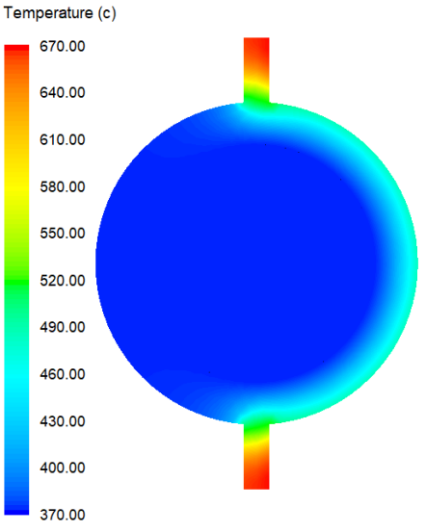


Figure 2: Temperature contour at the outlet of the boiler tube

4. Conclusion

The supercritical water flow in the boiler tubes of the Neka power plant in Mazandaran, Iran, which has both inclined and horizontal parts and its heat flux is asymmetrical, was numerically simulated using the FLUENT software. It was concluded that the highest temperature occurs at the angle of $\alpha = 90^{\circ}$ and the lowest temperature occurs at the angle of $\alpha = -90^{\circ}$. Furthermore, the highest and lowest temperatures of the inner wall of the pipe are at the height of 10 m and 15.5 m, respectively, in the subcritical temperature range, and the highest temperature of the pipe wall varies from 603˚C to 666˚C from the beginning to the end of the pipe. Finally, it can be concluded that the FLUENT software along with the REFPROP database can be used to simulate the flow and heat transfer of supercritical water in the supercritical boiler tube.

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد

شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت آشفته در بویلر با سیال فوق‌بحرانی و شرایط گرمایی نامتقارن*

مقاله پژوهشی

سعید مقدم(۱)

***DOI**: 10.22067/jacsm.2024.81867.1179*

چکیده *انتقال حرارت در بویلر با سیال فوق‌بحرانی، به صورت نامتقارن می‌باشد. همچنین در این نوع بویلرها، لوله‌ها هم به صورت افقی و هم به صورت شیب‌دار نصب می‌شوند، اما معمولا در کارهای بررسی شده، انتقال حرارت به صورت متقارن و یا لوله‌ها به صورت افقی یا عمودی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین در مقاله حاضر، انتقال حرارت در یک لوله بویلر با سیال فوق بحرانی که در آن هم قسمت افقی و هم قسمت شیب‌دار وجود دارد، مورد مطالعه و تحلیل قرار می‌گیرد. شار حرارتی لوله به صورت نامتقارن در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام گردیده است. همچنین از پایگاه داده REFPROP برای اعمال خصوصیات سیال فوق بحرانی آب استفاده گردیده است. به منظور مدل‌سازی آشفتگی، از مدل RNG k-ε مبتنی بر ناویراستوکس میانگیری‌شده رینولدز استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین و کمترین دمای دیواره داخلی لوله به ترتیب در ارتفاع‌های ۱۰ m و ۱۵/۵ m در محدوده دمای شبه‌بحرانی (۳۸۰°C) قرار می‌گیرند. بیشترین دمای دیواره لوله از ابتدا تا انتهای لوله بین ۶۰۳°C تا ۶۶۶ °C تغییر می‌یابد. همچنین عدد ناسلت با افزایش ارتفاع لوله افزایش یافته و مقدار آن در نزدیکی دمای شبه‌بحرانی، افزایش چشم‌گیری دارد. در این محدوده مقدار عدد ناسلت به ۶۸۰۰ می‌رسد که ۳/۶ برابر مقدار آن در ورودی لوله است.*

واژه‌های کلیدی بویلر فوق‌بحرانی، نقطه شبه‌بحرانی، حل عددی، شار حرارتی نامتقارن، خواص ترموفیزیکی.

مقدمه

یکی از انواع بویلرهای نیروگاهی، بویلرهای فوق‌اشباع می‌باشند. در این بویلرها برای تبخیر آب از شرایط فوق‌بحرانی آب استفاده می‌کنند. آب در فشـــار ۲۲/۰۶۴ MPa و دمای ۳۷۳/۹۵ oC در حالت فوق‌بحرانی قرار می‌گیرد. در نقطه فوق‌بحرانی تفاوت میان ناحیه مایع و بخار از بین می‌رود. همچنین ظرفیت گرمایی ویژه سیال در نقطه فوق‌بحرانی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. سیال فوق‌بحرانی دارای تغییرات شدید خواص ترموفیزیکی در این محدوده می‌باشـــد. با توجه به تغییرات زیاد خواص آب در ناحیه فوق‌اشباع از جمله چگالی، ویسکوزیته، رسانندگی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه، بررســـی انتقال حرارت آب در حالت فوق‌اشباع در بویلر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

دما و فشار بالاتر بخار آب در بویلرهای با سیال فوق‌بحرانی باعث بهبود راندمان و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. همچنین با اینکه بویلرهای با سیال فوق‌بحرانی قیمت بیشتری نسبت به بویلرهای معمولی (شرایط زیر بحرانی) دارند، اما سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر در بویلرهای با سیال فوق‌بحرانی با صرفه‌جویی هزینه به دلیل کاهش هزینه‌های عملیاتی جبران می‌گردد. بنابراین بویلرهای با سیال فوق‌بحرانی در سه حوزه بهره وری، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه کارکرد، که امروزه

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱/۱۹و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱/۲۰ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه فناوری صنایع غذایی، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: saiedmoghaddam@ut.ac.ir

بیشترین اهمیت را برای صاحبان و اپراتورهای نیروگاه‌ها دارند، مورد توجه می‌باشند. بویلرهای با سیال فوق‌بحرانی معمولا در نیروگاه‌ها برای تولید بخار و سپس چرخاندن توربین‌ها برای تولید الکتریسیته کاربرد دارند. لوله‌هایی که جریان آب فوق‌بحرانی از آن عبور می‌کنند در اطراف بدنه بویلر قرار دارند. همچنین جریان گازهای احتراق از داخل بدنه بویلر عبور می‌کنند. بنابراین شرایط گرمایی لوله‌ها به صورت نامتقارن است؛ یعنی نیمی از جداره لوله‌ها که به سمت مرکز بدنه بویلر قرار دارند در مجاورت شار حرارتی گازهای احتراق هستند. شار حرارتی نیمی از جداره لوله که در تماس با بدنه خارجی بویلر هستند نیز تقریبا برابر با صفر است (بدنه خارجی بویلر عایق حرارتی می‌باشد).

کارهای زیادی برای بررسی جریان فوق‌بحرانی در داخل لوله انجام شده است. ولی اکثر آن‌ها شرایط گرمایی را به صورت متقارن در نظر گرفته‌اند. همچنین معمولا جریان در داخل یک لوله افقی یا عمودی در نظر گرفته شده است.

یاماگاتا و همکاران [1] جریان آب فوق‌بحرانی را در لوله‌های افقی و عمودی با شار گرمایی یکنواخت و متقارن ۱۱۶ kW/m^2 تا ۹۳۰ kW/m^2 به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در شار حرارتی به حد کافی کم، ضریب انتقال حرارت برای لوله افقی پیرامون محیط لوله یکنواخت بوده و مشابه لوله عمودی است. اما در شارهای حرارتی بزرگ‌تر، ضریب انتقال حرارت در محیط پایین و بالای لوله افقی به ترتیب بیشتر و کمتر از لوله عمودی است. ژانگ و همکاران [2] مدل‌های آشفتگی مختلف را برای شبیه‌سازی عددی جریان فوق‌بحرانی در لوله‌های افقی و عمودی استفاده کرده‌اند. آن‌ها نتایج تحلیل عددی را برای مدل‌های آشفتگی مختلف با نتایج تجربی مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که مدل تنش رینولدز (Reynolds stress model) تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. کنگ و همکاران [3] اثر عدد پرانتل آشفتگی را بر انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی با استفاده از مدل SST $k-\omega$ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از مدل عدد پرانتل آشفتگی ثابت منجر به خطا در پیش‌بینی ویژگی‌های انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی تحت شرایط افت انتقال گرما می‌گردد. شبیه‌سازی‌های عددی مستقیم (DNS) برای مطالعه انتقال حرارت آشفته اجباری آب در دو فشار فوق‌بحرانی مختلف ۲۳ MPa و ۲۵ MPa در یک لوله با شار حرارتی ثابت توسط لیو و همکاران [4] استفاده گردیده است. هدف از این مطالعه، بررسی مکانیزم‌های انتقال حرارت آشفته سیالات فوق‌بحرانی در جریان در حال توسعه و در فشارهای متفاوت بوده است. نتایج این کار نشان داد که در نسبت فشار کمتر (نسبت فشار سیال به فشار بحرانی سیال) هر دو مقدار ضریب اصطکاک و عدد ناسلت کوچک‌تر می‌شوند. اسچات و همکاران [5] کارایی روابط تجربی را برای شروع افت انتقال حرارت (DHT) (Deteriorated Heat Transfer) در لوله عمودی برای آب فوق‌بحرانی بررسی کردند. افت انتقال حرارت در سیال فوق‌بحرانی به علت تغییرات شدید خواص فیزیکی سیال در فشارهای بالاتر از فشار بحرانی رخ می‌دهد. آن‌ها یک رابطه تجربی پیشنهاد کردند که ۷۶/۹٪ از داده‌های DHT را پیش‌بینی می‌کند. آن‌ها توزیع دمای بخار و دیواره را در هر ردیف از لوله‌های بویلر تعیین کردند. وگلارز و همکاران [6] سوپرهیتر بخار را در یک بویلر فوق‌بحرانی به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که دانستن دمای دیواره‌های لوله و بخار در امتداد جهت جریان، انتخاب جنس فولاد مناسب برای لوله‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. هائو و همکاران [7] جریان و انتقال حرارت آب فوق بحرانی را در لوله‌های یک بویلر فوق‌بحرانی ۱۰۰۰ مگاواتی با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که ضریب انتقال حرارت با افزایش دبی ورودی افزایش می‌یابد. همچنین روابط مختلفی برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت ارائه کردند. ژانگ و چی [8] انتقال حرارتی ترکیبی آشفته آب فوق‌بحرانی را در یک لوله عمودی که دارای شیارهای V شکل می‌باشد به صورت شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها برای حل عددی از مدل آشفتگی عدد رینولدز کوچک (Low-Reynolds number) استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که زاویه شیار ۱۲۰ درجه بهترین عملکرد انتقال حرارت را در بین سه زاویه شیار بررسی شده ارائه می‌دهد. همچنین عمق شیار کمتر باعث می‌گردد که افزایش انتقال حرارت تضعیف شود. دو و همکاران [9] از حل عددی برای بررسی تأثیر قطر بر انتقال حرارت و جرم آب فوق‌بحرانی در یک لوله عمودی استفاده کرده‌اند. مقادیر قطر از چند میلی‌متر تا کمتر از یک

میلی‌متر در این کار در نظر گرفته شده است. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که کاهش قطر سبب افزایش کارایی انتقال حرارت می‌گردد. روش پیش‌بینی برای وقوع شار حرارتی بحرانی (CHF) (Critical Heat Flux) برای جریان آب فوق‌بحرانی به صورت تئوری و آماری توسط لو و همکاران [10] مورد بررسی قرار گرفته است. CHF جریان فوق‌بحرانی، به عنوان کمترین شار حرارتی که سبب بیشترین دمای دیواره می‌گردد تعریف می‌شود. در این کار با بررسی کارهای آزمایشگاهی متفاوت، یک رابطه تجربی با دقت بالا برای پیش‌بینی CHF پیشنهاد گردیده است. ژو و همکاران [11] انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی را در یک لوله دیواره آبی (Water wall) عمودی به سمت بالا در یک بویلر ۶۶۰ MW را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که لوله دیواره آبی می‌تواند مانع از وجود جوشش فیلمی (Film boiling) و دمای بیش از حد شود، و سبب می‌گردد که انتقال حرارت دیواره آبی ایمن باشد. وانگ و همکاران [12] انتقال حرارت به آب فوق‌بحرانی در یک لوله صاف با زاویه شیب ۲۵ درجه را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزایش شار جرمی انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. آن‌ها همچنین از حل عددی برای بررسی دقیق‌تر موضوع استفاده کردند و نتیجه گرفتند که تأثیر شار جرمی متغیر بر انتقال حرارت فوق‌بحرانی با تغییر ویژگی‌های توزیع شعاعی آشفتگی و خواص فیزیکی، تحقق می‌یابد.

در کارهایی که به آن‌ها اشاره شد، شار حرارتی وارد به دیواره لوله جریان آب فوق‌بحرانی به صورت متقارن فرض شده است. وانگ و همکاران [13] جریان فوق‌بحرانی آب را در یک لوله عمودی با شرایط شار حرارتی نامتقارن به صورت تحلیل عددی انجام داده‌اند. تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد که سرعت سیال در ناحیه گرمایش به صورت M شکل و در ناحیه عایق حرارتی به صورت سهمی در می‌آید. همچنین اختلاف چگالی زیاد بین سمت در حال گرمایش لوله و سمت عایق گرمایی آن، تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از تنش‌های برشی را افزایش می‌دهد. لی و همکاران [14] انتقال حرارت جریان آب فوق‌بحرانی را در یک لوله دایره‌ای عمودی که از یک طرف گرم می‌شود به صورت عددی بررسی کرده‌اند. مطالعات آن‌ها برای فشار ۲۴/۸۲ MPa و شار حرارتی بین ۱۵۸ kW/m^2 تا ۳۷۰ kW/m^2 انجام شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که در محدوده مورد مطالعه، همبستگی تجربی ناسلت برای گرمایش متقارن می‌تواند حداکثر دمای دیواره محیطی یک لوله گرم شده به صورت نامتقارن را پیش‌بینی کند. ژانگ و همکاران [15] انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی را در یک لوله عمودی گیرنده برج خورشیدی مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها از مدل RNG $\kappa-\varepsilon$ با تابع دیواره استاندارد برای حل عددی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که حداکثر دمای دیواره برای جریان آب فوق‌بحرانی در لوله‌ای که از یک طرف توسط شار گرمای فرودی متمرکز خورشیدی گرم می‌شود، در دیواره بیرونی به سمت خورشید رخ می‌دهد. در این محل شار گرمای فرودی بیشترین مقدار را دارد. کیو و همکاران [16] انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی در لوله عمودی رو به بالا را تحت حرارت متقارن و نامتقارن به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها در این کار تفاوت بین گرمایش متقارن و نامتقارن را تبیین کردند. دمای دیواره لوله صاف تحت گرمایش نامتقارن توزیع سهمی را نشان می‌دهد و مقدار ماکزیمم آن در نقطه میانی سمت دیواره گرم شده رخ می‌دهد. همچنین، بیشترین مقدار دمای دیواره در حالت گرمایش نامتقارن بزرگ‌تر از حالت دمای متقارن است.

با توجه به بررسی کارهای انجام شده، بررسی دقیق‌تر انتقال حرارت جریان آب فوق‌بحرانی در حالتی که گرمایش نامتقارن وجود دارد مورد نیاز است. همچنین در کارهای اشاره شده لوله‌ها به صورت افقی یا عمودی در نظر گرفته شده‌اند. در صورتی که در بویلرهای فوق‌بحرانی، لوله‌ها هم به صورت افقی و هم به صورت شیب‌دار وجود دارند. بنابراین در این کار حل عددی جریان آب فوق‌بحرانی در یک لوله از یک بویلر واقعی که هم قسمت شیب‌دار و هم قسمت افقی دارد در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط گرمایی نامتقارن برای شار حرارتی اطراف لوله حامل جریان فوق‌بحرانی مطابق کارکرد بویلر اعمال شده است. بررسی هم‌زمان این عوامل در بویلر فوق‌بحرانی می‌تواند به فهم انتقال حرارت و جریان آب فوق‌بحرانی در لوله‌های بویلر کمک کند. در ابتدا برای صحه‌گذاری حل عددی، یک کار آزمایشگاهی برای مقایسه نتایج با حل عددی حاضر انتخاب می‌گردد. سپس

بعد از اطمینان از روش و نتایج حل عددی، انتقال حرارت در لوله بویلر مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

فیزیک مسئله و معادلات حاکم

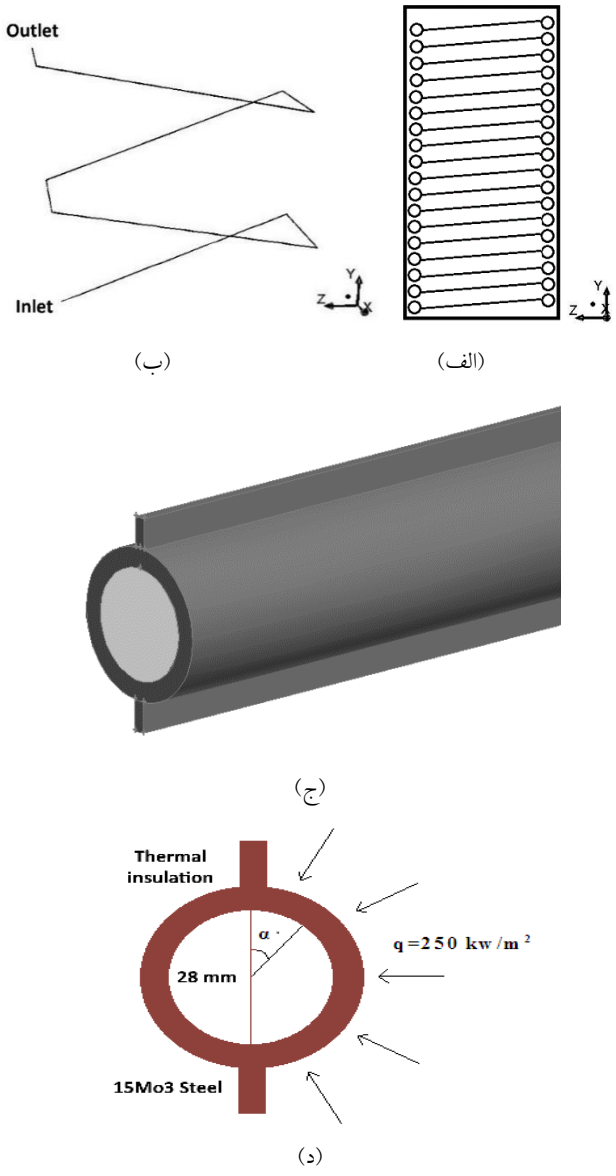
بویلر نیروگاه نکا مازندران از نوع بویلر با سیال فوق‌بحرانی و توان نامی ۴۴۰ MW می‌باشد. به همین دلیل بخش اواپراتور این بویلر که شامل جریان فوق‌بحرانی آب می‌باشد برای بررسی انتقال حرارت و جریان سیال فوق‌بحرانی در نظر گرفته شده است. نمای اواپراتور در این بویلر و نحوه آرایش هندسی لوله‌ها در آن، در شکل (۱-الف) نمایش داده شده است. لوله‌های اواپراتور مطابق شکل (۱-ب)، از دو بخش شیب‌دار و افقی تشکیل شده‌اند. قطر لوله‌هایی که جریان فوق‌بحرانی آب از آن‌ها عبور می‌کند برابر با ۲۸ mm و ضخامت دیواره لوله برابر با ۵ mm است. طول لوله برابر با ۱۰۰ m و ارتفاع آن نیز برابر با ۲۰ m است. زاویه بخش لوله شیب‌دار نیز برابر با ۱۵ درجه است. بر روی لوله‌ها در سمت بالا و پایین یک ورق با ضخامت ۳ mm و ارتفاع ۷ mm نصب گردیده است. همچنین جنس لوله‌ها و ورق نصب شده بر روی آن از فولاد آلیاژی 15Mo3 با ضریب رسانندگی گرمایی ۱۶/۳W/m.K3 می‌باشد. جریان گازهای احتراق از بخش داخل لوله عبور کرده، در نتیجه قسمت داخلی لوله ($0^\circ \prec \alpha \prec 180^\circ$) تحت تأثیر شار حرارتی تقریبا یکنواخت قرار می‌گیرد. با استفاده از موازنه انرژی در بویلر فوق‌بحرانی نیروگاه نکا، مقدار این شار حرارتی برابر با ۲۵۰ kW/m^2 به دست آمده است. قسمت بیرونی لوله ($-180^\circ \prec \alpha \prec 0^\circ$) نیز تحت تأثیر شار حرارتی نبوده و نزدیک به دیواره خارجی بویلر که عایق می‌باشد قرار دارد. بنابراین بخش بیرونی لوله عایق در نظر گرفته می‌شود. همچنین دبی آب ورودی به لوله برابر با ۲/۲۴۷ kg/s، دمای آب ورودی ۳۱۲ ^oC و فشار آب در ورودی لوله برابر با ۲۴/۱۲ MPa می‌باشد.

جریان آب داخل لوله آشفته می‌باشد. معادلات پیوستگی، ناویراستوکس میانگیری‌شده رینولدز (RANS) و انرژی مطابق معادله (۱) است [17,18]:

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho \vec{g} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k}\right) - \rho \overline{u_i' u_j'}\right]$$

$$\frac{\partial(\rho c_p \bar{u}_j \bar{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}\right) \quad (۱)$$



شکل ۱ هندسه لوله بویلر با سیال فوق‌بحرانی در نیروگاه نکا مازندران: الف) شماتیک کلی اواپراتور، ب) نمای یکی از لوله‌ها در اواپراتور، ج) نمای نزدیک‌تر لوله و د) شار حرارتی نامتقارن

در این معادلات ρ چگالی، $\bar{u}$ سرعت متوسط‌گیری‌شده زمانی، P فشار، g شتاب جاذبه، μ ویسکوزیته دینامیکی، $\bar{T}$ دمای متوسط‌گیری‌شده زمانی، c_p ظرفیت گرمایی ویژه، k رسانندگی گرمایی، μ_t ویسکوزیته آشفتگی و Pr_t عدد پرانتل آشفتگی با مقدار ۰٫۹ می‌باشد. عبارت آخر در معادله ناویراستوکس ($\rho\overline{u_i'u_j'}$) تنش رینولدز می‌باشد که باید شبیه‌سازی گردد. این عبارت در روش ناویراستوکس میانگیری‌شده رینولدز توسط معادلات (۲) محاسبه می‌گردد [17]:

$$\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}\left(\rho\kappa+\mu_t\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k}\right)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \kappa^2/\varepsilon$$

(۲)

در این معادله C_μ ضریب ویسکوزیته آشفتگی، κ انرژی جنبشی آشفتگی و ε نرخ اضمحلال آشفتگی می‌باشند. مدل RNG $\kappa-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی ویسکوزیته آشفتگی استفاده گردیده است [17-19]. طبق کارهای انجام شده [2,15] برای پیش‌بینی انتقال حرارت برای جریان آب در یک لوله دایره‌ای و در فشارهای بحرانی، مدل آشفتگی RNG $\kappa-\varepsilon$ نسبت به مدل‌های دیگر آشفتگی دقیق‌تر عمل می‌کند. در مدل RNG $\kappa-\varepsilon$ دو معادله برای مقادیر κ و ε باید حل گردند [20]:

$$\frac{\partial(\rho\kappa\bar{u}_j)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial\kappa}{\partial x_j}\right)-\rho\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}-\rho\varepsilon$$

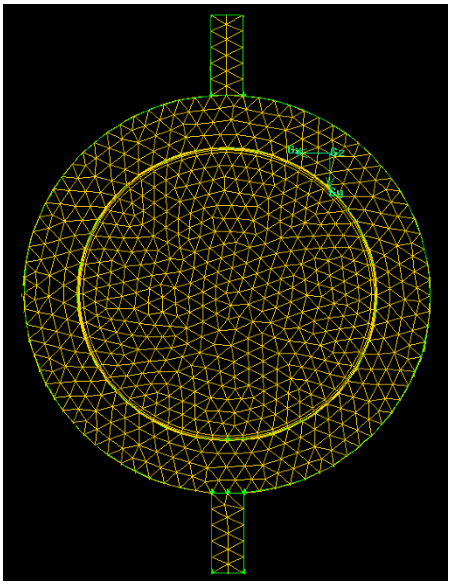
$$\frac{\partial(\rho\varepsilon\bar{u}_j)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right)-C_1\frac{\varepsilon}{\kappa}\rho\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}-$$

$$\rho\left(C_2+\frac{C_\mu\eta^3\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1+\beta\eta^3}\right)\frac{\varepsilon^2}{\kappa}$$

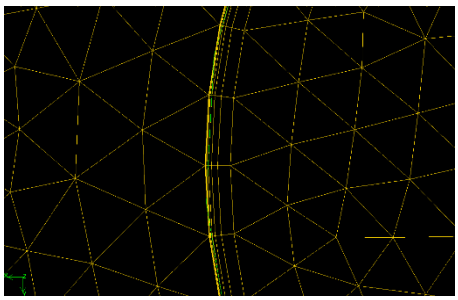
(۳)

پارامترهای $\eta = S\frac{\kappa}{\varepsilon}$ و $S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ تعریف می‌گردند. همچنین عبارت S_{ij} تانسور نرخ کرنش متوسط بوده و مقادیر ثابت‌ها به صورت $C_1=1.42, C_2=1.68, \sigma_k=\sigma_\varepsilon=0.7179$ و $\eta_0=4.38, \beta=0.012, C_\mu=0.0845$ می‌باشند [20].

برای حل معادلات (۱)، (۲) و (۳) از نرم‌افزار فلوئنت (FLUENT) استفاده گردیده است. هندسه لوله در نرم‌افزار گمبیت (Gambit) [21] رسم گردیده و شبکه‌بندی شده است. این لوله شامل دو قسمت متفاوت برای شبکه‌بندی است. یکی داخل لوله که جریان آب فوق‌بحرانی از آن عبور می‌کند و معادلات ناویراستوکس و انرژی در آن باید حل گردند. دوم دیواره لوله و ورق نصب شده بر روی آن است که فقط معادله انرژی در آن نیاز به حل دارد. به دلیل اینکه جریان داخل لوله از نوع فوق‌بحرانی بوده و تغییرات خواص ترموفیزیکی جریان سیال شدید است، مقدار y^+ شبکه در نزدیک دیواره لوله تقریبا برابر با یک باید باشد [2,13]. برای این کار از شبکه‌بندی لایه مرزی استفاده گردیده است. اولین ردیف شبکه در فاصله 5×10^{-4} mm از دیواره قرار گرفته است. بعد از رسم شبکه لایه مرزی، مقطع لوله، ضخامت لوله و ورق نصب شده بر روی آن با استفاده از روش المان‌های مثلثی (Tri) و اندازه ۱/۵ mm شبکه‌بندی شده است. در انتها نیز حجم لوله و ضخامت لوله و بدنه ورق با اندازه ۲۰ mm شبکه‌بندی می‌گردند. تعداد شبکه‌های ایجاد شده تقریبا برابر با ۹ میلیون است. شبکه ایجاد شده برای حل وارد نرم‌افزار فلوئنت می‌گردد. در شکل (۲) مقطع شبکه‌بندی شده لوله نشان داده شده است. در شکل (۲- ب) لایه مرزی رسم شده برای ایجاد $y^+\approx 1$، بزرگ‌تر نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ مقطع شبکه‌بندی شده لوله: الف) مقطع لوله و ب) شبکه لایه مرزی در نزدیکی دیواره

برای حل جریان و انتقال حرارت، شرایط مرزی در نظر گرفته شده مطابق جدول (۱) است. برای شرط مرزی دیواره مشترک (Coupledwall) که در واقع دیواره بین جریان سیال و ضخامت لوله می‌باشد سرعت سیال صفر در نظر گرفته شده و شرایط مرزی دمایی هم به صورت coupled در نظر گرفته می‌شود. دیواره‌های در تماس با جریان گاز داخل بویلر با شار حرارتی ثابت $۲۵۰\ kW/m^2$ فرض شده‌اند. شرط مرزی ورودی به صورت فشار ورودی (Pressure inlet) با فشار ۲۴/۱۲ MPa و دمای ورودی $۳۱۲\ ^oC$ می‌باشد. شدت آشفتگی در ورودی نیز برابر با ۵٪ و قطر هیدرولیکی ۲۸ mm در نظر گرفته شده است. همچنین شرط مرزی خروجی به صورت فشار خروجی (Pressure outlet) با فشار فرضی ۲۲/۹۴ MPa (این فشار در خروجی فرض شده است و از دبی جرمی هدف (Target mass flow rate) استفاده گردیده تا دبی در مقدار ۲/۲۴۷ kg/s تنظیم گردد.) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ شرایط مرزی لوله بویلر

جریان ورودی به لوله	pressure inlet
جریان خروجی از لوله	pressure outlet
دیواره‌های در تماس با جریان گاز داخل بویلر	wall with heat flux
دیواره‌هایی که در تماس جریان گاز نیستند	insulated wall
دیواره مشترک بین جریان سیال و ضخامت لوله	coupled wall

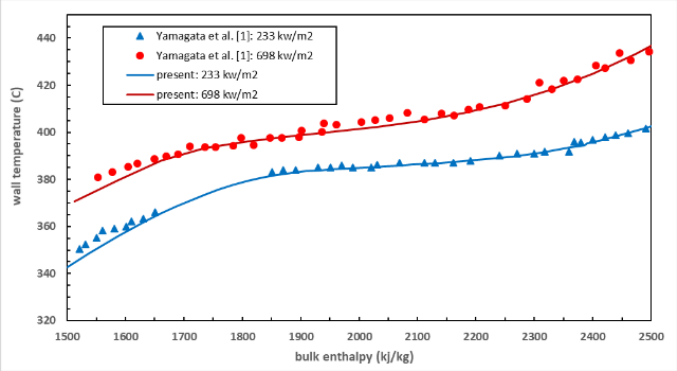
برای حل جریان با نرم‌افزار فلوئنت از یک کامپیوتر ۱۶ هسته‌ای با رم ۳۲ گیگابایت استفاده گردیده است. همچنین با توجه به اینکه اولین ردیف شبکه در فاصله خیلی از کمی دیواره قرار دارد از دقت Double Precision در نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است.

در نرم‌افزار فلوئنت برای فعال‌سازی مدل سیال فوق‌بحرانی آب، باید از قسمت پنجره کار فلوئنت با وارد کردن دستورات لازم این کار را انجام داد. نرم‌افزار فلوئنت از پایگاه داده REFPROP (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties) برای خصوصیات سیال فوق‌بحرانی آب استفاده می‌کند. پایگاه داده REFPROP توسط مؤسسه ملی فناوری و استانداردهای آمریکا (NIST) تدوین گردیده است. این پایگاه داده شامل جدول خصوصیات سیال‌های فوق‌بحرانی مختلف از جمله آب فوق‌بحرانی می‌باشد. مدل حلگر در نرم‌افزار فلوئنت، بر روی Pressure-based قرار داده شده و حل جریان به صورت پایا (Steady) (تغییرات با زمان صفر است) در نظر گرفته می‌شود. همچنین شتاب جاذبه هم فعال می‌گردد. در قسمت مدل نیز حل معادلات انرژی فعال می‌گردد تا تغییرات دمای سیال را بتوان بررسی کرد. همچنین مدل آشفتگی RNG $\kappa-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی جریان سیال در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه y^+ دیواره در حدود عدد یک در نظر گرفته شده از مدل Enhanced wall treatment استفاده شده است. در بخش روش‌های حل نیز از روش SIMPLEC برای کوپل فشار و سرعت استفاده شده و همچنین از روش مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی استفاده شده است. در نهایت با توجه به اینکه همگرا کردن جریان فوق‌بحرانی، به دلیل تغییرات شدید خواص سیال، سخت است مقدار under

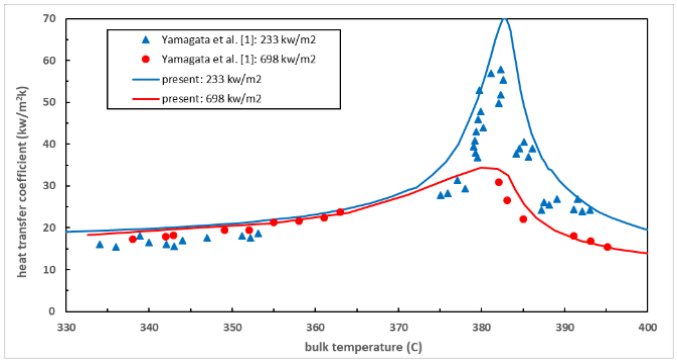
relaxation factor برای معادله انرژی ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

اعتبارسنجی حلگر

برای اینکه دقت حلگر فلوئنت و تنظیمات انجام شده برای جریان و انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی بررسی گردد از کار آزمایشگاهی یاماگاتا و همکاران [1] استفاده گردیده است. آن‌ها جریان آب فوق‌بحرانی را در یک لوله عمودی به قطر ۷/۵ میلی‌متر و شارهای حرارتی متقارن ۲۳۳ kW/m^2 و ۶۹۸ kW/m^2 بررسی کرده‌اند. در این کار فشار آب فوق‌بحرانی در خروجی لوله و دبی جرمی به ترتیب برابر با ۲۴/۵۲ MPa و ۱۲۶۰ kg/m^2s می‌باشند. شکل (۳- الف)، حل عددی دمای دیواره لوله را بر حسب آنتالپی توده‌ای سیال برای دو شار حرارتی ۲۳۳ kW/m^2 و ۶۹۸ kW/m^2 نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی یاماگاتا و همکاران [1] و حل عددی حاضر توسط نرم‌افزار فلوئنت وجود دارد. بیشترین مقدار خطای نسبی تقریبا برابر با ۱٪ در شار گرمایی ۶۹۸ kW/m^2 رخ می‌دهد. همچنین شکل (۳- الف) نشان می‌دهد که دمای دیواره به آرامی تا رسیدن آنتالپی سیال به مقدار شبه‌بحرانی (Pseudocritical) (نقطه‌ای که ظرفیت گرمایی ویژه سیال افزایش شدیدی را نشان داده و به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در فشار ۲۴/۵۲ MPa دمای شبه‌بحرانی آب برابر با ۳۸۳ °C می‌باشد) افزایش می‌یابد. در شکل (۳- ب)، مقدار ضریب انتقال حرارت بر حسب دمای توده‌ای سیال برای کار حاضر و داده‌های آزمایشگاهی یاماگاتا و همکاران [1] مقایسه شده‌اند. مجددا مقادیر حل عددی حاضر مشابه داده‌های آزمایشگاهی و منطقی می‌باشد. البته در شار حرارتی ۲۳۳ kW/m^2 عدم اطمینان در داده‌های آزمایشگاهی در نزدیکی دمای شبه‌بحرانی قابل مشاهده است و داده‌های آزماشگاهی برای شار حرارتی ۶۹۸ kW/m^2 در نزدیکی نقطه شبه‌بحرانی وجود ندارند. همچنین از شکل (۳-ب) مشخص است که ضریب انتقال حرارت در دمایی نزدیک به نقطه شبه‌بحرانی (۳۸۳ °C) به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



(الف)



(ب)

شکل ۳ صحه‌گذاری حلگر فلوئنت با کار آزمایشگاهی یاماگاتا و همکاران [1]
الف) دمای دیواره لوله و ب) ضریب انتقال حرارت

برای بررسی تأثیر تعداد شبکه‌بندی بر نتایج حل عددی، مقدار عدد ناسلت در دمای توده‌ای ۳۷۰ °C در مقادیر ۵، ۷، ۹ و ۱۱ میلیون شبکه در جدول (۲) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد اختلاف بین ۹ و ۱۱ میلیون شبکه ۰٫۲۷٪ است. بنابراین شبکه ۹ میلیون انتخاب گردیده است.

جدول ۲ تأثیر تعداد شبکه‌بندی متفاوت بر مقدار عدد ناسلت

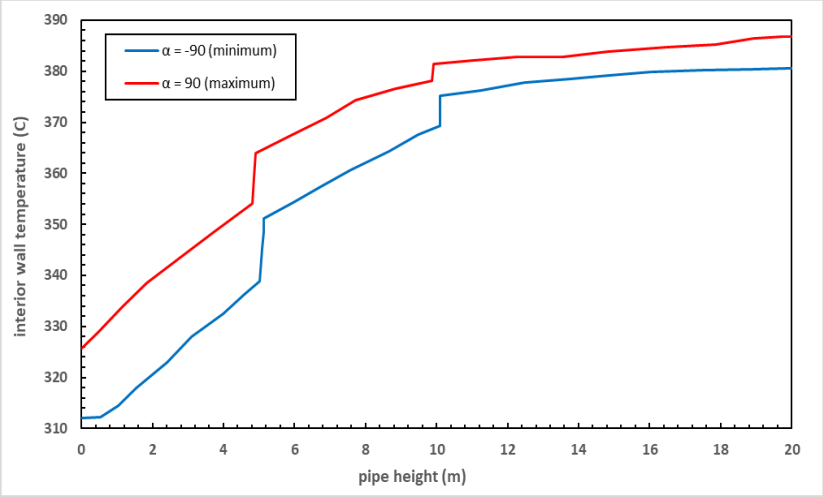
تعداد مش (میلیون)	عدد ناسلت در دمای توده‌ای ۳۷۰ °C	اختلاف (٪)
5	2987	9.26
7	3176	3.52
9	3283	0.27
11	3292	-

ارائه و تفسیر نتایج

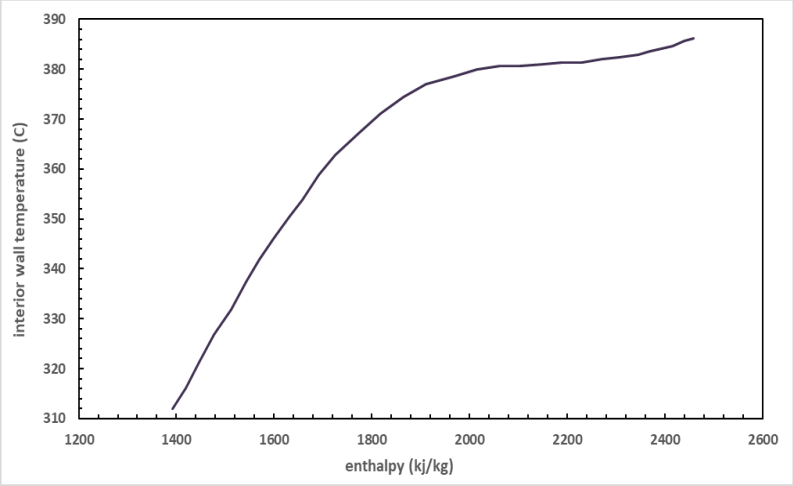
در بخش قبل اعتبار حلگر فلوئنت برای جریان و انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی در یک لوله عمودی با کار آزمایشگاهی یاماگاتا و همکاران [1] مورد بررسی و تأیید قرار گرفت. حال به ارائه نتایج برای لوله‌ای از یک بویلر واقعی که هم قسمت شیب‌دار و هم قسمت افقی دارد (مشابه شکل ۱- الف) و شار حرارتی آن نامتقارن است پرداخته می‌گردد.

شکل (۴) تغییرات دمای کمینه و بیشینه دیواره داخلی لوله را در راستای ارتفاع لوله نمایش می‌دهد. بیشترین دما در زاویه $\alpha = 90°$ (مطابق شکل ۱- ج) و کمترین دما در زاویه $\alpha = -90°$ رخ می‌دهد. دمای داخلی دیواره تا رسیدن به دمای نقطه شبه‌بحرانی (بعد از حل عددی، فشار آب در خروجی لوله برابر با ۲۳/۳ MPa به دست می‌آید. در این فشار دمای شبه‌بحرانی آب تقریبا برابر با ۳۸۰ °C می‌باشد) در ابتدا تقریبا به صورت خطی با ارتفاع لوله افزایش می‌یابد. بیشترین دمای دیواره در زاویه $\alpha = 90°$ از مقدار ۳۲۵ °C در محل ورود جریان آب شروع شده تا به دمای ۳۸۷ °C در خروجی لوله برسد. همچنین کمترین دمای داخلی دیواره در زاویه $\alpha = -90°$ از مقدار ۳۱۲ °C تا ۳۸۱ °C از ابتدا تا انتهای لوله تغییر می‌یابد. بیشترین دمای دیواره داخلی لوله در ارتفاع m ۱۰ به دمای شبه‌بحرانی ۳۸۰ °C می‌رسد. همچنین کمترین دمای دیواره داخلی لوله نیز در ارتفاع m ۱۵/۵ در محدوده دمای شبه‌بحرانی قرار می‌گیرد.

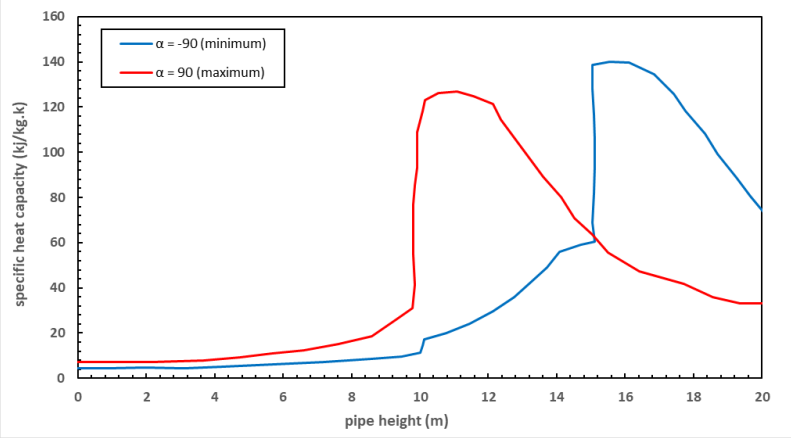
در شکل (۵) تغییرات دمای دیواره بر حسب آنتالپی سیال نشان داده شده است. دمای دیواره در مکان‌های مختلف آن بر حسب تغییرات آنتالپی آب تفاوتی نمی‌کند. دمای دیواره در ابتدا با افزایش آنتالپی آب به صورت خطی افزایش می‌یابد. زمانی که دمای دیواره به مقدار دمای شبه‌بحرانی نزدیک می‌شود دمای دیواره با تغییر آنتالپی تقریبا ثابت مانده و مقدار کمی افزایش می‌یابد. مجددا در آنتالپی تقریبا برابر با ۲۳۰۰ kJ/kg، دمای دیواره شروع به افزایش با شیب بیشتری می‌کند. این اتفاق در شکل (۳- الف) نیز قابل مشاهده است.



شکل ۴ تغییرات دمای کمینه و بیشینه دیواره داخلی لوله بر حسب ارتفاع لوله



شکل ۵ تغییرات دمای دیواره داخلی لوله بر حسب آنتالپی آب

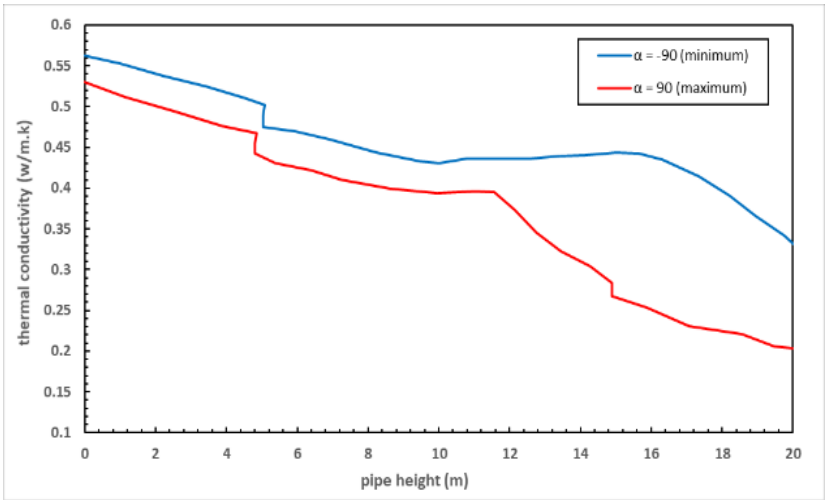


شکل ۶ تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه آب بر حسب ارتفاع لوله

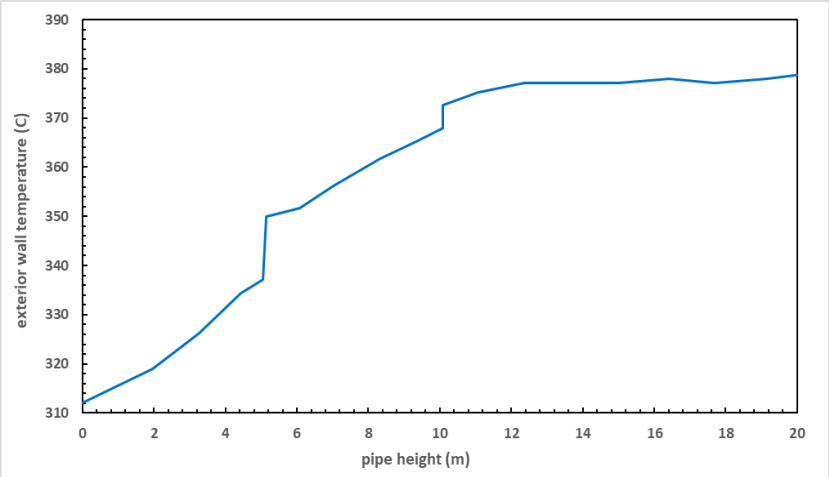
تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه آب فوق‌بحرانی بر حسب ارتفاع لوله در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود آب در دو ارتفاع تقریبی ۱۰ m و ۱۵/۵ m بیشترین ظرفیت گرمایی ویژه را دارا می‌باشد. این ارتفاع‌ها مطابق شکل (۴)، ارتفاعی است که دمای سیال نزدیک به نقطه شبه‌بحرانی می‌گردد. در این نقاط که ظرفیت گرمایی ویژه بیشترین مقدار خود را داراست بیشترین ضریب انتقال حرارت نیز رخ می‌دهد.

شکل (۷) تغییرات ضریب رسانندگی گرمایی را نمایش می‌دهد. رسانندگی گرمایی سیال با افزایش ارتفاع لوله و دمای سیال کاهش می‌یابد. همان طور که مشخص است در نقاط شبه‌بحرانی شیب کاهش مقدار رسانندگی گرمایی افزایش می‌یابد.

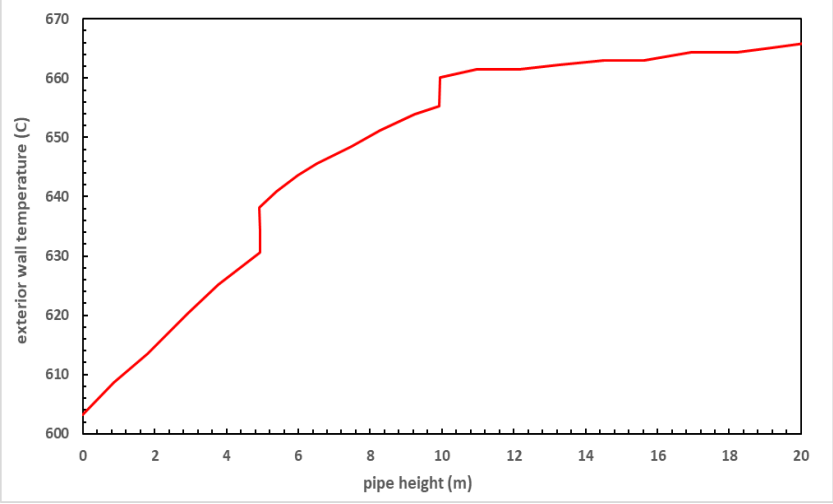
یکی از مقادیر مهم در طراحی و کارکرد لوله‌های بویلر، بیشترین مقدار دمای دیواره خارجی لوله‌ها می‌باشد. اگر مقدار دمای کارکرد از مقدار دمایی که جنس لوله می‌تواند تحمل کند بیشتر گردد باعث صدمه دیدن لوله‌ها می‌گردد. در شکل (۸) تغییرات دمای کمینه و بیشینه دیواره خارجی لوله‌ها بر حسب ارتفاع لوله رسم گردیده است. دمای کمینه دیواره خارجی لوله از مقدار ۳۱۲ ^{o}C تا ۳۸۱ ^{o}C و دمای بیشینه دیواره خارجی لوله از مقدار ۶۰۳ ^{o}C تا ۶۶۶ ^{o}C تغییر می‌یابد. بنابراین بیشترین دمای دیواره لوله از ابتدا تا انتهای لوله بین ۶۰۳ ^{o}C تا ۶۶۶ ^{o}C افزایش می‌یابد. جنس لوله باید طوری باشد که این حداکثر دما را بتواند تحمل کند.



شکل ۷ تغییرات ضریب انتقال حرارت رسانشی آب بر حسب ارتفاع لوله



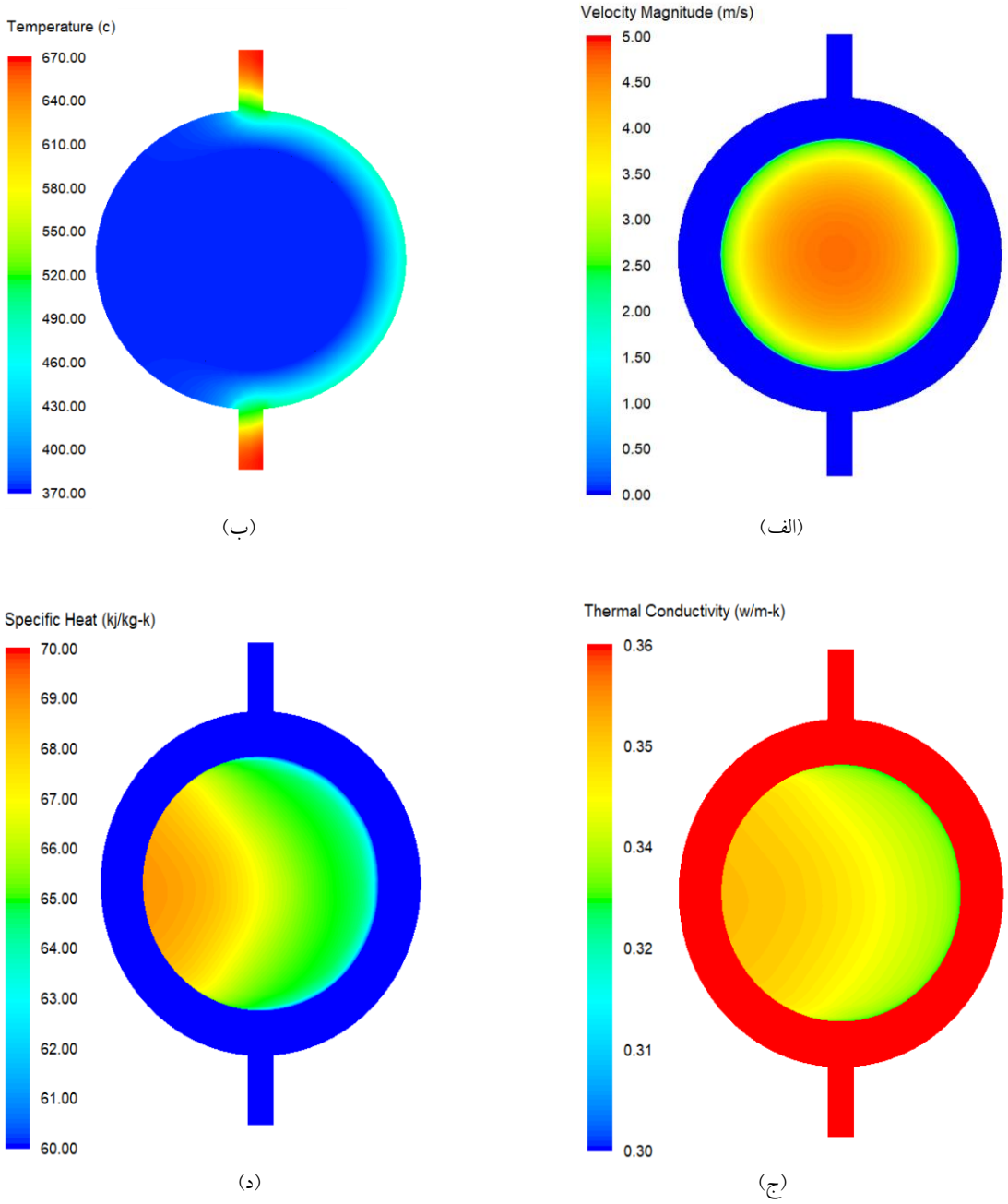
(الف)



(ب)

شکل ۸ تغییرات دمای کمینه و بیشینه دیواره خارجی لوله بر حسب ارتفاع لوله: الف) کمینه دما (α = -90º) ب) بیشینه دما (α = 90º)

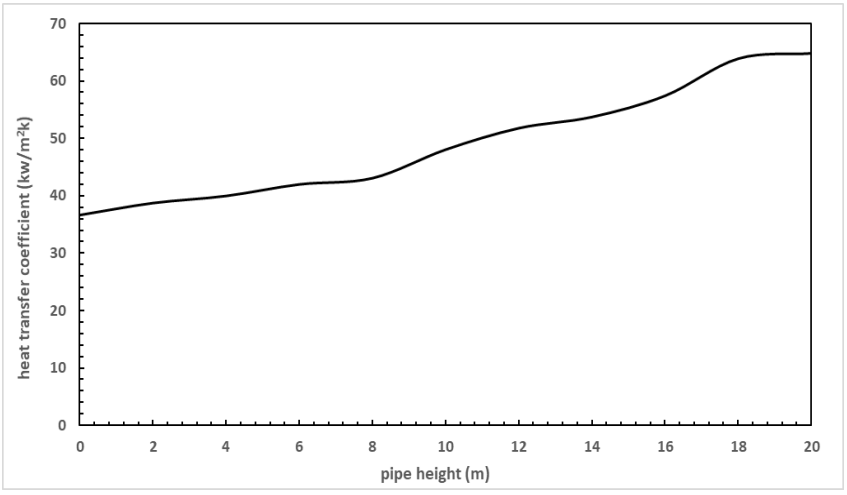
برای بررسی دقیق‌تر تغییرات دمای بدنه لوله و سرعت و دمای آب فوق‌بحرانی، کانتور دما، ضریب رسانندگی گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و سرعت سیال در خروجی لوله در شکل (۹) رسم گردیده است. بیشترین سرعت سیال در مرکز لوله رخ می‌دهد. همچنین بیشترین دمای بدنه در ورق‌های نصب شده بر روی لوله‌های بویلر اتفاق می‌افتد. دمای لوله در سمت عایق مشابه با دمای سیال داخل لوله و برابر با ۳۸۰ °C و دمای بدنه خارجی لوله در سمتی که شار حرارتی وارد می‌گردد برابر با مقدار تقریبی ۴۸۰ °C است. همچنین از کانتورهای ضریب رسانندگی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه مشخص است که بیشترین مقدار آن‌ها در سمت دیواره عایق رخ می‌دهند.



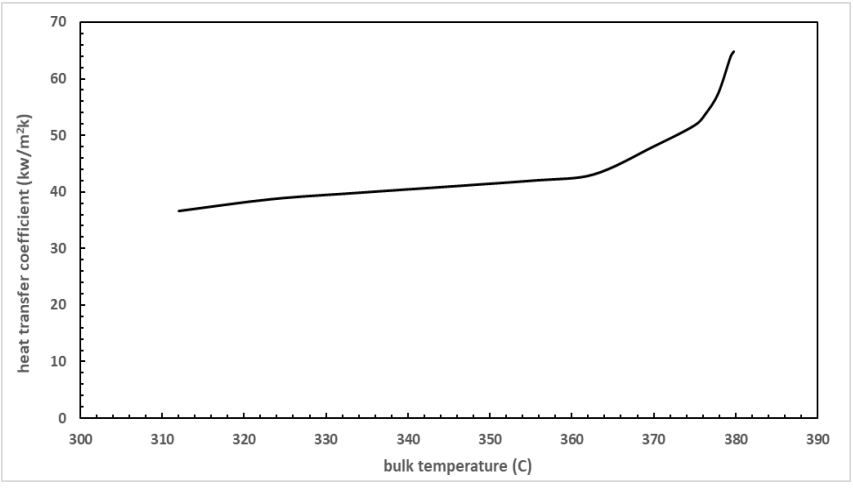
شکل ۹ کانتورهای: الف) سرعت، ب) دما، ج) ضریب رسانندگی گرمایی و د) ظرفیت گرمایی ویژه در خروجی لوله بویلر

در شکل (۱۰- الف) نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب ارتفاع لوله رسم گردیده است. با افزایش ارتفاع لوله، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در انتهای ارتفاع لوله، که دمای آب به نزدیکی دمای شبه‌بحرانی می‌رسد، مقدار ضریب انتقال حرارت در مقدار ماکزیمم خود تقریبا ثابت می‌ماند. در شکل (۱۰- ب) تغییرات ضریب انتقال حرات بر حسب دمای توده‌ای سیال نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که شیب افزایش ضریب انتقال حرارت بر حسب تغییرات دما در نزدیکی دمای شبه‌بحرانی سیال، بسیار بیشتر از شیب افزایش ضریب انتقال حرارت در دماهای کمتر از شبه‌بحرانی می‌باشد. این نتیجه در کار یاماگاتا و همکاران [1] نیز مشاهده شده است.

تغییرات عدد ناسلت بر حسب ارتفاع لوله و دمای توده‌ای سیال در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. عدد ناسلت با افزایش ارتفاع لوله و دمای توده‌ای سیال افزایش می‌یابد. مقدار عدد ناسلت در نزدیکی دمای شبه‌بحرانی سیال، افزایش چشم‌گیری دارد، به صورتی که مقدار آن در این محدوده به حدود ۶۸۰۰ می‌رسد که حدود ۳/۶ برابر مقدار عدد ناسلت در ورودی لوله (۱۸۸۰) است.

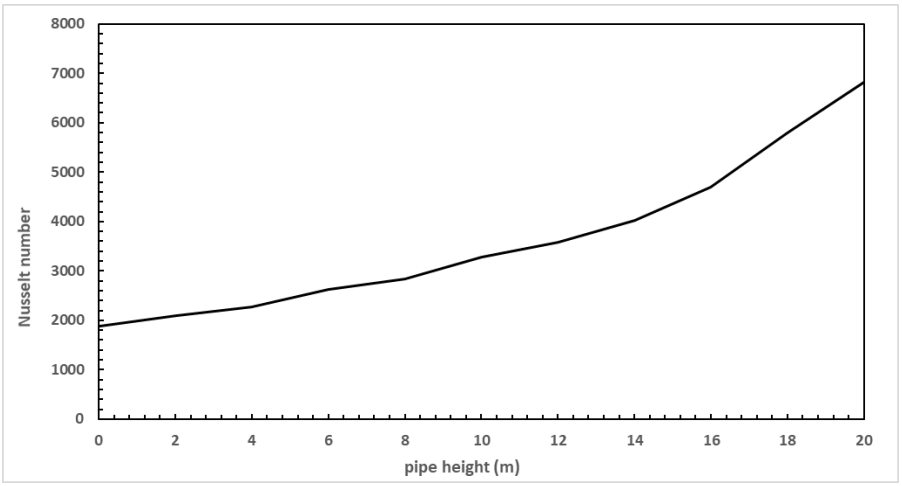


(الف)

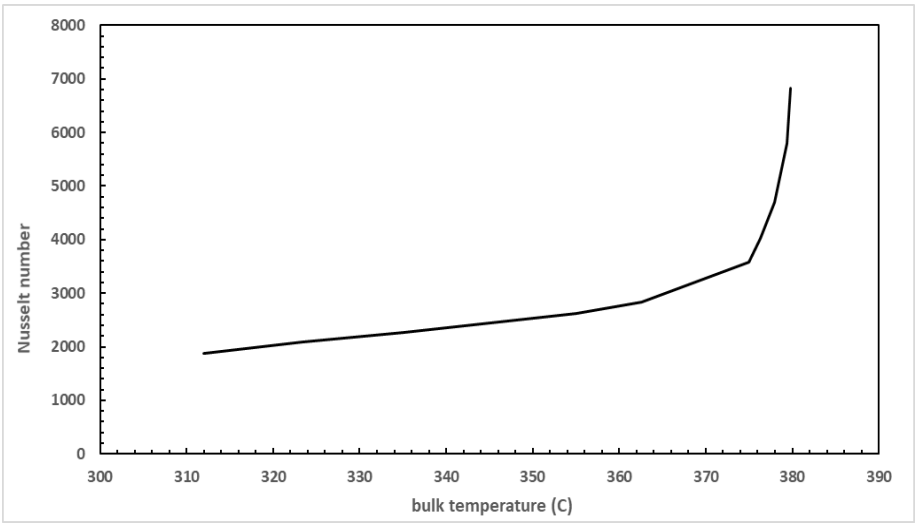


(ب)

شکل ۱۰ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب: الف) ارتفاع لوله و ب) دمای توده‌ای سیال



(الف)



(ب)

شکل ۱۱ تغییرات عدد ناسلت بر حسب: الف) ارتفاع لوله و ب) دمای توده‌ای سیال

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی جریان آب فوق‌بحرانی در لوله‌های بویلر نیروگاه نکا مازندران، که هم قسمت شیب‌دار و هم قسمت افقی دارند و شار حرارتی آن نیز به صورت نامتقارن می‌باشد، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام گردید. در ابتدا حلگر فلوئنت برای انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی با کار آزمایشگاهی یاماگاتا و همکاران [1] صحه‌گذاری گردیده و سپس نتایج زیر برای لوله بویلر با سیال فوق‌بحرانی به دست آمد:

۱. بیشـــترین دما در زاویه $\alpha = 90°$ و کمترین دما در زاویه $\alpha = -90°$ رخ می‌دهد.

۲. بیشـــترین و کمترین دمای دیواره داخلی لوله به ترتیب در ارتفاع‌های ۱۰ m و ۱۵/۵ m در محدوده دمای شـــبه‌بحرانی قرار می‌گیرند.

۳. در خروجی لوله بویلر، آب از حالت شـــبه‌بحرانی خارج گردیده است.

۴. بیشترین دمای دیواره لوله از ابتدا تا انتهای لوله، بین ۶۰۳ ^{o}C تا ۶۶۶ ^{o}C تغییر می‌یابد.

۵. مقدار ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت با افزایش ارتفاع لوله و دمای توده‌ای سیال، افزایش می‌یابد.

۶. در نزدیکی دمای شـــبه‌بحرانی، ضـــریب انتقال حرارت و عدد ناسلت دچار تغییرات و افزایش شدیدی می‌گردند.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار فلوئنت به همراه پایگاه داده REFPROP، به خوبی می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت آب فوق‌بحرانی در لوله‌های بویلر

فوق‌بحرانی مورد استفاده قرار بگیرد.

فهرست علائم و اختصارات

c_p	ظرفیت گرمایی ویژه،	J/kg.K
C_μ	ضریب ویسکوزیته آشفتگی،	–
g	شتاب جاذبه،	m/s^2
k	رسانندگی گرمایی،	W/m.K
P	فشار،	Pa
Pr	عدد پرانتل،	–
S_{ij}	تانسور نرخ کرنش متوسط	
T	دما،	°C
u	سرعت،	m/s
y^+	فاصله عمود المان شبکه تا دیواره،	–

علائم یونانی

α	زاویه محیطی،	-
ρ	چگالی،	kg/m^3
μ	ویسکوزیته دینامیکی،	kg/m.s
κ	انرژی جنبشی آشفتگی،	J/kg
ε	نرخ اضمحلال آشفتگی،	J/kg.s

زیرنویس

t	آشفتگی

بالانویس

–	متوسط گیری شده زمانی

واژه‌نامه

Refprop	ریفپراپ
Deteriorated Heat Transfer	افت انتقال حرارت
Reynolds stress model	مدل تنش رینولدز
Low-Reynolds number	عدد رینولدز کوچک
Critical Heat Flux	شار حرارتی بحرانی
Water wall	دیواره آبی
Film boiling	جوشش فیلمی
Floent	فلوئنت
Gambit	گمبیت
Tri	مثلثی
Coupled wall	دیواره مشترک
Pressure inlet	فشار ورودی
Pressure outlet	فشار خروجی
Target mass flow rate	دبی جرمی هدف
Double precision	دقت دو برابر
Pressure-based	فشار گرا
Steady	پایا
Enhanced wall treatment	رفتار افزایشی دیواره
Simplec	سیمپل سی
Under relaxation factor	ضریب زیر تخفیف

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] K. Yamagata, K. Nishikawa, S. Hasegawa, T. Fujii, S. Yoshida, "Forced convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes Transfert thermique par convection forcee dans les tubes pour un ecoulement d'eau supercritiqueZwangskonvektive wärmeübertragung an überkritisches, durch rohre fliessendes wasser," *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol. 15, no. 12, pp. 2575-2593, (1972).

[2] Y. Zhang, C. Zhang, J. Jiang, "Numerical simulation of heat transfer of supercritical fluids in circular tubes using different turbulence models," *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 48, no. 3, pp. 366-373, (2011).

[3] X. Kong, D. Sun, L. Gou, S. Wang, N. Yang, H. Li, "Numerical investigation on heat transfer of supercritical water with a variable turbulent Prandtl number model," *Journal of Nuclear. Engineering and. Radiation Science*. vol. 6, no. 3, p. 031104, (2020).

[4] J. Liu, P. Zhao, M. Lei, S. Yang, H. Nemati, "Numerical investigation of spatial-developing turbulent heat transfer in forced convections at different supercritical pressures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 159, p. 120128, (2020).

[5] G. A. Schatte, A. Kohlhepp, C. Wieland and H. Spliethoff, "Development of a new empirical correlation for the prediction of the onset of the deterioration of heat transfer to supercritical water in vertical tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 102, pp. 133-141, (2016).

[6] K. Węglarz, D. Taler, J. Taler, M. Marcinkowski, "Numerical Modelling of Steam Superheaters in Supercritical Boilers," *Energies.* vol. 16, no. 6, p. 2615, (2023).

[7] X. Hao, P. Xu, H. Suo, L. Guo, "Numerical investigation of flow and heat transfer of supercritical water in the water-cooled wall tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 148, p. 119084, (2020).

[8] T. Zhang, D. Che, "Numerical investigation on heat transfer of supercritical water in a roughened tube," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 69, no. 6, pp. 558-573, (2015).

[9] X. Du, Z. Lv, S. Zhao, Q. Qiu, X. Zhu, "Numerical analysis of diameter effects on convective supercritical water flow in a vertical round tube," *Applied Thermal Engineering*, vol. 160, p. 114095, (2019).

[10] Z. Luo, X. Fang, Y. Yang, W. Chen, L. Zhang, "Prediction of "critical heat flux" for supercritical water and CO_2 flowing upward in vertical heated tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 159, p. 120115, (2020).

[11] X. Zhou, T. Niu, Y. Xin, Y. Li, D. Yang, "Experimental and numerical investigation on heat transfer in the vertical upward flow water wall of a 660MW ultra-supercritical CFB boiler," *Applied Thermal Engineering*, vol. 188, p. 116664, (2021).

[12] S. Wang, Y. Xin, D. Yang, L. Dong, X. Zhou, "Experimental and numerical study on the heat transfer to supercritical water in an inclined smooth tube," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 170, p. 107111, (2021).

[13] Z. Wang, G. Qi, M. Li, "Numerical Investigation of Heat Transfer to Supercritical Water in Vertical Tube under Semicircular Heating Condition," *Energies.* vol. 12, no. 20, p. 3958, (2019).

[14] Z. Li, Y. Wu, J. Lu, D. Zhang, H. Zhang, "Heat transfer to supercritical water in circular tubes with circumferentially non-uniform heating," *Applied Thermal. Engineering*, vol. 70, pp. 190–200, (2014).

[15] G. Zhang, Y. Li, Y. Dai and R. Wang, "Heat transfer to supercritical water in a vertical tube with concentrated incident solar heat flux on one side," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 95, no. 12, pp. 944–952, (2016).

[16] M. Qu, D. Yang, Z. Liang, L. Wan, D. Liu, "Experimental and numerical investigations on heat transfer of ultra-supercritical water in vertical upward tube under uniform and non-uniform heating," *International Journal of Heat*

and Mass Transfer, vol. 127, pp. 769–783, (2018).

[17] B. E. Launder, *Lectures in mathematical models of turbulence*, London, New York, Academic Press, (1972), [E-book].

[18] F. Incropera, D. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th Edition, John Wiley & Sons, New York, NY, (2002), [E-book]

[19] M. Anbarsooz, M. Pasandideh-Fard, N. Shaleh, "Numerical Simulation of Toos Power Plant Boiler to Improve its Thermal Efficiency,", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 27, no. 1, pp. 117-134, (2016).

[20] "FLUENT Manual", *ANSYS Inc*., Canonsburg, Pa, USA, (2008).

[21] M. Niknam-Azodi, M. Moghiman, "Numerical Study of the Effects of Structural and Functional Parameters on Unmixed Combustion of Natural Gas in Three Radiant Tubes with Different Geometries," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 33, no. 2, pp. 83-92, (2021).

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

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

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Analyzing the Mechanical Properties of Aluminum-Graphene Nanocomposite with Vacancy and Pin-Holed Defects by Molecular Dynamics Method

Research Article

Ali Ebrahimi[1], Masoud Ajri[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.84337.1206

Abstract *The present study investigated mechanical properties such as Young's modulus and tensile strength of aluminum nanocomposite reinforced with defective graphene with vacancy and hole defects under uniaxial tension using molecular dynamics simulation. Also, the effect of the number of graphene layers in a constant volume ratio on the mechanical behavior of the nanocomposite has also been obtained. This simulation was done with the help of the LAMMPS open-source package by modeling a periodic system with NVE and NPT ensembles. The AIREBO and MEAM potentials were used to describe the interaction of carbon and aluminum atoms, respectively, and Lennard Jones potential was used for the interaction between these atoms. The obtained results show that adding a single layer of graphene to the structure of pure aluminum has improved Young's modulus and tensile strength of pure aluminum by 220 and 320%, respectively. In addition, it is observed that the effect of pinhole and vacancy defects on Young's modulus and tensile strength is non-linear and has a decreasing trend.*

Key Words nanocomposite, mechanical properties, molecular dynamics, graphene, vacancy defects.

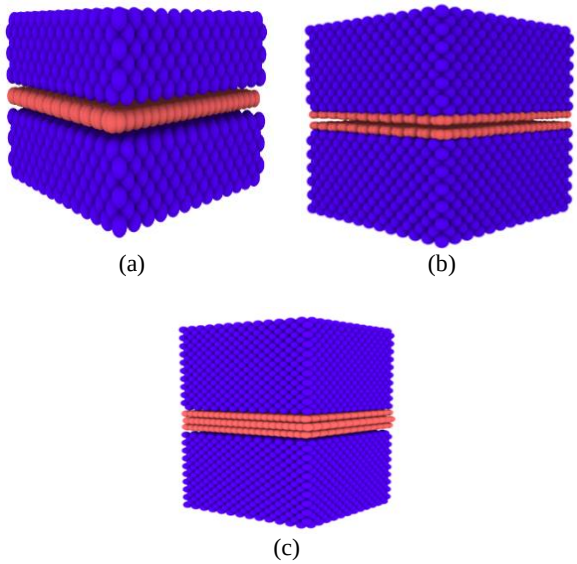
1-Introduction

A two-dimensional honeycomb structure of carbon atoms that make up graphene sheets has extraordinary mechanical properties found as reinforcements in various composites. Considering the increasing progress of composites, investigating the mechanical properties of graphene-reinforced composites is one of the significant goals of researchers in this field. In 2017, Makhalingam and Kumar assessed the mechanical properties of aluminum-graphene nanocomposite [1]. In the mentioned research, the effect of structural defects and the number of layers on the mechanical properties has yet to be investigated, and the reported results are limited to Young's modulus of nanocomposite. In the present study, the mechanical properties of graphene-reinforced aluminum nanocomposite under uniaxial tensile test, as well as the effect of vacancy defects and hole defects in the graphene layer and the number of graphene layers on Young's modulus and tensile strength of the nanocomposite, have been investigated.

2- Modeling

The nano molecular unit cell (NUC) for MD simulation is shown in Figure 1. In this simulation, periodic boundary conditions are used in all three directions. The volume fraction of carbon is 5%, and the dimensions of the nanocomposite are 51 angstroms in the *x* and y directions and 28.35 angstroms in the *z* direction. In the present study, interatomic potentials (MEAM), (AIREBO), and (L-J) were used. The time step value of 0.5 femtosecond was considered for all the simulated models and the atoms under the microcanonical set (NVE) at 300 Kelvin were balanced with a Langevin thermostat. Afterward, zero load pressure was applied using the NPT ensemble to release the initial internal stresses

.



(a) (b)

(c)

Figure 1. Atomic model showing the structure of graphene aluminum nanocomposite (AL-Gs) a) single-layer graphene, b) double-layer graphene, and c) three-layer graphene

*Manuscript received: September 30, 2023. Revised, November 7, 2023, Accepted, January 14, 2024.

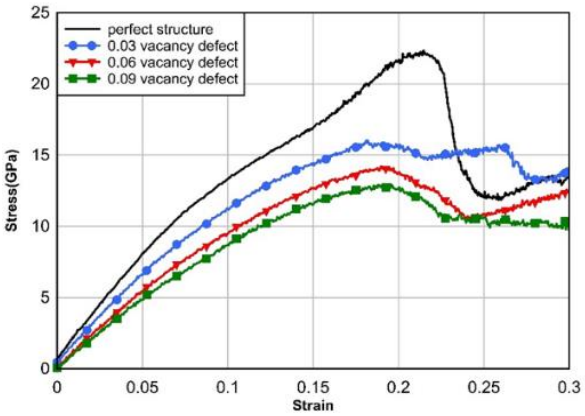
[1] M.Sc student, Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Iran.

[2] Corresponding Author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Iran.

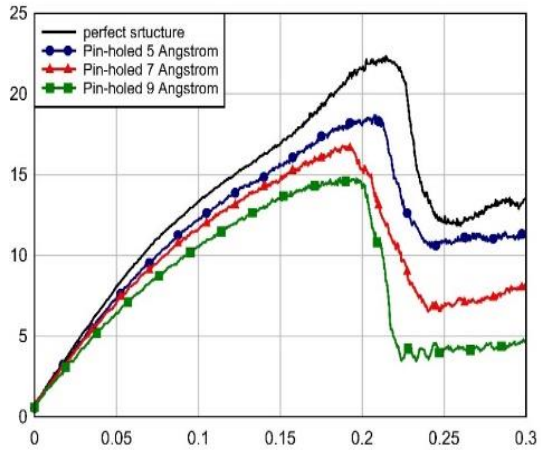
:**Email**: m.ajri@uma.ac.ir

3- Results

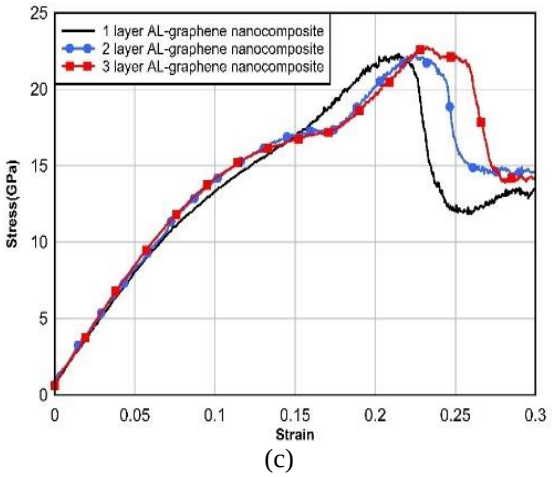
Figure 2 investigated the effect of vacancy defects, pinhole defects, and the number of layers on the stress-strain diagram. It can be seen that with an increase in the atomic percentage of vacancy defects and radius of the pinhole defects, Young's modulus and ultimate stress decreased. However, by augmenting the number of graphene layers, the mechanical properties of graphene-aluminum nanocomposite improved.



(a)



(b)



(c)

Figure 2. Stress-strain curves a) comparison of the effect of vacancy defect, b) effect of pinhole defect, and c) effect of number of layers

In Tables 1-3, the nanocomposite Young's modulus and ultimate stress are given for all the states investigated in this research. For nanocomposite with 3, 6, and 9 percent vacancy defects, Young's modulus is 129.6, 116.8, and 102.4 GPa, respectively, which decreased by 15.2%, 23.6%, and 33%, respectively, compared to the perfect sample. Moreover, for the nanocomposite with pinhole defects with a radius of 5, 7, and 9 angstroms, Young's modulus is 140, 135.4, and 120.59 GPa, respectively. Compared to the perfect sample, it decreased by 8.4%, 11.5%, and 21.1%, respectively. Moreover, Young's modulus for nanocomposites with one-, two-, and three-layer graphene increased to 153, 157.7, and 159.7 GPa, respectively, which shows 218%, 225%, and 228% improvement, respectively, compared to the pure aluminum sample.

Table 1. Young's modulus and ultimate strength of graphene-reinforced aluminum nanocomposite with vacancy defect

Vacancy Defect %	Young's Modulus (GPa)	Ultimate Stress (GPa)
3%	129.6	16
6%	116.8	15.1
9%	102.4	14.7

Table 2. Young's modulus and ultimate strength of graphene-reinforced aluminum nanocomposite with pinhole defect

Pinhole radius	Young's Modulus (GPa)	Ultimate Stress (GPa)
5 Angstrom	140	18.6
7 Angstrom	135.4	16.7
9 Angstrom	120.6	14.5

Table 3. Young's modulus and tensile strength of pure aluminum and graphene aluminum nanocomposites (AL-GS)

sample	Young's Modulus (GPa)	Ultimate Stress (GPa)
Pure AL	70	7
AL-Gs (single layer)	153	22.3
AL-Gs (double-layer)	157.7	22.4
AL-Gs (three-layer)	159.7	22.8

4- Conclusion

Adding a graphene layer to the pure aluminum nanostructure increased Young's modulus and tensile strength of pure aluminum significantly. However, the vacancy defect decreased Young's modulus and tensile strength of the nanocomposite. As a result, for a nanocomposite with vacancy defects equal to 3, 6, and 9, Young's modulus values were obtained as 129.6, 116.8, and 102.4 GPa, respectively. In addition, the pinhole defect decreased Young's modulus and tensile strength of the nanocomposite. For example, for a nanocomposite with a pinhole radius of 5, 7, and 9 angstroms, Young's modulus values were 140, 135.4, and 120.59 GPa, respectively. Finally, the behavior of vacancy and pinhole defects effects on Young's modulus and tensile strength value were non-linear with a decreasing trend.

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد

تحلیل خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم- گرافین با نقص جای خالی و حفره به روش دینامیک مولکولی*

مقاله پژوهشی

علی ابراهیمی(۱) مسعود اجری(۲)

DOI: 10.22067/jacsm.2024.84337.1206

چکیده *مطالعه حا ضر، خواص مکانیکی از جمله مدول یانگ و تنش ا ستحکام ک ش شی نانوکامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با گرافین ناقص با نقص حفره و نقص جای خالی تحت ک شش تک محوره با ا ستفاده از شبیه سازی دینامیک مولکولی مورد برر سی قرار داده ا ست. همچنین در این مطالعه اثر تعداد لا یه‌های گرافن در درصد حجمی ثابت، بر روی رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت نیز بررسی شده است. این شبیه‌سازی با کمک پکیج منبع باز لمپس با مدل‌سازی یک سیستم دوره‌ای با هنگرد NVE و NPT انجام گرفته و برای توصیف اندرکنش اتم‌های کربن و آلومینیوم به ترتیب از پتانسیل‌های AIREBO و MEAM و همچنین برای اندرکنش بین این اتم‌ها از پتانسیل لناردجونز ا ستفاده شده ا ست. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که افزودن تک لا یه گرافین به ساختار آلومینیوم خالص باعث بهبود مدول یانگ و ا ستحکام ک ش شی آلومینیوم خالص به ترتیب به میزان ۲۲۰ و ۳۲۰ درصد شده ا ست. علاوه بر این مشاهده می‌شود که اثر نقص جای خالی و نقص حفره بر روی مدول یانگ و استحکام کششی به‌صورت غیر خطی بوده و روند کاهشی دارد.*

واژه‌های کلیدی نانوکامپوزیت، خواص مکانیکی، دینامیک مولکولی، گرافین، نقص جای خالی.

مقدمه

یک ساختار دوبعدی لانه‌زنبوری از اتم‌های کربن (C) که ورقه گرافین (GS) را ایجاد می‌کنند دارای خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای می‌باشد [1,2]. این آلوتروپ کربن تقریبا به صورت تئوری هشت دهه مورد مطالعه قرار گرفته است [3,4]. اگرچه نانوصفحات گرافین به طور ذاتی در کامپوزیت‌ها یافت شدند اما فرض بر این بود که GSها نسبت به تشکیل نانوساختارهای کربنی منحرف‌شده مانند نانولوله‌ها و فولرن‌ها ناپایدار هستند [5]. در سال ۲۰۰۴، نووسلوف و همکارانش GSها را با تست‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و مسیر جدیدی از علم نانو را برای محققان در سراسر جهان گشودند [6]. خواص مکانیکی GSها تقریبا مشابه همتای خود، یعنی نانولوله‌های کربنی (CNTs) است. با این حال، به دلیل نسبت ابعاد بالاتر، مساحت سطح و تولید کم‌هزینه GSها به‌عنوان نانوپرکننده تقویت‌کننده به CNTها ترجیح داده می‌شوند. با تقویت GSها برحسب وزن یا حجم کسری در پلیمرها، رفتار مکانیکی کامپوزیت مواد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [7]. GSها در مقایسه با CNTها سطح بیشتری دارند و با مواد ماتریس در هر دو سطح متصل شود. ساختار دوبعدی GS پیوند بهتری با مواد ماتریس دارد و یک فصل مشترک بزرگ‌تر را در ارتباط بین GS و مواد ماتریس نسبت به CNT تشکیل می‌دهد که در نهایت ایجاد فصل مشترک بزرگ‌تر به خواص مکانیکی بهتر منجر خواهد شد [8,9]. به‌عنوان

*تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۷/۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۰/۲۴ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

(۲) نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

Email: m.ajri@uma.ac.ir

مثال تقویت ۳ درصد وزنی GS در پلی‌اتیلن (PE) منجر به افزایش استحکام کششی و مدول الاستیک کامپوزیت به ترتیب نزدیک به ۷۷ و ۸۷ درصد می‌شود. اما، برای همان کسر وزنی تقویت‌کننده CNT در پلی‌اتیلن استحکام کششی و مدول الاستیک ماتریس پلی‌اتیلن را تنها به میزان ۵۸٪ و ۵۷٪ افزایش می‌دهد [10]. خواص مکانیکی فشاری و کششی نانوپرکننده‌های مبتنی بر کربن توسط تعدادی از محققان به‌صورت تجربی و با استفاده از آزمایش‌های عددی از جمله شبیه‌سازی مولکولی مورد مطالعه قرار گرفت [11,12].

با میدان‌های نیروی تجربی کمتر توسعه‌یافته، تکنیک شبیه‌سازی دینامیک مولکولی (MD) نقش اساسی در تجزیه و تحلیل پاسخ‌های مکانیکی نانوپرکننده‌ها و نانوکامپوزیت‌ها ایفا می‌کند [13-18]. لین و همکاران پاسخ کمانش نانوکامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با GS را مورد بحث قرار داده‌اند و ثابت کرده‌اند که شبیه‌سازی‌های MD می‌توانند بینش بیشتری از دامنه کمانش و برهم‌کنش‌های میان نانوپرکننده‌ها و مواد ماتریس ارائه دهند که یافتن آن‌ها در آزمایش‌های مقیاس نانو دشوار است [19]. در نمونه‌های کاربردی، تقریبا تمام کامپوزیت‌های تقویت شده با GS با GS لایه‌ای تقویت شده‌اند [20]. چندین تحلیل توسط محققان در مورد نتایج تقویت GSهای چندلایه در مواد ماتریس بر رفتار مکانیکی مواد نانوکامپوزیت منتشر شده است [21,22]. در مقایسه با کامپوزیت‌های سرامیکی و پلیمری تقویت شده با GSها، کامپوزیت‌های فلزی تقویت شده با GS به دلیل مشکلاتی مانند توزیع یکنواخت، تولید انبوه نانوپرکننده‌های هم‌تراز و پیوند بین سطحی ضعیف کمتر مورد بررسی قرار می‌گیرند [23]. اما از بین فلزات موجود، آلومینیوم (Al) در بسیاری از کاربردها به دلیل چگالی کم، کارایی مناسب و خواص سختی آن به سایر مواد ترجیح داده شده است و پژوهش های فروانی روی آن صورت گرفته است [24,25]. کاربردهای بسیاری از نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم در صنایع، خودروسازی و صنایع نظامی وجود دارد [26]. شین و همکاران یک کامپوزیت آلی تعبیه شده چندلایه GS با رویکرد متالورژی پودر توسعه دادند و ویژگی‌های مقاومت آن را بررسی کردند [27]. بر اساس روش MD، تحقیقات زیادی برای GSهای لایه‌ای و کامپوزیت‌های تقویت شده با GS لایه‌ای توسط محققان مختلف در سراسر جهان اجرا شده است و مشخص شده است که افزایش دما پیامد منفی بر خواص مکانیکی GSها دارد [28]. در سال ۲۰۲۰ صدیق و همکاران پژوهشی تحت عنوان بررسی نانوکامپوزیت‌های بورنیترید آلومینیوم انجام دادند. در خلال این پژوهش اثر عیب جای خالی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که حضور نقص جای خالی در نانوکامپوزیت بورنیترید آلومینیوم منجر به افت خواص مکانیکی خواهد شد [29]. همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهد که تشکیل عیوب نامطلوب در ساختارهای کریستالی یک مسئله اجتناب‌ناپذیر است، به‌خصوص زمانی که فرایندهای مکانیکی در روش سنتز آن‌ها دخالت داشته باشد. اگرچه وجود جای خالی خواص مغناطیسی را ارتقا می‌دهد اما عیوب ذکر شده ویژگی‌های مکانیکی این نانوساختارها را کاهش می‌دهد [30,31].

در سال ۲۰۱۷ در یک پژوهش انجام شده، مخالینگام و کومار به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین پرداختند. در این پژوهش که به نتایج محدودی ختم شده است، هیچ گونه نقص ساختاری و همچنین اثر تعداد لایه بر خواص مکانیکی مورد توجه قرار نگرفته است و نتایج گزارش شده محدود به مدول یانگ نانوکامپوزیت است [32]. به همین دلیل برای دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت، بررسی عیب‌ها در خلال شبیه‌سازی نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین امری ضروری است. با توجه به ضروریات ذکر شده، در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با گرافین تحت تست کشش تک‌محوره در جهت x و همچنین تأثیر نقص جای خالی اعمال شده در لایه گرافین با درصدهای اتمی ۳، ۶ و ۹، تأثیر نقص حفره اعمال شده بر لایه گرافین با شعاع‌های ۵، ۷ و ۹ آنگستروم و همچنین اثر افزایش تعداد لایه فاز فیبر یعنی گرافین بر مدول یانگ و استحکام کششی نانوکامپوزیت پرداخته شده است.

مدل‌سازی سلول واحد نانو

مدل شبیه‌سازی

نانو سلول واحد مولکولی (NUC) برای شبیه‌سازی MD در شکل (۱) با یک، دو و سه لایه گرافین نشان داده شده است. برای ایجاد

NUCدر شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، شرایط تناوبی در محورهای x، y و z استفاده می‌شود. کسر حجمی برای نانوسلول واحد ۵٪ با ابعاد ۵۱ آنگستروم در جهات x و y و ۲۸/۳۵ آنگستروم در جهت z در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی آثار مکانیکی نقص جای خالی و نقص حفره، تست‌های کشش انجام شده روی نانوکامپوزیت به دو دسته مجزای بدون نقص و با نقص تقسیم‌بندی می‌شوند. تست‌های کشش در جهت x و با حضور نقص جای خالی با درصدهای اتمی ۳ ، ۶ و ۹ به‌صورت تصادفی و در ساختار گرافین در نظر گرفته شده است (شکل ۲-الف). همچنین به منظور انجام آزمون کشش نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین با نقص حفره، حفره‌هایی با شعاع ۵، ۷ و ۹ آنگستروم در وسط لایه گرافین ایجاد شده است (شکل ۲-ب) لازم به ذکر است که متناسب با افزایش تعداد لایه‌های گرافین، ابعاد نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین به منظور ثابت ماندن کسر حجمی در جهت z افزایش داده شده است.

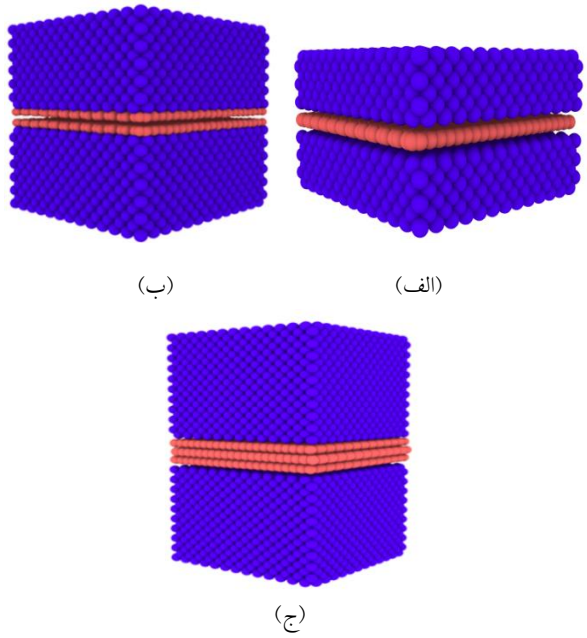
پتانسیل‌های بین اتمی

استفاده از پتانسیل بین اتمی صحیح در انجام شبیه‌سازی‌ها نقشی کلیدی دارد [33]. در مطالعه حاضر پتانسیل‌های بین اتمی زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

الف) برای اتم‌های آلومینیوم روش اتم تعبیه شده اصلاح شده (MEAM)، [34]

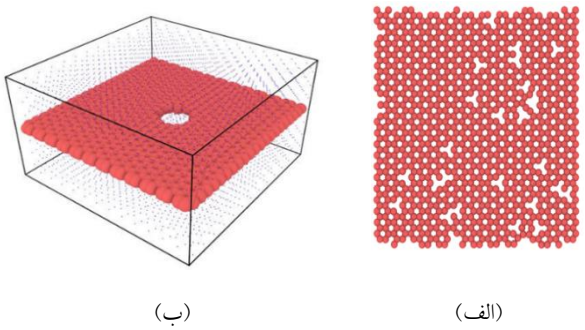
ب) برای اتم‌های کربن ترتیب پیوند تجربی واکنشی بین مولکولی تطبیقی(AIREBO) [35]

پ) برای تعاملات بین اتم‌های کربن و آلومینیوم لنارد-جونز (L-J) [36]



(الف) (ب) (ج)

شکل ۱ مدل اتمی نشان دهنده ساختار نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین: الف) گرافن تک لایه، ب) گرافین دولایه و ج) گرافین سه لایه



(الف) (ب)

شکل ۲ الف) نقص جای خالی ۳ درصد اتمی در ساختار گرافین نانوکامپوزیت، ب) حفره در ساختار گرافین نانوکامپوزیت

جدول ۱ پارامترهای مربوط به پتانسیل‌های بین اتمی [37]

پیوند آلومینیوم کربن با قانون اختلاط	پیوند کربن-کربن	پیوند آلومینیوم-آلومینیوم	پارامترهای پتانسیل لناردجونز
۰/۰۳۴۳۸	۲/۸۴۴۰	۰/۴۱۵۷	Ɛ (ev)
۳/۰۱۰۰	۳/۴۰۰۰	۲/۶۲۰۰	Б (A^0)
			شعاع کات‌آف=3 ×$Б_{AL-C} = 9.03A^0$

همچنین مقدار شـــعاع قطع معادل $3\sigma_{AL-C}$ در نظر گرفته می‌شود. انرژی کل مدل به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$E_{total} = E_{AL}^{MEAM} + E_{C}^{AIREBO} + E_{LJ}^{AL-C} \quad (۱)$$

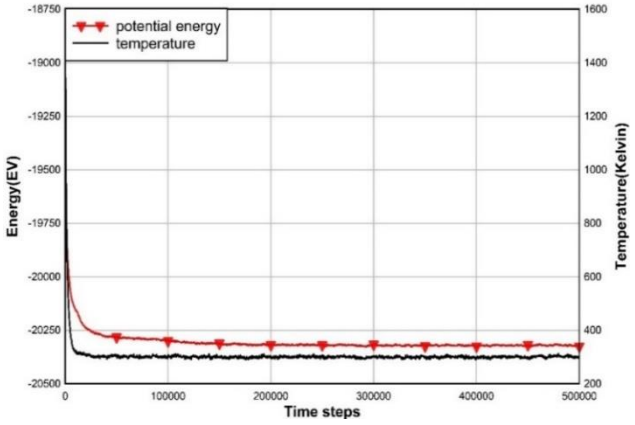
پتانسیل‌های مورد نیاز و پارامترهای مربوط (به عنوان مثال، شعاع واندروالس(σ)، عمق چاه بالقوه (e) و برش شعاع) توسط چوی و همکاران مورد بحث قرار گرفته است و همچنین در جدول (۱) ذکر شده‌اند.

برای انجام شبیه‌سازی MD، کدهای منبع باز کاربر پسند و قابل اعتماد مختلفی مثل LAMMPS، CHARMM، NAMD، AMBER، GROMACS، GROMOS به صورت رایگان در دسترس هستند [38]. با وجود نرم‌افزارهای شبیه‌سازی MD موجود، از کد LAMMPS به طور گسترده‌ای به دلیل تطبیق‌پذیری آن استفاده می‌شود. بنابراین در مطالعه حاضر، LAMMPS به عنوان ابزار شبیه‌سازی استفاده می‌شود [39].

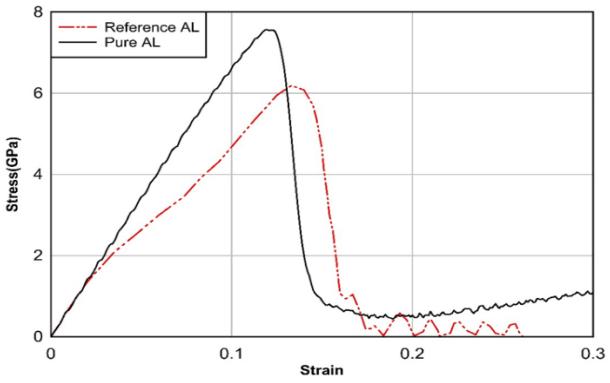
شرایط شبیه‌سازی

گام زمانی پس از هم‌گرایی نتایج در مقدار ۰/۵ فمتوثانیه برای همه مدل‌های شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شد و اتم‌ها تحت مجموعه میکروکانونیکال (NVE) در دمای ۳۰۰ کلوین با ترموستات لانگوین متعادل می‌شوند. پس از آن برای آزاد کردن تنش‌های داخلی اولیه، فشار صفر بار با استفاده از آنسامبل NPT اعمال شد. همان طور که در شکل (۳) مشخص است، اتم‌ها پس از طی کردن پانصد هزار گام زمانی، به سطح کمینه انرژی خود رسیده و از آنجا که پایداری سیستم وابسته به انرژی پتانسیل است، این نمودار نشان از به تعادل رسیدن سیستم اتمی دارد. همچنین دمای سیستم شبیه‌سازی شده، به خوبی در ناحیه ۳۰۰ کلوین قرار گرفته است.

در مرحله اول اعتبارسنجی رویکرد شبیه‌سازی MD آلومینیوم خالص در مقاله حاضر با مقایسه نتایج نمودار تنش-کرنش و مدول یانگ با نتایج منتشر شده در مقاله رونگ و همکاران (شکل ۴) انجام شده است [40]. رونگ و همکاران مدول ۷۴,۷۸ گیگاپاسکال را گزارش کردند و در شرایط شبیه‌سازی مشابه، مطالعه حاضر مدول ۷۰ گیگاپاسکال را گزارش می‌کند از این رو دقت روش فعلی تأیید شده است.



شکل ۳ آرامش انرژی پتانسیل و دما ساختار نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین تک‌لایه

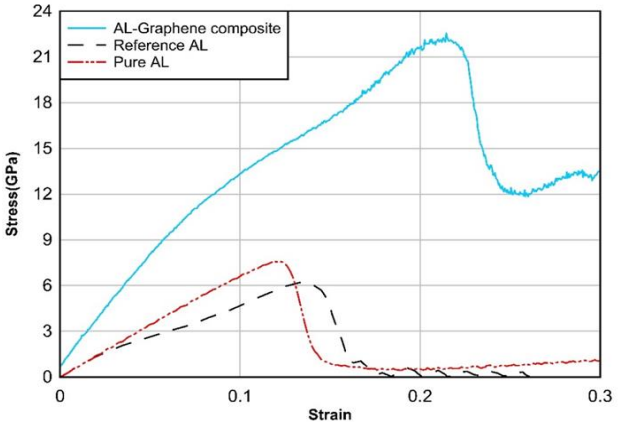


شکل ۴ نمودار مقایسه تنش کرنش آلومینیوم خالص با مقاله مرجع [40]

نتایج و بحث

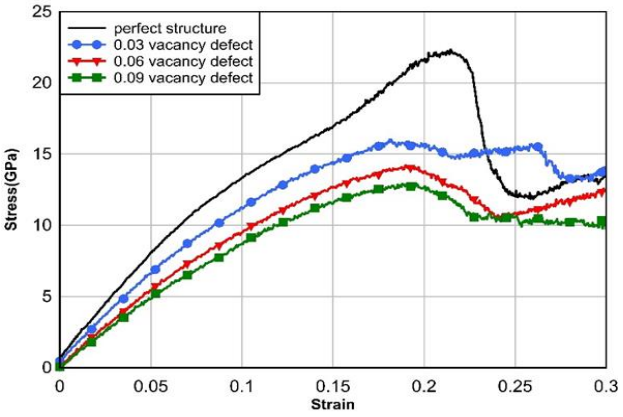
ویژگی‌های مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با گرافین توسط آزمایش‌های عددی MD و با استفاده از مرزهای تناوبی با شرایط کسر حجمی ۵ درصد برای فاز فیبر محاسبه شد. نتایج منحنی‌های تنش کرنش که توسط شبیه‌سازی رایانه‌ای MD یافت شده، در شکل‌های زیر نشان داده شده است. همان طور که پیش‌تر گفته شد، همه ساختارهای کریستالی در شبکه خود دارای حفره‌ها و نقص‌هایی هستند که برای دستیابی به نتایج واقعی و قابل اعتمادتر لازم است اثرات آن‌ها بررسی شوند. در این پژوهش سه تست کشش برای نانوساختار با نقص جای خالی و درصدهای اتمی ۳ ، ۶ و ۹ در ساختار گرافین، سه تست کشش با حضور نقص حفره اعمال شده در لایه گرافین با شعاع ۵ ، ۷ و ۹ و همچنین تست کشش با تقویت یک، دو و سه لایه گرافین انجام گرفته شد. در شکل (۵)، نتایج حاصل از آزمون کشش تک‌محوره نانوکامپوزیت بدون نقص آلومینیوم گرافین تک‌لایه با آزمون کشش آلومینیوم خالص و نمونه مرجع مقایسه شده است.

برای نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین بی‌نقص، مدول یانگ ۱۵۳ گیگا پاسکال و استحکام کششی ۲۲/۵ گیگا پاسکال به دست آمد که در مقایسه با نمونه آلومینیوم خالص به ترتیب حدود ۲۲۰ و ۳۲۰ درصد افزایش مشاهده می‌شود. مقادیر تنش نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین در حین بارگذاری روند صعودی دارند تا در کرنش ۰/۲۲ گرافین دچار گسیختگی می‌شود در حالی که برای آلومینیوم خالص کرنشی که بیشترین تنش در آن اتفاق افتاده است، ۰/۱۳ می‌باشد. همچنین چقرمگی که معادل سطح زیر نمودار تنش کرنش است برای نانوکامپوزیت بسیار بیشتر از نمونه آلومینیوم خالص است.



شکل ۵ مقایسه نمودار تنش کرنش آلومینیوم خالص و نانوکامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با گرافین

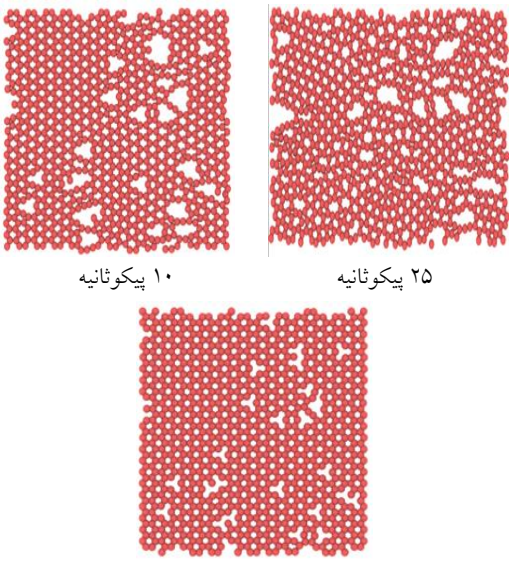
شکل (۶) منحنی‌های تنش کرنش نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای عیب جای خالی با درصدهای اتمی ۳، ۶ و ۹ را نشان می‌دهند که با نمونه نانوکامپوزیت بی‌عیب آلومینیوم گرافین تک‌لایه مقایسه شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود اعمال نقص جای خالی با ۳ درصد اتمی در ساختار گرافین باعث کاهش شیب ناحیه خطی منحنی تنش کرنش و استحکام کششی نانوکامپوزیت شده است. همان طور که در نمودار (۶) مشخص است، نانوکامپوزیت دارای نقص جای خالی ۳ درصد اتمی بیشترین تنش خود را به مقدار ۱۶/۰۳ گیگاپاسکال در کرنش ۰/۱۸ تحمل کرده است که استحکام کششی در مقایسه با نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین بی‌نقص، ۲۸/۱۱ درصد کاهش یافته است. این کاهش به دلیل ضعف در ساختار لایه گرافین با توجه به اعمال نقص جای خالی ۳ درصد می‌باشد.



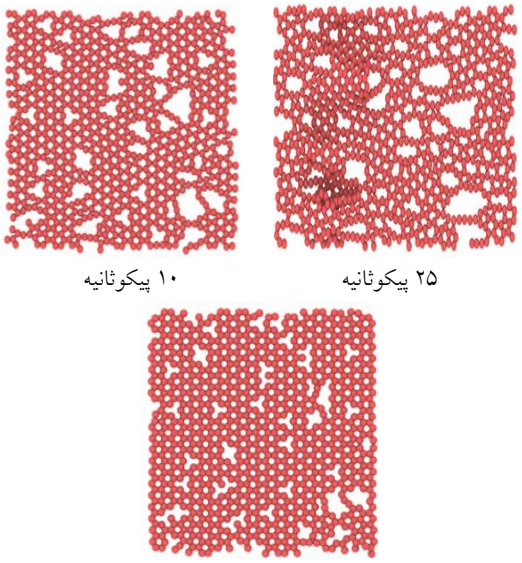
شکل ۶ مقایسه اثر نقص جای خالی بر مدول یانگ و استحکام کششی نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین با نمونه بی‌نقص

استحکام کششی برای نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای ۶ درصد نقص جای خالی، مقدار ۱/ ۱۵ گیگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با ساختار بی‌نقص آلومینیوم گرافین، ۳۲/۲ درصد کاهش پیدا کرده است. برای نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای نقص جای خالی ۹ درصد اتمی، استحکام کششی ۱۴/۷ گیگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نمونه بی‌نقص به ترتیب ۳۴ درصد کاهش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان بیان داشت که تنش حد نهایی نانوکامپوزیت سالم و بی‌نقص در حدود ۲۰۰ تا ۳۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است و این روند با مشاهدات تجربی افزایش تنش حد نهایی در تست کشش کامپوزیت آلومینیوم- گرافن مطالعه آقای لی و همکارانش که افزایش ۲۰۰٪ در تنش حد نهایی را با افزودن ۱٪ گرافن به ساختار آلومینیوم مشاهده کردن هم‌خوانی دارد [41] .علاوه بر این در همه نمونه‌های دارای نقص جای خالی با افزایش درصد اتمی نقص، شیب ناحیه خطی منحنی تنش کرنش کاهش پیدا کرده است. نکته قابل توجه در خصوص اعمال نقص جای خالی بر ساختار گرافین در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین مربوط به افت شدید خواص مکانیکی با اعمال نقص جای خالی بر لایه گرافین است.

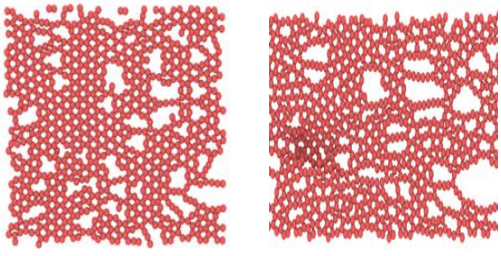
اشکال (۷) تا (۹) رفتار کششی لایه گرافین دارای نقص جای خالی حین بارگذاری کششی را در گام‌های زمانی مختلف نشان می‌دهند که با اعمال هر چه بیشتر درصد اتمی نقص جای خالی، مشاهده می‌شود که تغییر شکل و گسیختگی ساختار گرافین زودتر رخ می‌دهد.

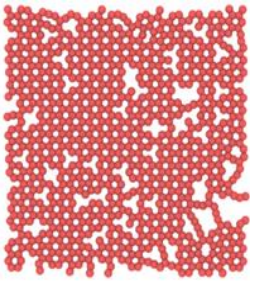


شکل ۷ رفتار کششی لایه گرافین دارای نقص جای خالی ۳ درصد در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین



شکل ۸ رفتار کششی لایه گرافین دارای نقص جای خالی ۶ درصد در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین



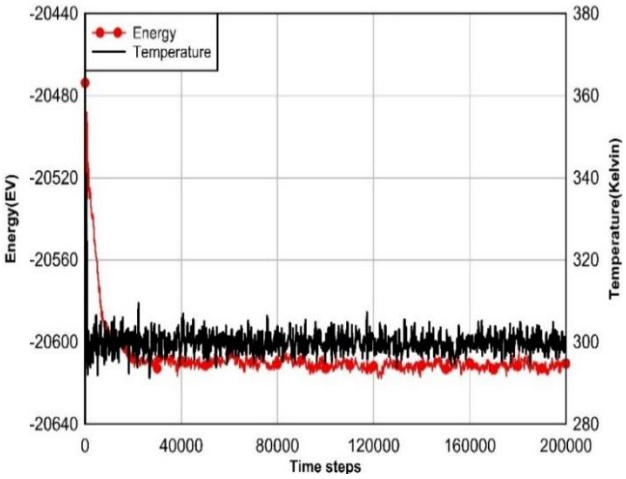


شکل ۹ رفتار کششی لایه گرافین دارای نقص جای خالی ۹ درصد در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین

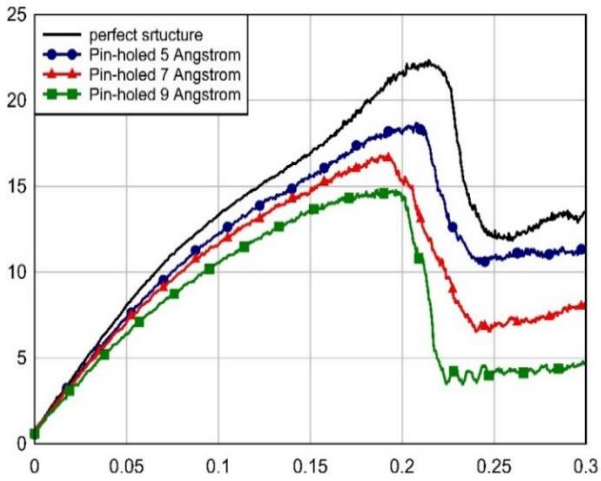
به‌منظور انجام آزمون کشش نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای نقص حفره در ساختار گرافین تک‌لایه که در شکل (۲-ب) مشخص است، سه نمونه با شعاع ۵، ۷ و ۹ آنگستروم ایجاد شده است. پس از ایجاد ساختارهای مورد نظر، آزمون کشش در جهت x روی ساختار کامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با تک لایه گرافین دارای حفره اعمال شد. شکل (۱۰) نمودار تعادل دمایی و انرژی پتانسیل نانوساختار آلومینیوم گرافین دارای نقص حفره را نشان می‌دهد که در تمام مدت زمان شبیه سازی دما در محدوده ۳۰۰ کلوین نگه داشته شده است. علاوه بر این، انرژی پتانسیل ساختار در مقدار ۲۰۶۱۰- به سطح پایدار خود رسیده است. شکل (۱۱) منحنی‌های تنش- کرنش مربوط به ساختار کامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۵، ۷ و ۹ و نقایسه آن با ساختار بی‌عیب نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین را نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل (۱۱) مشخص است وجود نقص حفره در لایه گرافین باعث کاهش شیب ناحیه خطی منحنی تنش کرنش، استحکام کششی و مقدار کرنشی که بیشترین تنش در آن اتفاق می‌افتد، شده است. استحکام کششی برای ساختار کامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۵ آنگستروم ۱۸/۶ گیگاپاسکال به دست آمد که نسبت به ساختار کامل نانوکامپوزیت آلومینیم گرافین باعث افت ۱۶/۵ درصدی شده است. برای ساختار نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۷ آنگستروم، مقدار استحکام کششی ۱۶/۶۷ گیگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با ساختار بی‌نقص نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین ۲۵/۲ درصد کاهش در استحکام کششی مشاهده می شود. در آخر و برای ساختار نانوکامپوزیت

آلومینیوم گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۹ آنگستروم استحکام کششی مقدار ۱۴/۴۹ به دست آمد که در مقایسه با ساختار بی‌نقص نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین کاهش ۳۵ درصدی حاصل شد.

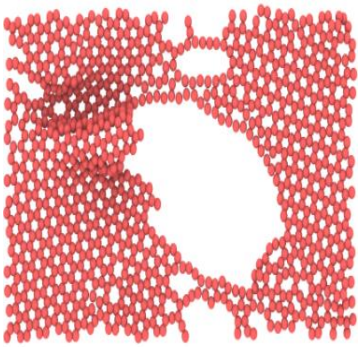


شکل ۱۰ نمودار تعادل دمایی و انرژی پتانسیل نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین تک‌لایه با نقص حفره

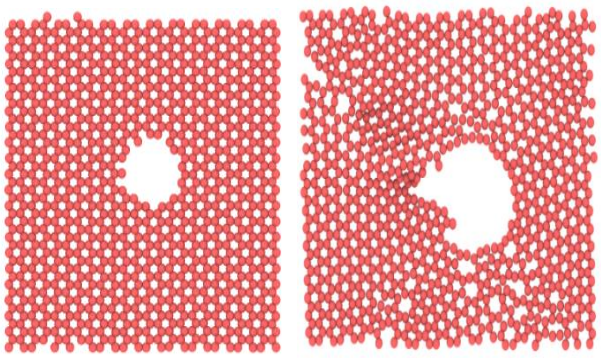


شکل ۱۱ نمودار مقایسه تنش-کرنش کامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای نقص حفره با نمونه بی‌نقص

از مقایسه نمودارها می‌توان دریافت که با اعمال نقص حفره در لایه گرافین خواص مکانیکی شیب ناحیه خطی افت کرده است و با افزایش شعاع حفره، مقدار کرنشی که بیشترین تنش در آن اتفاق می‌افتد، کاهش پیدا کرده است. به عنوان مثال، در منحنی تنش- کرنش نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین بی‌نقص این مقدار کرنش، ۰/۲۲ است، در حالی که برای نمونه دارای نقص حفره با شعاع ۹ این عدد مقدار ۰/۱۸ می‌باشد که این مهم، بیانگر آن است که نمونه‌های دارای نقص در اثر تنش کششی محوری زودتر دچار تغییر شکل می‌شوند. همچنین تغییر شکل لایه گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۵، ۷ و ۹ آنگستروم حین آزمون کشش در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین در نمودارهای (۱۴-۱۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع حفره در ساختار گرافین در گام زمانی یکسان، گسیختگی بیشتری دیده می‌شود.

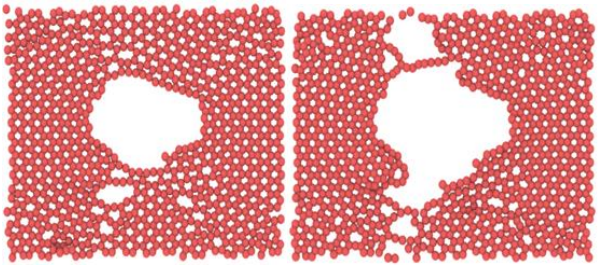


۱۷پیکوثانیه



۸ پیکوثانیه ۰ پیکوثانیه

شکل ۱۲ رفتار کششی لایه گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۵ آنگستروم در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین

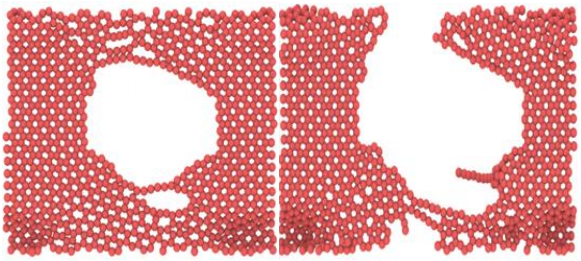


۱۷ پیکوثانیه ۸ پیکوثانیه



۰ پیکوثانیه

شکل ۱۳ رفتار کششی لایه گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۷ آنگستروم در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین



۱۷پیکوثانیه ۸ پیکوثانیه

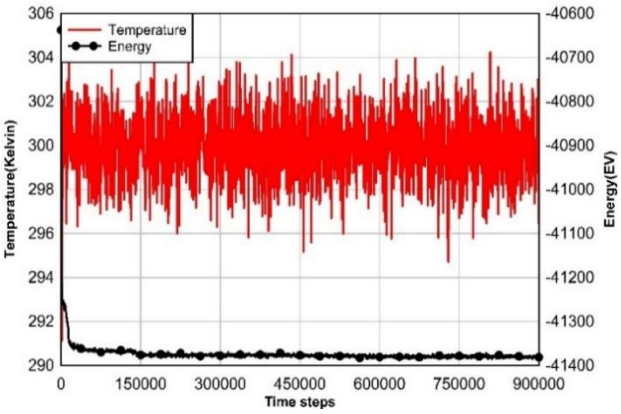


۰ پیکوثانیه

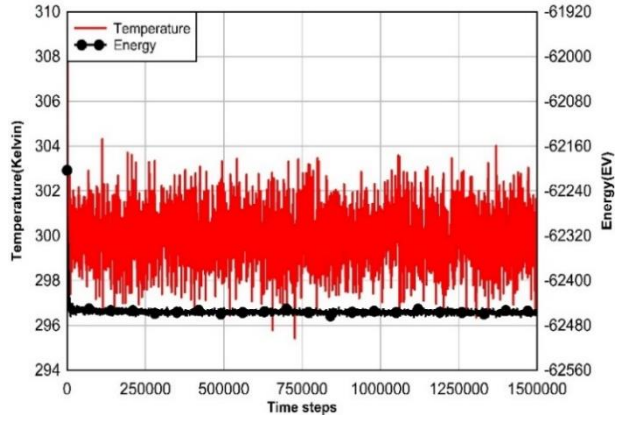
شکل ۱۴ رفتار کششی لایه گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۹ آنگستروم در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین

همگرایی انرژی پتانسیل و دمای ساختار آلومینیوم گرافین تک‌لایه در شکل (۳) آورده شده است. در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نمودارهای تعادل دما و انرژی پتانسیل ساختارهای آلومینیوم گرافین دو و سه لایه آورده شده است. در شکل (۱۵) و (۱۶) به خوبی نشان داده شده است که در حین شبیه‌سازی، دمای سیستم اتمی به خوبی در حدود ۳۰۰ کلوین نگه داشته شده است. همچنین مقادیر انرژی پتانسیل به تعادل رسیده به ترتیب برای ساختار دو و سه لایه ۴۱۳۸۰- و ۶۲۴۶۰- الکترون ولت است. منحنی تنش کرنش نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین یک، دو و سه لایه در شکل (۱۷) آورده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش تعداد لایه از یک به سه، مقدار کرنشی که بیشترین تنش در آن اتفاق می‌افتد، به سمت ارقام بزرگ‌تری میل می‌کند. همچنین نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دولایه در کرنش ۰/۲۴ بیشترین تنش خود را تحمل می‌کند در حالی که طبق شکل برای نانوساختار سه‌لایه این مقدار کرنش به ۰/۲۶ رسیده است و در حالت تک‌لایه این مقدار ۰/۲۲ است. این بدان معناست که با افزایش تعداد لایه گرافین، مقاومت نانوکامپوزیت در مقابل تغییر شکل افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های گرافین، شیب ناحیه خطی منحنی تنش- کرنش نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین افزایش می‌یابد. در خصوص استحکام کششی نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین باید گفت که این مقادیر هم همچون شیب ناحیه خطی منحنی تنش- کرنش، روند صعودی داشتند و با افزایش تعداد لایه، استحکام کششی هم افزایش یافت. به طوری که در نانوکامپوزیت تک‌لایه مقدار استحکام کششی ۲۲/۳ گیگاپاسکال به دست آمد. این عدد برای حالت دولایه نسبت به تک‌لایه ۱۰۰ مگاپاسکال رشد نشان داده است و مقدار ۲۲/۴ گیگاپاسکال گزارش می‌شود. در نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین سه لایه مقدار استحکام کششی ۲۲/۸ گیگاپاسکال ثبت شد که نسبت به نمونه تک‌لایه به میزان ۵۰۰ مگاپاسکال رشد داشته است.

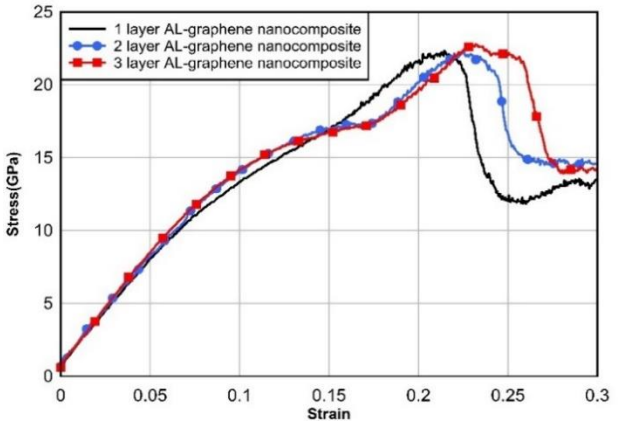
در جدول‌های (۴-۲) مقادیر مدول یانگ و تنش حد نهایی نانوکامپوزیت برای تمام حالت‌های بررسی شده در این پژوهش آورده شده است. مدول یانگ برای نانوکامپوزیت با نقص جای خالی ۳، ۶ و ۹ درصد اتمی به ترتیب ۱۲۹/۶، ۱۱۶/۸ و ۱۰۲/۴ گیگاپاسکال می‌باشد که نسبت به نمونه بی‌نقص به ترتیب ۱۵/۲، ۲۳/۶ و ۳۳ درصد کاهش یافته است. برای نانوکامپوزیت با نقص حفره با شعاع ۵، ۷ و ۹ آنگستروم مدول یانگ به ترتیب ۱۴۰، ۱۳۵/۴ و ۱۲۰/۵۹ گیگاپاسکال است در مقایسه با نمونه بی‌نقص به ترتیب ۸/۴، ۱۱/۵ و ۲۱/۱ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین مدول یانگ برای نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم گرافین یک، دو و سه لایه روند صعودی داشت که به ترتیب مقادیر ۱۵۳، ۱۵۷/۷ و ۱۵۹/۷ گیگاپاسکال گزارش می‌شود که در مقایسه با نمونه آلومینیوم خالص به ترتیب ۲۱۸، ۲۲۵ و ۲۲۸ درصد افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۵ نمودار تعادل دمایی و انرژی پتانسیل نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دولایه



شکل ۱۶ نمودار تعادل دمایی و انرژی پتانسیل نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین سه‌لایه



شکل ۱۷ نمودار مقایسه تنش کرنش نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم گرافین چندلایه

جدول ۲ مدول یانگ و استحکام حد نهایی نانوکامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با گرافین دارای نقص جای خالی

نمونه	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	استحکام کششی (گیگاپاسکال)
نقص جای خالی ۳ درصد اتمی	۱۲۹/۶	۱۶
نقص جای خالی ۶ درصد اتمی	۱۱۶/۸	۱۵/۱
نقص جای خالی ۹ درصد اتمی	۱۰۲/۴	۱۴/۷

جدول ۳ مدول یانگ و استحکام کششی نانوکامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با گرافین دارای نقص حفره

نمونه	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	استحکام کششی (گیگاپاسکال)
نقص حفره به شعاع ۵ آنگستروم	۱۴۰	۱۸/۶
نقص حفره به شعاع ۷ آنگستروم	۱۳۵/۴	۱۶/۷
نقص حفره به شعاع ۹ آنگستروم	۱۲۰/۶	۱۴/۵

جدول ۴ مدول یانگ و استحکام کششی آلومینیوم خالص و نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم گرافین

نمونه	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	استحکام کششی (گیگاپاسکال)
آلومینیوم خالص	۷۰	۷
نانوکامپوزیت با گرافین تک‌لایه	۱۵۳	۲۲/۳
نانوکامپوزیت با گرافین دولایه	۱۵۷/۷	۲۲/۴
نانوکامپوزیت با گرافین سه‌لایه	۱۵۹/۷	۲۲/۸

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آزمون‌های کشش به کمک دینامیک مولکولی برای ارزیابی مدول یانگ و استحکام کششی نانوکامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با گرافین انجام شد. سلول واحد در مقیاس

نانو برای پیش‌بینی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیوم توسط لایه گرافین و همچنین اثر نقص جای خالی و نقص حفره، به دو صورت ساختار کامل و ساختارهای دارای نقص جای خالی ۳، ۶ و ۹ درصد اتمی و ساختار دارای نقص حفره با شعاع ۵ ، ۷ و ۹ آنگستروم شبیه‌سازی شد. همچنین برای بررسی اثر تعداد لایه گرافین بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت، هر کدام از این ساختارها به‌صورت جداگانه ایجاد شدند. یافته‌های مهم بر اساس مطالعه حاضر عبارتند از:

۱. افزودن تک لایه گرافین به ساختار آلومینیوم خالص موجب افزایش قابل توجه مدول یانگ و استحکام کششی آلومینیوم خالص شد که برای نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین تک‌لایه این مقادیر ۱۵۳ و ۲۲/۳ گیگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نمونه آلومینیوم خالص، به ترتیب ۲۱۸ و ۳۲۰ درصد افزایش یافته‌اند.

۲. تقویت ساختار آلومینیوم خالص به وسیله دو و سه‌لایه گرافین موجب افزایش مدول یانگ و استحکام کششی آلومینیوم خالص شد که برای نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دو و سه لایه، مقادیر مدول یانگ به ترتیب ۱۵۷/۷ و ۱۵۹/۷ به دست آمد که در مقایسه با آلومینیوم خالص ۲۲۵ و ۲۲۸ درصد افزایش مشاهده می‌شود. همچنین استحکام کششی برای نانوکامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با دو و سه لایه گرافین مقادیر ۲۲/۴ و ۲۲/۸ به دست آمد که در مقایسه با آلومینیوم خالص به‌ترتیب ۲۹۸/۶ و ۳۰۴ درصد افزایش داشته است.

۳. نقص جای خالی باعث کاهش مدول یانگ و استحکام کششی نانوکامپوزیت شد. به طوری که برای نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای نقص جای خالی ۳ ، ۶ و ۹ درصد اتمی مقادیر مدول یانگ به ترتیب ۱۲۹/۶ ، ۱۱۶/۸ و ۱۰۲/۴ گیگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین بی‌نقص به ترتیب ۱۵/۲ ، ۲۳/۶ و ۳۳ درصد کاهش پیدا کرده است. مقادیر استحکام کششی برای نانوکامپوزیت‌های دارای نقص جالی خالی ۳ ، ۶ و ۹ درصد به ترتیب ۱۶/۰۳ ، ۱۵/۱ و ۱۴/۷ به دست آمد که در مقایسه با نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین بی‌نقص به ترتیب ۲۸/۱ ، ۳۲/۲ و ۳۴ درصد کاهش مشاهده می‌شود.

۴. نقص حفره باعث کاهش مدول یانگ و استحکام کششی نانوکامپوزیت شد. به طوری که برای نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین دارای نقص حفره با شعاع ۵ ، ۷ و ۹ آنگستروم به ترتیب مقادیر مدول یانگ ۱۴۰، ۱۳۵/۴ و ۱۲۰/۵۹ گیگاپاسکال به دست آمد که مدول یانگ در مقایسه با نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین بی‌نقص به ترتیب ۸/۴ ، ۱۱/۵ و ۲۱/۱ درصد کاهش پیدا کرده است. مقادیر استحکام کششی برای نانوکامپوزیت‌های دارای نقص حفره با شعاع ۵، ۷ و ۹ درصد به ترتیب ۱۸/۶ ، ۱۶/۶۷ و ۱۴/۴۹ به دست آمد که در مقایسه با نانوکامپوزیت آلومینیوم گرافین بی‌نقص به ترتیب ۱۶/۵ ، ۲۵/۲ و ۳۵ درصد کاهش مشاهده می‌شود.

۵. رفتار اثر نقص جای خالی و نقص حفره بر روی مدول یانگ و استحکام کششی در سه آزمون گرفته‌شده برای هر دو ساختار به صورت غیر خطی ظاهر شد.

واژه نامه

ورقه‌های گرافن	Graphene sheet(GS)
نانوفولرن‌ها	Nanofullerenes
نانولوله‌های کربنی	Carbon nanotubes
پلی اتیلن	Polyethylene
استحکام کششی	Tensile strength
نقص جای خالی	Vacancy defect
سلول واحد نانومولکولی	Molecular Nano unit cell
دینامیک مولکولی	Molecular dynamics
گام زمانی	Time steps
شعاع قطع	Cuttof radius

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A. A. Balandin, “Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials,” *Nature Materials*, vol. 10, no. 8, pp. 569-581, (2011).

[2] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, J. Hone, "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene," *Science*, vol. 321, no. 5887, pp. 385-388, (2008).

[3] M. Sharma, L. Johnson, and J. W. McClure, "Diamagnetism of graphite," *Physics Letters A*, vol. 44, no. 7, pp. 445-446, (1973).

[4] K. Mohammadi, H. Shokrollahi, "Application of SSPH Method in Free Vibration Analysis of Graphene," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 31, no. 2, pp. 53-66, (2020).

[5] E. Fradkin, "Critical behavior of disordered degenerate semiconductors. I. Models, symmetries, and formalism," *Physical Review B*, vol. 33, no. 5, p. 3257, (1986).

[6] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science*, vol. 306, no. 5696, pp. 666-669, (2004).

[7] T. Kuilla, S. Bhadra, D. Yao, N. H. Kim, S. Bose, J. H. Lee, "Recent advances in graphene based polymer composites," *Progress in Polymer Science*, vol. 35, no. 11, pp. 1350-1375, (2010).

[8] H. Kim, C. W. Macosko, "Processing-property relationships of polycarbonate/graphene composites," *Polymer*, vol. 50, no. 15, pp. 3797-3809, (2009).

[9] S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, E. A. Stach, R. D. Piner, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff, "Graphene-based composite materials," *Nature*, vol. 442, no. 7100, pp. 282-286, (2006).

[10] M. El Achaby, A. Qaiss, "Processing and properties of polyethylene reinforced by graphene nanosheets and carbon nanotubes," *Materials & Design*, vol. 44, pp. 81-89, (2013).

[11] I. Chang, B. C. Chiang, "Mechanical buckling of single-walled carbon nanotubes: Atomistic simulations," *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no. 11, p. 1143313, (2009).

[12] M. Ayatollahi, S. Shadlou, and M. Shokrieh, "Multiscale modeling for mechanical properties of carbon nanotube reinforced nanocomposites subjected to different types of loading," *Composite Structures*, vol. 93, no. 9, pp. 2250-2259, (2011).

[13] M. A. Mostaan, J. Davoodi, H. Alizadeh, M. Yarifard, "Nontrivial tensile behavior of rutile TiO_2 nanowires: a molecular dynamics study," *The European Physical Journal B*, vol. 91, pp. 1-6, (2018).

[14] H. Alizadeh, M. A. Mostaan, N. Malih, J. Davoodi, "Size and shape dependent thermal properties of rutile TiO_2 nanoparticles: a molecular dynamics simulation study," *Molecular Simulation*, vol. 46, no. 5, pp. 341-349, (2020).

[15] M. Binghi, S. Rahnama, A. Dadrasi, "Analysis of fracture behavior of carbon nitride poly crystalline by genetic algorithm and molecular dynamics methods," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 29-46, (2023), doi: 10.22067/JACSM.2023.83323.1192.

[16] A. Albooyeh, A. Dadrasi, M. Razavikia, "Investigation of the Effect of Geometric Defects and Temperature Changes on the Fracture Behavior of Boron Carbide Monocrystalline Structure by Molecular Dynamics," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 27, pp. 37-48, (2022). doi:10.22067/JACSM.2023.83323.1192.

[17] M. A. H. Khotbesara, M. Ajri, M. Samadiyan, "Mechanical properties analysis of a monolayer biphenylene at different temperatures," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 22, no. 76, pp. 177-178, (2023).

doi:10.22075/JME.2023.31122.2485.

[18] M. Samadian, M. Ajri, A. zizi, M. A. H. Khotbesara, "Investigating the pinhole effect on the mechanical properties of biphenylene," *Applied Physics A*, vol. 129, pp.826-837 , (2023), doi: https://doi.org/10.1007/s00339-023-07112-z.

[19] F. Lin, Y. Xiang, and H. S. Shen, "Buckling of graphene embedded in polymer matrix under compression," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 15, no. 07, p. 1540016, (2015).

[20] Y. Y. Zhang, Y. T. Gu, "Mechanical properties of graphene: Effects of layer number, temperature and isotope," *Computational Materials Science*, vol. 71, pp. 197-200, (2013).

[21] Y. Song, Y. Chen, W. W. Liu, W. L. Li, Y. G. Wang, D. Zhao, X. B. Liu, "Microscopic mechanical properties of titanium composites containing multi-layer graphene nanofillers," *Materials & Design*, vol. 109, pp. 256-263, (2016).

[22] H. Wang, G. Xie, Z. Ying, Y. Tong, Y. Zeng, "Enhanced mechanical properties of multi-layer graphene filled poly (vinyl chloride) composite films," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 340-344, (2015).

[23] H. Kwon, D. H. Park, J. F. Silvain, and A. Kawasaki, "Investigation of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 70, no. 3, pp. 546-550, (2010).

[24] A. K. Srivastava, M. K. Dikshit, V. K. Pathak, L. Khurana, "A molecular dynamics study of the buckling behaviour of graphene-reinforced aluminum nanocomposite plate," *Materials Physics and Mechanics*, vol. 42, pp. 234-241, (2019).

[25] M. A. Farsi, A. R. Sehat, "Experimental and Numerical Study on Aluminum Damage Using a Nonlinear Model of Continuum Damage Mechanics," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 27, no. 2, pp. 41-54, (2016).

[26] A. Bashiri, M. Hosseini, H. Hatami, "Experimental and Numerical Analysis of Single and Double layered Aluminum Sheet 3105 With Mechanical Joints under Drop Weight Impact," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 30, no. 2, pp. 109-123, (2019).

[27] S. E. Shin, H. J. Choi, J. H. Shin, D. H. Bae, "Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites," *Carbon*, vol. 82, pp. 143-151, (2015).

[28] C. Li, A. R. Browning, S. Christensen, A. Strachan, "Atomistic simulations on multilayer graphene reinforced epoxy composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, no. 8, pp. 1293-1300, (2012).

[29] P. Sedigh, A. Zare, A. Montazeri, "Evolution in aluminum applications by numerically-designed high strength boron-nitride/Al nanocomposites," *Computational Materials Science*, vol. 171, p. 109227, (2020).

[30] A. Du, Y. Chen, Z. Zhu, R. Amal, G. Q. Lu, S. C. Smith, "Dots versus antidots: computational exploration of structure, magnetism, and half-metallicity in boron− nitride nanostructures," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, no. 47, pp. 17354-17359, (2009).

[31] Q. L. Xiong, Z. H. Li, X. G. Tian, "The defect-induced fracture behaviors of hexagonal boron-nitride monolayer nanosheets under uniaxial tension," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 48, no. 37, p. 375502, (2015).

[32] A. Mokhalingam, D. Kumar, A. Srivastava, "Mechanical behaviour of graphene reinforced aluminum nano composites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 3952-3958, (2017).

[33] S. N. A. Kalkhoran, M. Vahvadi, "The Effect of Interatomic Potential Function on Nanometric Machining of Single

Crystal Silicon," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 30, no. 2, pp. 17-32, (2019).

[34] E. Lee, B-J. Lee, "Modified embedded-atom method interatomic potential for the Fe–Al system," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 22, no. 17, p. 175702, (2010).

[35] S. J. Stuart, A. B. Tutein, J. A. Harrison, "A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 112, no. 14, pp. 6472-6486, (2000).

[36] A. Kumar Srivastava, V. Kumar Pathak, "Elastic properties of graphene-reinforced aluminum nanocomposite: Effects of temperature, stacked, and perforated graphene," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 234, no. 9, pp. 1218-1227, (2020).

[37] B. K. Choi, G. H. Yoon, S. Lee, "Molecular dynamics studies of CNT-reinforced aluminum composites under uniaxial tensile loading," *Composites Part B: Engineering*, vol. 91, pp. 119-125, (2016).

[38] M. González, "Force fields and molecular dynamics simulations*," École thématique de la Société Française de la Neutronique*, vol. 12, pp. 169-200, (2011).

[39] S. Plimpton, "Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics," *Journal of Computational Physics*, vol. 117, no. 1, pp. 1-19, (1995).

[40] Y. Rong, H. He, L. Zhang, N. Li, Y. Zhu, "Molecular dynamics studies on the strengthening mechanism of Al matrix composites reinforced by grapnene nanoplatelets," *Computational Materials Science*, vol. 153, pp. 48-56, (2018).

[41] J. Li, Y. C. Xiong, X. D. Wang, S. J. Yan, C. Yang, W. W. He, J. Z. Chen, S. Q. Wang, X. Y. Zhang, S. L. Dai, "Microstructure and tensile properties of bulk nanostructured aluminum/graphene composites prepared via cryomilling*," Materials Science and Engineering: A,* vol. 626, pp. 400-405, (2015).

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

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

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Reducing Stress Shield in the Femur Using Hip Prostheses Made of Functionally Graded Materials*

Research Article

Hastyar Jalilzadeh[1], Akbar Allahverdizadeh[2], Behnam Dadashzadeh[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.85554.1218

Abstract *Total hip joint replacement has problems, one of the most important of which is the stress shield phenomenon and weak bone growth. When the modulus of elasticity of the prosthesis is higher than that of the bone, most of the physiological load is transferred to the implant and the bone deteriorates. The solution to minimize it and strengthen bone growth is to use materials with elasticity modulus close to bone for prosthesis, and functionally graded materials (FGM) with porosity have shown better results than other materials. In this article, the model of cylinder and prosthesis based on ISO 7206-4 and the model of prosthesis and bone are used, and the results of applied stresses, stiffness of prostheses, and micromovements between prosthesis and bone are analyzed by the finite element method. The superiority of this study compared to previous studies is the use of prosthetic and cylinder models for different geometries and the investigation of micromovements and its effect on bone growth. The results show that the use of porous FGM prostheses for each different prosthesis geometry is effective in reducing the stress shield and bone growth.*

Key Words Femoral prosthesis, Functionally graded materials, Porosity, Stress shielding, Finite element method, Micromotion.

1- Introduction

Total hip replacement (THR) is known as a good choice for patients and can be useful for pain relief, function recovery, and quality of life improvement. Despite the success of THR, some reasons can negatively affect the use of this treatment, such as stress shielding. In this study, to solve this problem, a functionally graded material (FGM) was used for femoral prosthesis. Therefore, to investigate the effect of these materials, two models of prosthesis-epoxy cylinder and prosthesis-bone were used. The use of FGM materials in the prosthesis-cylinder model for different geometries and the investigation of micro-movements and their effect on bone growth were among the innovations of this research compared to other articles.

2- Methods

Three designed profiles and three circular, oval, and trapezoidal shapes were chosen for the distal and proximal sections of the prosthesis for this research. Three-dimensional (3D) design was applied in Solidworks software. To assign FGM materials consisting of two metal and ceramic materials for prostheses, the one-dimensional model of these materials and their constitutive equations were used. The following equations were used for the modulus of elasticity:

$$E = \frac{E_0(1-p)}{1 \quad p(5+8v)(37-8v)/\{8(1+v)(23+8v)\}} \tag{1}$$

where E_0 is:

$$E_0 = E_c\left[\frac{E_c + (E_m - E_c)V_m^{2/3}}{E_c + (E_m - E_c)\left(V_m^{2/3} - V_m\right)}\right] \tag{2}$$

and

$$V_m = (\cdot\text{/}l)^m \,, V_c = 1 - V_m \tag{3}$$

where E_c and E_m are the mod ıs ıf elas city of ce ımic and metal, respectively. The V_m, V_c, and υ denote vc ıme fraction of metal, the volume fraction of ceramic, V_c and the Poisson's ratio of ıe whole FGM material, respectively. The functional ɔorosity of the FGM material is also specified by the p parameter. To assign the properties of the FGM material to the selected prostheses and transfer them to ABAQUS, it was necessary to write a subroutine (USDFLD subroutine) of relations in the Fortran programming language and the Visual Studio software environment.

3- Prosthesis-epoxy cylinder model

All models were first integrated into 3D finite element models in ABAQUS to evaluate the performance of the designed prostheses in the natural femur. The ISO (ISO 7206-4) used in this research includes the endurance

*Manuscript received: December 25, 2023. Revised, January 12, 2024, Accepted, February 7, 2024.

[1] MSc, Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

[2] Corresponding Author. Assistant professor, Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

[3] Assistant Professor, Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

performance of femoral stem compone s f hip prostheses and femur stem components that a ı e ne in partial hip joint replacements. In FGM, $m = 0{,}0.1$ is used to assign the properties of the material to the prostheses. The settings and positions of the prostheses inside the cylinder, as well as the loading, boundary conditions, and interference between the investigated components, are adjusted based on the ISO used.

4- Prosthesis-bone model

To study the effect of designed FGM prostheses, the finite element model that includes the prosthesis and femur along with suitable physiological loads was used. For this purpose, a 3D model of the bone was first prepared and assembled with the prostheses for the finite element analysis. A set of CT-scan images of the femur of a 28-year-old person was used for the 3D reconstruction of the desired area and to convert it into a 3D model. Between all components, sliding is limited, surface-to-surface contact with a friction coefficient of 0.4 is considered, and tetrahedral elements of the second order (C3D10) are assigned.

The FGM material assigned to the prosthesis was validated based on the work of Hedia et al., which is shown in Figure (1). As can be seen, both the elasticity modulus-length diagrams of the prosthesis in this study and the model of Hadia et al. were in good agreement and were used for finite element analysis for models as well as prosthesis geometries.

The results obtained from the prosthesis-epoxy cylinder model. Force-displacement diagrams were extracted for all prostheses with two homogeneous materials, titanium, and FGM, in the epoxy model.

As shown in Figure 2 as an example of the prosthesis with a circular cross-section profile, it is clear that the FGM structure reduced the stiffness (slope of the force-displacemen li g ı) of the prostheses. This means that by increasing h f e up to 2250 (N), all FGM prosthesis geometries ($m = 0.1$) have more displacement compared to the homogeneous prosthesis, and as a result, the stiffness decreases and approaches the bone stiffness, which is what we had in mind.

5- Results

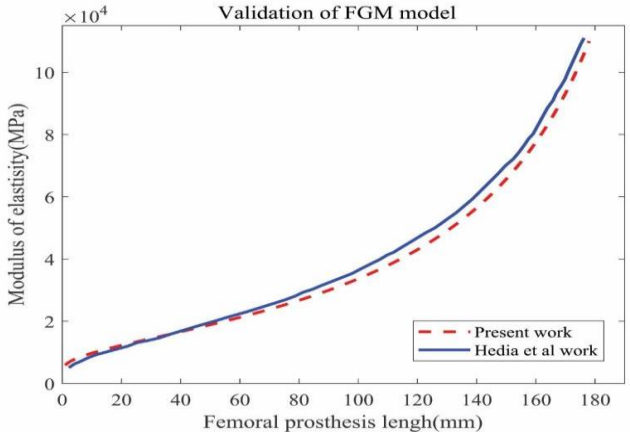


Figure 1. Diagram of changes in the modulus of elasticity in the length of the prosthesis for the present model and the model of Hedia et al.

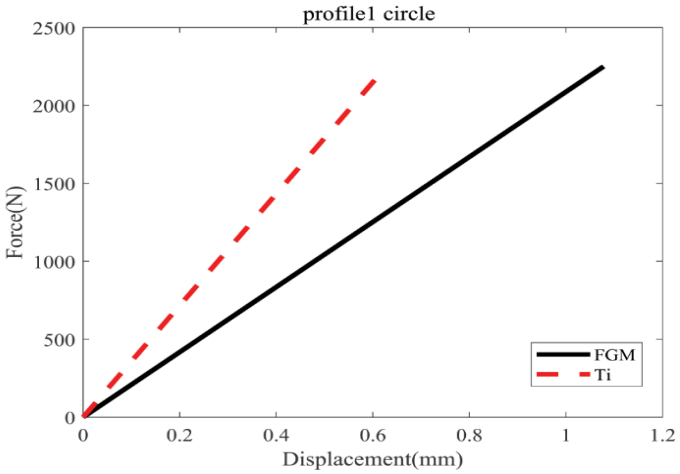


Figure 2. Force-displacement diagram of circle profile

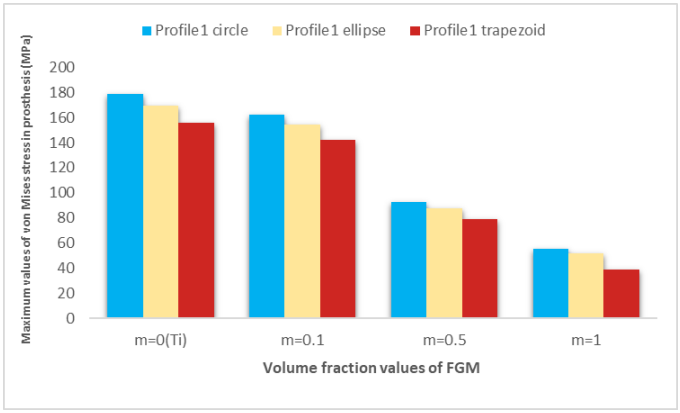


Figure 3. Chart of changes in the maximum value of von Mises stress according to the volume fraction of FGM material in profile 1 prostheses

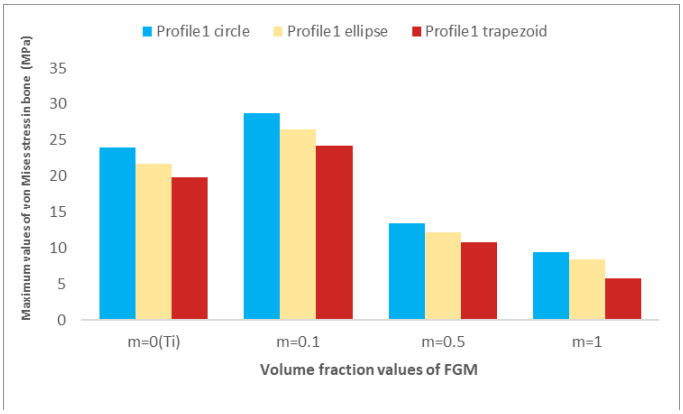


Figure 4. Chart of changes in the maximum value of von Mises stress in bone according to the volume fraction of FGM material for profile 1 prostheses

The results obtained from the prosthesis-bone model. The stresses in each layer of the prosthesis as well as the bone were calculated through the resul f f ε ε nent analysis for nine dense prosthesis ge ı r s ; 1 for the volume fraction index values of $m = 0, 0.1, 0.5, 1$ in a normal walking cycle (Figures 3 and 4). In all prostheses using FGM material, the stress applied to the prosthesis decreased compared to the dense titanium material and increased in the bone, which was as expected. The variety in values is attributed to the difference in the design of each prosthesis, profile, surface of different cross sections, and the volume fraction index of FGM materials. The micro-movement was calculated for distinct geometries, and the micro-movements of more than 150 µm are considered excessive and cause instability in the prosthesis and surgical failure. Therefore, among all geometries, prostheses with trapezoidal cross-sectional geometry and profiles two and three exceed the permissible limit and should not be used by the patient.

6- Conclusion

FGMs are new materials with excellent capabilities. Consequently, the main purpose of this research was to investigate the effect of using FGMs instead of dense materials in reducing the stress shielding phenomenon and enhancing bone growth in hip prostheses. In the design of the prosthesis for THR, flexible prostheses create less stress shielding in the surrounding bone but have more micromotion, and on the other hand, rigid prostheses with high-tension shielding induce less micromotion. Therefore, the design challenge is to know how to minimize the shielding stress while keeping the micro-movements of the interface at acceptable levels and not exceeding the permissible limit. Moreover, by examining the different indices of FGM material and the stress results obtained from the bone and prosthesis model, we concluded that the larger the volume fraction index of the FGM material, the stress values in the prosthesis and bone compared to the applied stresses to the prosthesis and bone group, in the case of using a prosthesis with dense titanium material, decreases. Therefore, the values of volume fraction index for FGM material are very effective and should receive more attention and be investigated to reach the appropriate index.

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد

کاهش سپر تنشی در استخوان ران با استفاده از پروتزهای ران ساخته شده از مواد توزیع شده تابعی*

مقاله پژوهشی

هستیار جلیل‌زاده [۱] اکبر اللهوردی‌زاده [۲] بهنام داداش‌زاده [۳]

***DOI**: 10.22067/jacsm.2024.85554.1218*

چکیده *تعویض کامل مفصل ران دارای مشکلاتی است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، پدیده سپر تنشی و ضعف رشد استخوان است. وقتی مدول الاستیسیته پروتز بالاتر از استخوان باشد، بیشتر بار فیزیولوژیکی به ایمپلنت منتقل می‌شود و استخوان تحلیل می‌رود. راه حل به حداقل رساندن آن و تقویت رشد استخوان، استفاده از مواد با مدول الاستیسیته نزدیک به استخوان برای پروتز است و مواد توزیع شده تابعی دارای تخلخل نتایج بهتری را نسبت به مواد دیگر نشان داده‌اند. در این مقاله از مدل استوانه و پروتز بر اساس ISO 7206-4 و مدل پروتز و استخوان استفاده شده و با روش اجزای محدود تحلیل و نتایج تنش‌های وارده، سفتی پروتزها و ریزحرکت‌های بین پروتز و استخوان بررسی شده است. برتری این مطالعه نسبت به پژوهش‌های قبلی استفاده از مدل پروتز و استوانه برای هندسه‌های مختلف و بررسی ریزحرکت‌ها و تأثیر آن در رشد استخوان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پروتزهای FGM متخلخل برای هر هندسه پروتز متفاوت در کاهش سپر تنشی و رشد استخوان مؤثر می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی پروتز ران، مواد توزیع‌شده تابعی، تخلخل، سپر تنشی، روش اجزای محدود، ریزحرکت.

مقدمه

استئوآرتریت و پوکی استخوان می‌توانند هر مفصلی را در بدن تحت تأثیر قرار دهند، اما در مفاصل ران و زانو شایع‌تر هستند و می‌توانند به تروما، نکروز آواسکولار، برخی بیماری‌های متابولیک، عفونت یا تغییرات مورفولوژی مفصل مانند دیسپلازی ران منجر شوند [1]. هیچ درمانی برای آسیب‌های مفاصل ران وجود ندارد و در موارد شدید جایگزینی کامل مفصل ران تنها انتخاب است [2].

جایگزینی کامل مفصل ران یا THA، یعنی جراحی تعویض مفصل ران با پروتز مصنوعی، یکی از مؤثرترین و موفق‌ترین مداخلات ارتوپدی برای چندین دهه بوده است، زیرا عملکرد را بازیابی می‌کند و درد را کاهش می‌دهد.

کیفیت تعویض مفصل به عوامل بالینی مانند عوارض پزشکی که بیمار ممکن است متحمل شود، وجود درد باقی‌مانده، نیازهای عملکردی و استقامت دستگاه پروتز بستگی دارد. کیفیت اساسا توسط عوامل طراحی پروتز (مواد، شکل پروتز، مفهوم تثبیت، و ابزار جراحی)، عوامل جراحی (مهارت‌ها و تجربه جراحی، از جمله انتخاب بیمار و دستگاه، سن، وزن و سطح فعالیت بدنی) مشخص می‌شود. هدف بالینی در تثبیت پایدار در تعویض مفصل را می‌توان از نظر انتقال بار از پروتز به استخوان بیان کرد. در پروتز ران مصنوعی، بارهای فیزیولوژیکی از طریق سر پروتز اعمال می‌شود و در قسمت دیستال، در زیر ساقه پروتز، این

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۱/۱۸ می‌باشد.

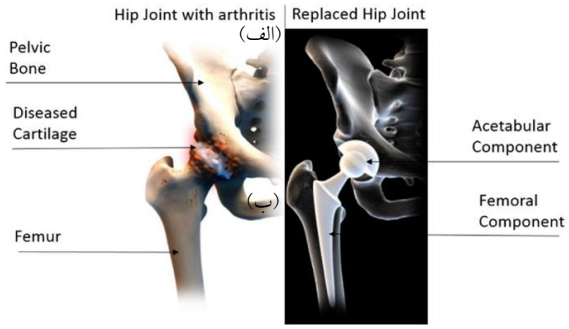
(۱) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

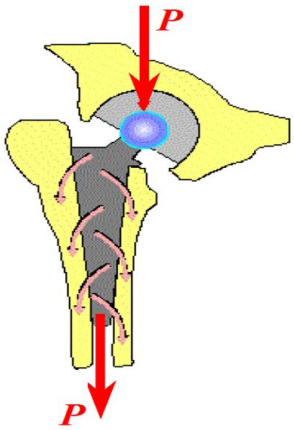
(۳) استادیار، گروه مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

Email: allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

نیروها به طور کامل توسط استخوان قشر ران حمایت می‌شوند، همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱ بیماری‌های مفصلی ران و درمان با تعویض کامل آن [3]



شکل ۲ الگوی انتقال بار در مجموعه استخوان و پروتز [4]

موادی که در پروتزهای ران استفاده می‌شوند، مانند آلیاژهای مبتنی بر تیتانیوم، آلیاژهای کروم کبالت و فولاد ضد زنگ 316L، همگی دارای مدول الاستیسیته بسیار بالاتر از استخوان هستند و هنگامی که پروتزی از جنس این مواد در استخوان ران کاشته می‌شود، بیشتر بار فیزیولوژیکی به پروتز منتقل می‌شود. انتقال بار تغییر یافته در استخوان ران کاشته شده منجر به کم بار شدن استخوان در مقایسه با حالت طبیعی آن می‌شود. در نتیجه استخوان، بافت زنده‌ای که به انتقال بار مکانیکی حساس است، با فرایندی تطبیقی به نام بازسازی استخوان جرم خود را از دست می‌دهد. به این پدیده سپر تنشی گفته می‌شود [5].

پروتز با خواص مدول الاستیسیته کاهش یافته برای مطابقت با بافت استخوانی ممکن است بتواند چنین مشکلی را به حداقل برساند. بنابراین مواد کامپوزیتی با مدول الاستیسیته پایین با هدف تطبیق عدم تطابق خاصیت الاستیک بین ایمپلنت و استخوان میزبان مجاور معرفی شدند [6].

در این را ستا از بین مواد کامپوزیتی پیشنهادی، مواد توزیع شده تابعی (FGM) مناسب‌ترین ویژگی‌ها را در مقایسه با سایر کامپوزیت‌ها نشان داده‌اند زیرا خواص عالی آن‌ها باعث می‌شود که سپر تنشی به حداقل برسد.

مفهوم FGM برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ در ژاپن و در پروژهی سفینه فضایی مطرح شد. پس از آن به علت ویژگی-های خاص، استفاده از آن‌ها در بسیاری از زمینه‌ها مانند صنایع نظامی، صنایع خودروسازی، تجهیزات پزشکی، نیمه‌هادی‌ها و ابزارهایی که در دماهای بالا کار می‌کنند، گسترش یافت [7].

اشکور و همکارانش پروتزهای ران با درجه‌بندی عملکردی (FGFP) با پیکربندی‌های هندسی مختلف با استفاده از تحلیل المان محدود سه‌بعدی را مورد مطالعه قرار دادند. FGFP متشکل از فولاد ضد زنگ- هیدروکسی آپاتیت و آلیاژ تیتانیوم- هیدروکسی آپاتیت با اندیس کسر حجمی مختلف n = 0,0.1,0.5,1 بود. نتایج نشان داد که چگالی انرژی کرنش در متافیز پروگزیمال استخوان ران بیش از ۲۲ درصد در FGFP با پیکربندی‌های هندسی مختلف افزایش می‌یابد که با کاهش سپر تنشی و متعاقبا کاهش تحلیل استخوان مطابقت دارد. بنابراین FGFP می‌تواند برای معرفی یک طرح بهینه جدید برای پروتز ران با سفتی قابل تنظیم استفاده شود که می‌تواند سپر تنشی و تنش رابط را کاهش دهد. این وضعیت منجر به افزایش طول عمر کلی تعویض مفصل ران می‌شود [8].

به منظور مدل‌سازی پروتزهای ران توزیع شده تابعی، هدیا و همکارانش طراحی پروتز به صورت یک ماده یک‌بعدی که در دو جهت طولی و عرضی بود و دو بعدی را مورد بررسی قرار دادند و هدف آن‌ها استفاده از مواد FGM به منظور توزیع مناسب تنش برشی و کاهش سپر تنشی و همچنین مدل‌سازی این مواد برای استفاده در تحلیل المان محدود بود. نتیجه به این صورت شد که درجه‌بندی بهینه سپر تنشی را تا ۸۳ درصد کاهش داد در حالی که حداکثر تنش برشی رابط را تا ۳۲ درصد در مقایسه با ساقه تیتانیوم همگن کاهش داد. این طرح منجر به کاهش سپر تنشی در مدل یک‌بعدی شد، در حالی که در همان زمان، حداکثر تنش برشی رابط به ترتیب ۴۵ و ۶۳ درصد در مقایسه با طرح

بهینه FGM یک بعدی و پروتز تیتانیوم همگن کاهش پیدا کرد [9].

حرکت نسبی بین سطح پروتز ران و استخوان میزبان در حضور بارهای فیزیولوژیکی اعمال شده، ریزحرکت می‌باشد. ارزیابی ریزحرکت برای ارزیابی رشد بافت استخوانی حیاتی است و مقادیر بیش از ۱۵۰ میکرومتر، بیش از حد در نظر گرفته شده و باعث ناپایداری ایمپلنت می‌شود [12-10].

الزوبی و همکارانش، تأثیر پروتزهای متخلخل طراحی شده به منظور کاهش تنش و ریز حرکت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها، با طراحی پروتز ران به صورت ساختارهای متخلخل درجه‌بندی شده عملکردی در جهت شعاعی به بررسی تمرکز بر انتقال تنش و ریزحرکات آن‌ها پرداختند. مقادیر ریزحرکت با افزایش تخلخل و بارهای فیزیولوژیکی و یا سرعت راه رفتن، افزایش یافت. از این رو، به بیمار توصیه شد که با سرعت کم راه برود تا از ریز حرکت زیاد پروتز جلوگیری کند که روی رشد بافت استخوانی تأثیر می‌گذارد و منجر به شکست ایمپلنت می‌شود. همچنین طرح‌های مرتبط با پروتز با تخلخل متوسط ۷۰ درصد در تمام سرعت‌های راه رفتن و ۵۰ درصد در سرعت راه رفتن ۵ کیلومتر در ساعت از نظر ریز حرکت ناموفق در نظر گرفته شد [12].

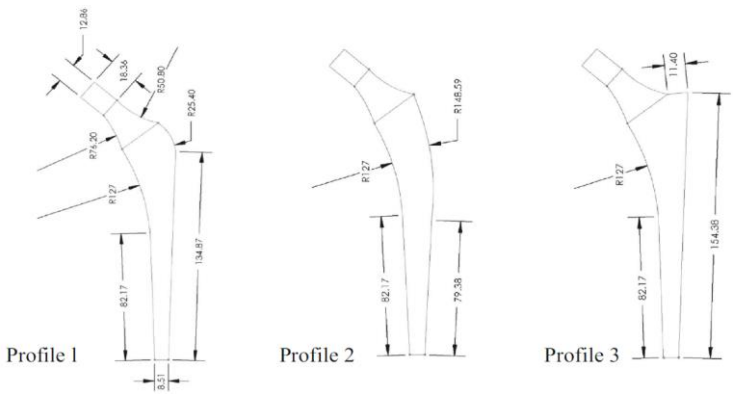
در این پژوهش، با استفاده از روش المان محدود، مدل‌های پروتز و استوانه اپوکسی و مدل استخوان و پروتز، به منظور بررسی تأثیر استفاده از پروتزهای متخلخل FGM در کاهش سپر تنشی و تقویت رشد استخوان مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. برخلاف بیشتر پژوهش‌های قبلی که پروتزهای FGM را بر اساس تخلخل آرایش توزیعی داده بودند و تعداد هندسه‌های محدودی را بررسی کرده بودند، در این پژوهش با استفاده از ۹ هندسه و مدل‌سازی و تخصیص ماده یک‌بعدی FGM به آن‌ها بر اساس مدل ریاضی این مواد، به بررسی نتایج پرداخته می‌شود. از دیگر نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به استفاده از مدل پروتز تنها و استوانه بر اساس ISO 7206-4 به منظور بررسی سفتی پروتزهای FGM و میزان نزدیک شدن هر کدام از هندسه‌ها به سفتی استخوان و همچنین تحلیل ریزحرکت‌های بین استخوان و پروتزهای با هندسه‌های مختلف در مدل استخوان و پروتز برای بررسی تقویت رشد استخوان، اشاره کرد.

همچنین از چهار مقدار ۰، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ برای اندیس کسر حجمی ماده FGM که در ادامه معرفی می‌شود، استفاده شد. شایان ذکر است که اندیس کسر حجمی برابر صفر همان ماده متراکم تیتانیومی است.

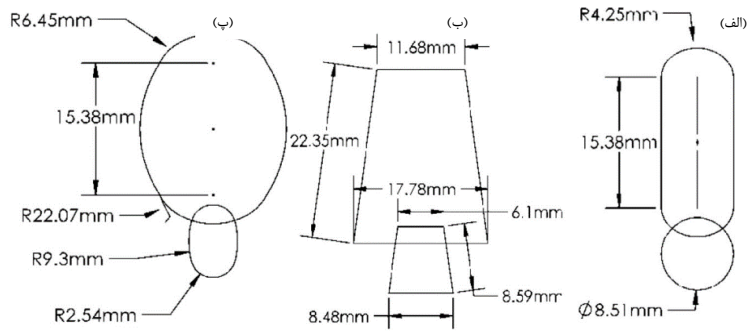
مواد و روش‌ها

پروتزهای ران انتخاب شده

سه پروفیل طراحی مطابق شکل (۳) و سه شکل دایره، بیضی و ذوزنقه برای سطح مقطع دیستال و پروگزیمال پروتز (شکل (۴))، انتخاب ما برای این پژوهش بود. پس از استخراج نقشه‌های طراحی از مقالات [13]، طراحی سه‌بعدی در نرم‌افزار Solidworks2017 انجام شد.

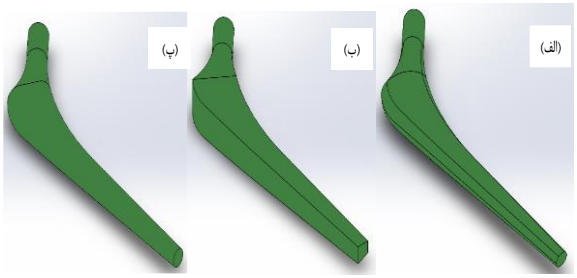


شکل ۳ پروفیل‌های انتخاب شده برای طراحی پروتزها



شکل ۴ سطح مقطع هر پروفیل از پروتزهای انتخاب شده: الف) پروگزیمال دایره‌ای و دیستال دایره‌ای، (ب) پروگزیمال ذوزنقه‌ای و دیستال ذوزنقه‌ای و (پ) دیستال بیضی پروگزیمال و بیضی

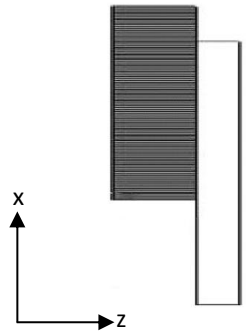
در شکل (۵) پروتزهای طراحی شده از پروفیل ۱ و هندسه-های مختلف قابل مشاهده است.



شکل ۵ هندسه‌های پروتز با پروفیل۱ با سه سطح مقطع: الف) بیضی، ب) ذوزنقه و پ) دایره

تخصیص مواد FGM دارای تخلخل به پروتز

یک مدل ساده از پروتز هیپ بدون سیمان که قبلا توسط بسیاری از محققان استفاده شده بود، در این تحلیل استفاده شد و مدل پروتز با پروفیل یک و هندسه دایره به عنوان نمونه برای نشان دادن نحوه تخصیص مواد FGM انتخاب شد. بنابراین پروتز به عنوان صفحه‌ای (در صفحه xz) از FGM با تخلخل p در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۶ شماتیک ماده FGM یک‌بعدی در صفحه xz

در شکل (۶) مدل یک‌بعدی از مواد FGM، بر روی جهت x توزیع شده است، کسر حجمی فلز (V_m) و سرامیک (V_c) و همچنین ضریب پواسون کل ماده با توجه به روابط (۱) و (۲) نشان داده شده است:

$$V_m = (y/l)^m , V_c = 1 - V_m \quad , \qquad (۱)$$

$$\upsilon = \upsilon_m V_m + \upsilon_c V_c \qquad (۲)$$

که در آن l طول کل پروتز و m یک پارامتر غیر همگن است که تغییرات ترکیب را از طریق طول کنترل می‌کند. ترکیب برای $m < 1$ از نظر فلز غنی است و برای $m > 1$ از نظر سرامیک غنی است. در این مطالعه و برای ماده FGM مدل پروتز و استوانه اپوکسی، $m = 0{,}0.1$ و برای مدل استخوان و پروتز از چهار مقدار $m = 0{,}0.1{,}0.5{,}1$ در نظر گرفته شد [14]. همچنین υ_m و υ_c ضریب پواسون دو ماده تشکیل دهنده ماده FGM است. تخلخل ماده FGM به صورت زیر بیان می‌شود [9]:

$$p = A\left(\frac{y}{l}\right)^n \left[1 - \left(\frac{y}{l}\right)^c\right] \qquad (۳)$$

که A، n و c پارامترهای دل‌خواه هستند که تخلخل را کنترل می‌کنند و مقادیر آن‌ها در این پژوهش به ترتیب ۰/۱، ۱ و ۱ خواهد بود [15]. مقادیر مجهول در رابطه پارامتر تخلخل که تخلخل را کنترل می‌کنند، از نامساوی زیر پیروی می‌کنند و بر اساس این نامساوی به دست آورده شده‌اند:

$$\frac{((n+z)/n)^n}{1-(n/(n+z))^z} \geq A \geq 0 \qquad (۴)$$

از روابط زیر برای مدول الاستیسیته استفاده می‌شود [9]:

$$E = \frac{E_0(1-p)}{1+p(5+8v)(37-8v)/\{8(1+v)(23+8v)\}} \qquad (۵)$$

که در آن E_0 برابر است با:

$$E_0 = E_c\left[\frac{E_c+(E_m-E_c)V_m^{2/3}}{E_c+(E_m-E_c)\left(V_m^{2/3}-V_m\right)}\right] \quad (۶)$$

که E_c و E_m به ترتیب مدول الاستیسیته ماده سرامیکی و فلزی پروتز است.

برای تخصیص دادن خواص ماده FGM به پروتزهای انتخاب شده و انتقال آن به نرم‌افزار تحلیل المان محدود آباکوس، نیاز به سابروتین نویسی روابط (۱) تا (۶) در زبان برنامه‌نویسی فورترن و در محیط نرم‌افزار Visual Studio 2012 بود. سابروتینی که برای این مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، سابروتین USDFLD است که برای تعریف متغیرهای میدان در یک ناحیه خاص است. از کاربردهای رایج و معروف این نوع سابروتین نویسی در آباکوس می توان به مدل‌سازی مواد FGM اشاره کرد.

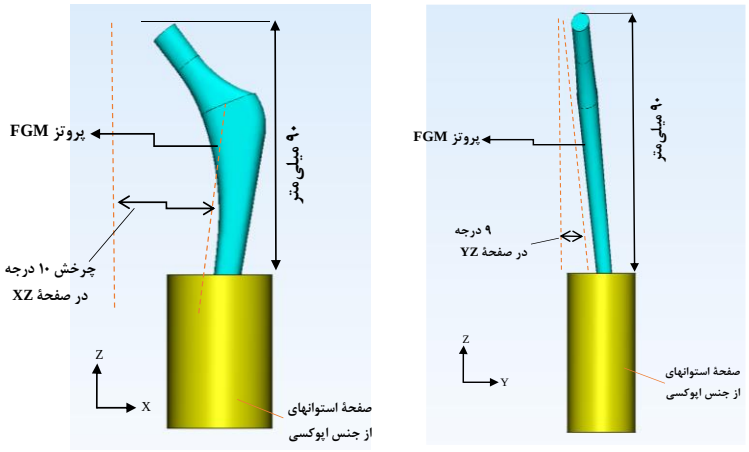
پس از کدنویسی روابط ذکر شده با استفاده از سابروتین USDFLD و زبان برنامه‌نویسی فرترن، طراحی مدل‌های سه‌بعدی پروتزها در راستای y با پروفیل‌ها و سطح مقطع‌های اشاره شده انجام شد و با وارد کردن آن‌ها به محیط نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود، طی مراحل و تنظیمات مربوط به مواد FGM و سابروتین و در پایان لینک کد نوشته شده با پسوند for به نرم‌افزار، مواد FGM به پروتزها در راستای y یا طول پروتز (از پایین به بالای پروتز) تخصیص داده شد.

مدل پروتز و استوانه براساس ISO 7206-4

همه مدل‌ها در ابتدا در مدل‌های المان محدود سه‌بعدی در ABAQUS 6.17 ادغام شدند تا عملکرد پروتزهای طراحی‌شده در مورد استخوان ران دست‌نخورده بررسی شود. تنظیمات نشان داده شده در شکل (۷) بر اساس استاندارد ISO 7206-4 است. ایزویی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، عملکرد استقامتی اجزای ساقه‌دار ران پروتزهای مفصل ران و اجزای ساقه‌دار استخوان ران را که به تنهایی در تعویض‌های جزئی مفصل ران استفاده می‌شوند، شامل می‌شود.

نظیمات در این ایزو به این صورت است که ساقه پروتز در داخل اپوکسی استوانه‌ای شکل با جهت‌گیری خاص ۹ درجه در صفحه جانبی و ۱۰ درجه در صفحه جلویی قرار گرفت که فاصله بین سر پروتز و سطح اپوکسی ۹۰ میلی‌متر است (شکل ۷).

برای تخصیص مواد پروتز، از آنجایی که مدل ما باید اعتبارسنجی می‌شد، بنابراین ابتدا از پروتز کاملا متراکم از جنس آلیاژ تیتانیوم (Ti-4Al-6V) استفاده شد ($m = 0$) تا با مدل مربوط به مقاله مرجع [16] مقایسه و اعتبارسنجی شود. همچنین از پروتز ساخته شده از پروفیل ۱ با سطح مقطع دایره برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. مدول الاستیسیته آلیاژ تیتانیوم براساس مقاله مرجع برابر ۱۱۴ گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن 0/3 و همچنین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون استوانه از جنس اپوکسی به ترتیب 3/7 گیگاپاسکال و 0/3 قرار داده شد. پس از اعتبارسنجی مدل، تخصیص مواد بر اساس جدول (۱) انجام شد و بررسی برای پروتزهای FGM ($m = 0.1$) به انجام رسید.

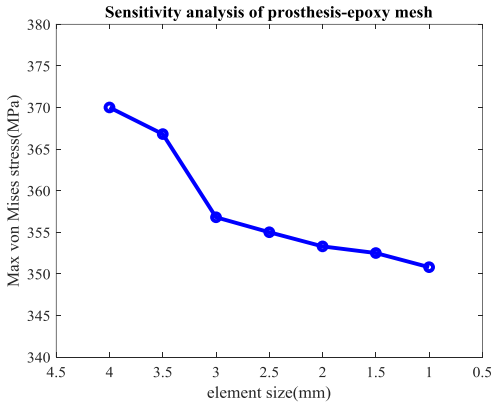


شکل ۷ جهت‌گیری پروتز در ساختار آزمایش بر اساس ISO 7206-4

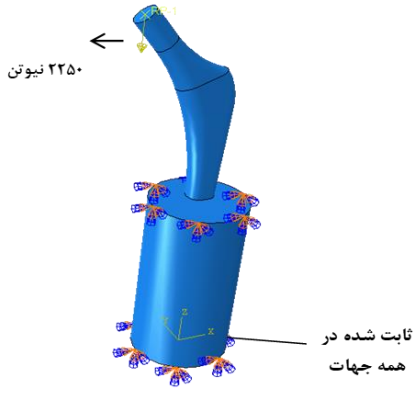
جدول ۱ خواص مکانیکی FGM

ماده	Ti-4Al-6V	Collagen
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۱۰	۱
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳۵

برای انتخاب سایز مش، نمودار حداکثر تنش فون میزس وارده بر مجموعه پروتز تیتانیومی و استوانه اپوکسی با تغییر سایز مش (از سایز مش‌های بزرگ به ریز) رسم شد. از آنجایی که برای سایز مش‌های بین ۳ تا ۴ میلی‌متر، تغییر مقادیر زیاد و قابل توجه است و از سایز مش ۳ به بعد، شیب نمودار و در نتیجه تغییرات مقادیر تنش کمتر می‌شود و می‌توان این سایز مش ۳ میلی‌متر را به عنوان مرجع انتخاب کرد (شکل۸). همچنین با توجه به پیچیده بودن هندسه‌ها و پژوهش‌های قبلی، از المان‌های چهاروجهی درجه دوم C3D10 استفاده شد.



شکل ۸ نمودار بیشترین مقدار تنش فون میزس بر حسب سایز مش در مدل پروتز تیتانیومی و استوانه اپوکسی

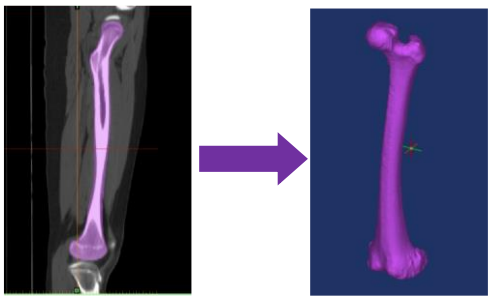


شکل ۹ شرایط مرزی و بارگذاری بر اساس ISO 7206-4

مدل پروتز و استخوان

برای مطالعه تأثیر پروتزهای FGM طراحی شده بر کاهش سپر تنشی و تقویت رشد استخوان از مدل اجزای محدود که شامل پروتز و استخوان ران همراه با بارهای فیزیولوژیکی مناسب باشد، استفاده می‌شود. به این منظور ابتدا مدل سه‌بعدی استخوان تهیه و برای تحلیل المان محدود مجموعه پروتز و استخوان بر روی آن تغییراتی ایجاد شد. مجموعه‌ای از برش‌های تصویری توموگرافی کامپیوتری دوبعدی یا سی‌تی‌اسکن از استخوان ران یک فرد ۲۸ ساله برای بازسازی سه‌بعدی ناحیه مورد نظر استفاده شد (شکل ۱۰).

در این راستا، به مانند سایر مقالات مرتبط [17]، این تصاویر به نرم‌افزار Mimics®19.0 وارد شد. در این نرم‌افزار، تصاویر پزشکی پس از انجام مراحل و تنظیمات مشخصه مانند تعیین جهت‌گیری، ایجاد ماسک و بخش‌بندی، ایجاد تغییرات ظاهری و... به یک مدل سطحی سه‌بعدی تبدیل شد.



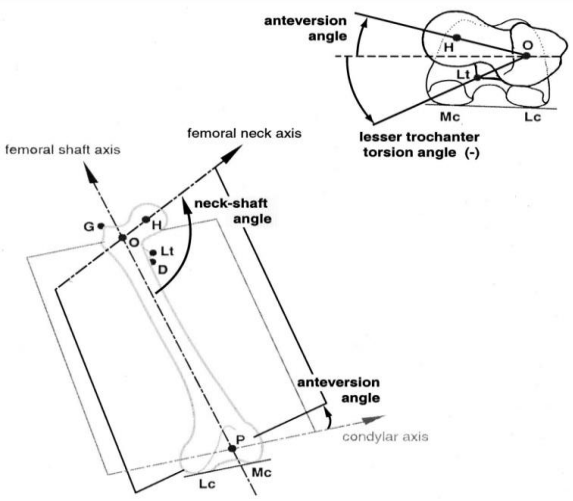
شکل ۱۰ تبدیل تصاویر پزشکی سی‌تی‌اسکن به مدل سه‌بعدی سطحی

برای تبدیل مدل سطحی به حجمی از نرم‌افزار مکمل میمیکس یعنی 3-Matic®13.0 استفاده شد. در ادامه پس از فراخوانی هر یک از پروتزها به محیط این نرم‌افزار، باید مرحله جای‌گذاری پروتز در داخل استخوان و تبدیل آن‌ها به یک مدل کامل برای تحلیل المان محدود، انجام می‌شد.

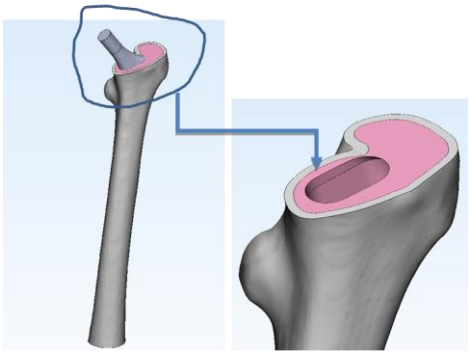
به این منظور ابتدا پروتز در مکان مناسب در داخل استخوان قرار گرفت و سپس استخوان در دو ناحیه دیستال و پروگزیمال برش داده شده و بعد از آن، محل قرارگیری پروتز در استخوان سوراخ شد (شکل ۱۲).

قابل ذکر است که استخوان به دو بخش کورتیکال (بخش قشری) و ترابکیولار (اسفنجی یا بخش داخلی‌تر) تقسیم شد و پروتز در داخل بخش اسفنجی جای‌گذاری شد. در آخر هم فرمت مناسب (.stp) برای تحلیل المان محدود در آباکوس استخراج شد. همه مراحل ذکر شده برای سایر پروتزها هم انجام شده است. بعد از فراخوانی مدل در آباکوس، اولین مرحله تخصیص مواد به

استخوان و پروتز می‌باشد.



شکل ۱۱ مشخصات هندسی استخوان بازسازی شده [18]



شکل ۱۲ جای‌گذاری پروتز در داخل استخوان

برای اعتبارسنجی مدل از جدول (۲) و (۳) برای اختصاص مواد به استخوان و پروتز استفاده می‌شود که داده‌های آن از مقاله توکل و همکارانش [19] گرفته شده است.

هر یک از بخش‌های قشری و اسفنجی استخوان [19] به عنوان یک ماده الاستیک همسان‌گرد عرضی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل (۱۳) قسمت گردن پروتز از جنس Ti-4Al-6V ($m = 0$) و قسمت ساقه پروتز هم از جنس ماده FGM ($m = 0.1,0.5,1$) است که قسمت پایینی پروتز با ماده Hydroxyapatite شروع و به بخش بالایی پروتز با ماده Ti-4Al-6V خاتمه می‌یابد. پس از تخصیص مواد، برهم‌کنش‌های بین اجزای مدل استخوان- پروتز مشخص شد؛ به این صورت که بین استخوان اسفنجی و پروتز و همچنین بین استخوان اسفنجی و قشری، لغزش محدود و تماس سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰/۴ اختصاص داده شد [19].

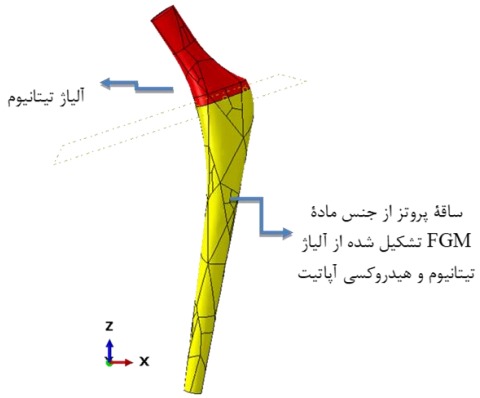
استخوان تحت پنج بار فیزیولوژیکی در نقاط RP1، RP2 و RP3 قرار گرفت. این نیروها بر اساس بارگذاری منعکس شده توسط شرایط بارگذاری فیزیولوژیکی مورد مطالعه محاسبه شدند.

جدول ۲ خواص مکانیکی استخوان در مدل اجزای محدود [19]

ماده	مدول الاستیسیته (MPa)	مدول برشی (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (g/cm^3)
بخش قشری استخوان	$E_x = 6979$ $E_y = 18132$ $E_z = 6979$	$G_{yz} = 5.6$ $G_{zx} = 4.5$ $G_{xy} = 6.2$	$v_{yz} = 0.25$ $v_{zx} = 0.4$ $v_{xy} = 0.25$	۲/۰۲
بخش اسفنجی استخوان	$E_x = 660$ $E_y = 1740$ $E_z = 660$	$G_{yz} = 0.21$ $G_{zx} = 0.16$ $G_{xy} = 0.26$	$v_{yz} = 0.25$ $v_{zx} = 0.4$ $v_{xy} = 0.25$	۱/۳۷

جدول ۳ خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده پروتز FGM [19]

ماده	Ti-4Al-6V	Hydroxyapatite
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۱۰	۱۳
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳



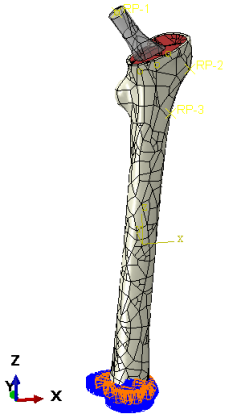
شکل ۱۳ قسمت‌های مختلف پروتز استفاده شده در آزمایش استخوان و پروتز

با توجه به جدول (۴) بارگذاری در یک سیکل راه رفتن بر روی نقاط مشخص شده در شکل (۱۴) اعمال شد و شرایط مرزی هم با محدود کردن قسمت دیستال استخوان انجام شد تا در هر جهت حرکت کند و بچرخد.

برای مش‌بندی مجموعه استخوان و پروتز مانند آزمایش پروتز و استوانه اپوکسی و همچنین پژوهش‌های قبلی به منظور انتخاب سایز مش مناسب برای همه هندسه‌های پروتز و همچنین استخوان، نمودار حداکثر تنش فون میزس مجموعه با کاهش سایز مش، رسم شد.

همان طور که از شکل (۱۵) مشهود است، از سایز مش ۳ میلی‌متر به مش‌های ریزتر، تغییرات تنش نسبت به قبل از این مقدار از سایز مش، کم شده است و شیب نمودار کاهش یافته است و از سایز مش ۳/۱ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر، جهش بزرگی در نمودار دیده می‌شود و در نتیجه با این تفاسیر، مجموعه استخوان و پروتزها (همه هندسه‌ها) با استفاده از المان‌های چهاروجهی درجه دوم C3D10 و سایز مش به اندازه ۳ میلی‌متر، مش‌بندی شدند (شکل ۱۵) که بر اساس مطالعه حساسیت انجام شده مورد استفاده قرار گرفت و همه این مراحل برای هندسه‌های مختلف پروتز ران انجام شد و نتایج تنش‌های وارده با هم مقایسه گردید.

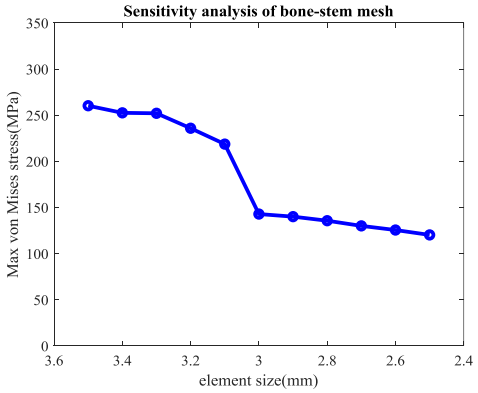
شبیه‌سازی‌های عددی در این مطالعه، مبنایی برای معرفی FGM دارای تخلخل به عنوان یک ماده مناسب برای پروتز ران از دیدگاه بیومکانیکی ارائه کرد و هدف بررسی تأثیر استفاده از این مواد برای کاهش پدیده سپر تنشی و کمک به رشد استخوان برای هندسه‌های مختلف بود که در بخش بعد به تفصیل به آن پرداخته می شود.



شکل ۱۴ شرایط مرزی و بارگذاری مدل استخوان–پروتز

جدول ۴ حداکثر نیروی تماس در سیکل راه رفتن معمولی

منبع اصلی اعمال نیرو	نیرو و جهت‌های اعمال (N)			اعمال بر روی نقطه
	x	y	z	
Hip contact	−۳۷۸	−۲۲۹/۶	۱۶۰۴/۴	RP1
Abductor	۴۰۶	۳۰/۱	۶۰۵/۵	RP2
Tensor fascia lata, proximal part	۵۰/۴	۸۱/۲	۹۲/۴	RP2
Tensor fascia lata, distal part	−۳/۵	−۴/۹	−۱۳۳	RP2
Vastus lateralis	−۶/۳	۱۲۹/۵	−۶۵۰/۳	RP3



شکل ۱۵ نمودار بیشترین مقدار تنش فون میزس بر حسب سایز مش در مدل استخوان و پروتز

تخصیص مواد FGM به پروتز

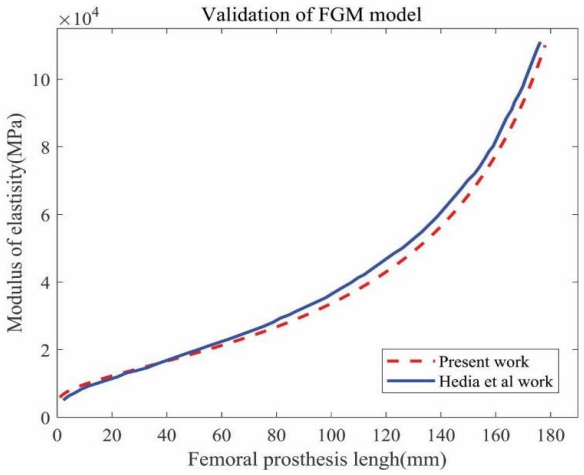
برای اطمینان از صحت ماده FGM اختصاص یافته به پروتز، اعتبارسنجی با یکی از مقالات مرجع انجام شد [9] که در شکل (۱۷) آورده شده است. به این منظور برای ماده FGM انتخاب

شده، از دو ماده با مدول الاستیسیته ۱۱۰ و ۱ گیگاپاسکال و $m = 0.1$ استفاده شده است.

همان طور که در شکل (۱۶) قابل مشاهده است، بدیهی است که هر دو نمودار مدول الاستیسیته- طول پروتز، در مدل‌سازی انجام شده و مدل هدیا و همکارانش [9]، بسیار نزدیک به یکدیگر هستند و تطابق قوی نشان می‌دهند. اندک اختلاف به وجود آمده به دلیل خطا در نمونه‌برداری مقاله مرجع و همچنین برابر نبودن طول دو پروتز مورد بررسی بود. بنابراین، مدل پروتز با ماده اختصاص یافته FGM، با موفقیت تأیید شده و برای تحلیل المان محدود برای مدل‌ها و همچنین هندسه‌های پروتز، استفاده می‌شود.



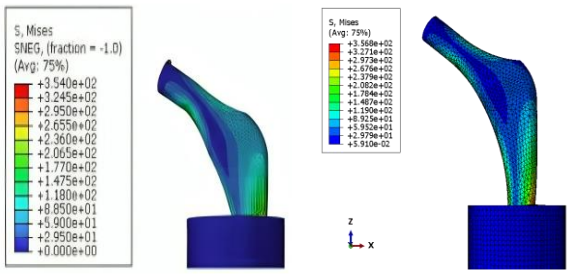
شکل ۱۶ نمایی کامل از استخوان شبکه‌بندی شده با المان‌های C3D10



شکل ۱۷ نمودار تغییرات مدول الاستیسیته پروتز در طول پروتز برای مدل‌سازی انجام‌شده و مرجع [9]

اعتبارسنجی مدل پروتز و استوانه

برای اعتبارسنجی از نمودار تنش فون میزس وارده بر مجموعه پروتز و استوانه پروکسی استفاده شد که در آن بیشترین مقدار تنش در پروتز بدون تخلخل برابر ۳۵۴ مگاپاسکال بود و حداکثر مقدار تنشی که از تحلیل المان محدود به دست آمد، با توجه به شکل (۱۸)، ۳۵۶/۸ مگاپاسکال است که اختلاف کمتر از ۵ درصد دارد و از آنجایی که مدل انتخاب شده در مطالعه الزوبی و همکارانش [16] با مدل این مقاله متفاوت بود، می‌توان نتایج را قابل قبول دانست.



شکل ۱۸ توزیع تنش در پروتز ران در مدل پروفیل ۱ سطح مقطع دایره (پژوهش حاضر، سمت راست) و مدل الزوبی و همکارانش [16] (سمت چپ) به دست آمده از آزمایش پروتز و استوانه اپوکسی

نتایج به دست آمده از آزمایش پروتز و استوانه اپوکسی

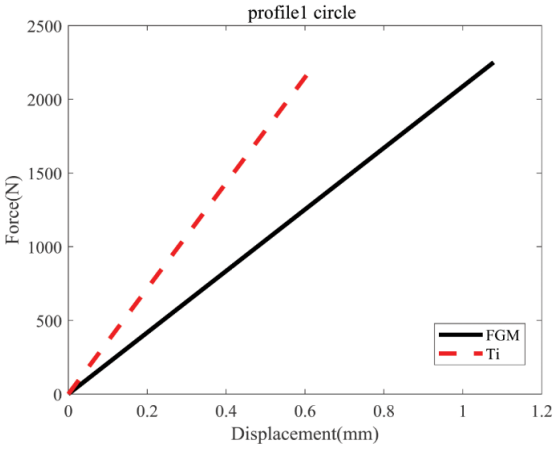
جابه‌جایی کل در سر پروتز ران برای همه طرح‌های پروتزهای FGM و همچنین پروتز متراکم از جنس آلیاژ تیتانیوم در هر افزایش/گام بارگذاری اندازه‌گیری شد. نمودارهای نیرو- جابه‌جایی برای همه پروتزها با دو ماده همگن تیتانیوم و FGM در مدل اپوکسی ترسیم شد و همان طور که در نمودارهای شکل (۱۹) نشان داده شده است، به عنوان نمونه برای پروتزهای پروفیل ۱ قابل مشاهده است. مشهود است که ساختار FGM و وجود تخلخل حجمی، سفتی (شیب نمودار نیرو- جابه‌جایی) پروتزهای توزیع شده تابعی را کاهش داده است که با یافته مطالعه الزوبی و همکاران [16] مطابقت دارد؛ به این معنی که با افزایش نیرو تا ۲۲۵۰ نیوتن، همه هندسه‌های پروتز FGM ($m = 0.1$) جابه‌جایی بیشتری را در مقایسه با پروتز همگن دارد و در نتیجه سفتی هم کاهش می‌یابد و به سفتی استخوان نزدیک می‌شود و این همان چیزی است که مد نظر ما بوده است.

از این رو، مدل‌های پیشنهادی به هدف کاهش سفتی پروتزهای استخوان ران به طور قابل توجهی دست یافتند تا حد امکان به خواص استخوان ران دست‌نخورده نزدیک شوند که منجر به کاهش قابل توجهی از سپر تنشی در مقایسه با آلیاژ تیتانیم متراکم شد. جدول (۵) سفتی به دست آمده از نمودارهای نیرو- جابه‌جایی را برای پروتزها با درصد کاهش سختی نسبت به پروتز

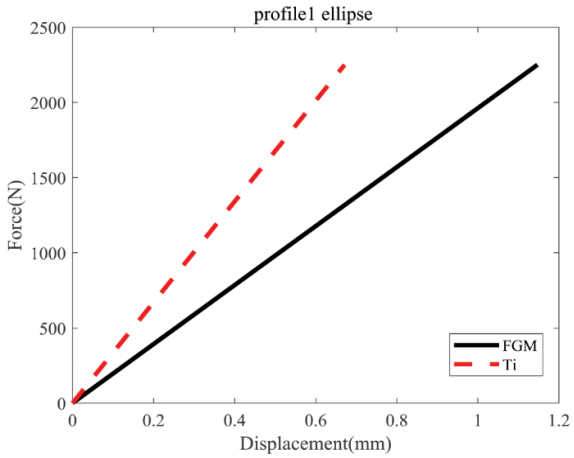
آلیاژ متراکم Ti-4Al-6V (میانگین همه مدل‌های پروتز) خلاصه می‌کند که در این جدول سفتی با تقسیم بیشترین نیروی وارد بر پروتز (۲۲۵۰ نیوتون) بر بیشترین جابه‌جایی ایجادشده برای هر پروتز محاسبه شده است و کاهش سفتی پروتزهای FGM در مقایسه با پروتز همگن تیتانیومی مشخص شده است.

با مشاهده مقادیر مربوط به درصد کاهش سفتی، می‌توان تأثیر استفاده از پروتز FGM را به جای پروتز همگن به منظور نزدیک شدن به خواص مکانیکی استخوان نتیجه گرفت.

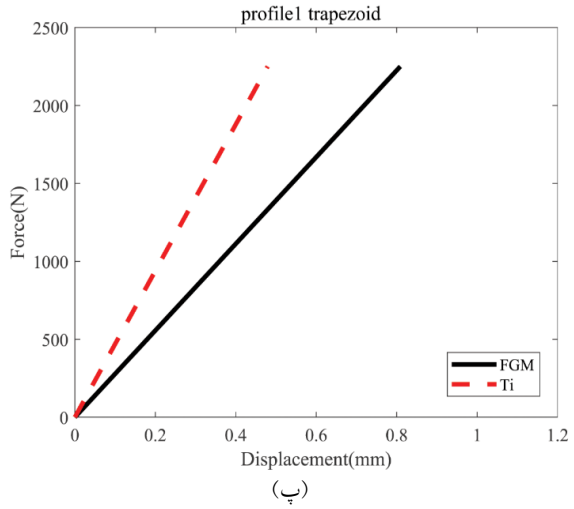
همچنین از شکل (۲۰) که نمودار نیرو- جابه‌جایی همه هندسه‌های FGM با استخوان [20] مقایسه شده است، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین کاهش سفتی یعنی بیشترین نزدیکی به سفتی استخوان، مربوط به پروفیل ۳ با سطح مقطع بیضی و کمترین کاهش برای پروفیل ۲ با سطح مقطع ذوزنقه نتیجه شده است. بنابراین پروتز ساخته شده از پروفیل ۳ با سطح مقطع بیضی، بیشتر از سایر مدل‌ها، از سپر تنشی جلوگیری می‌کند.



(الف)

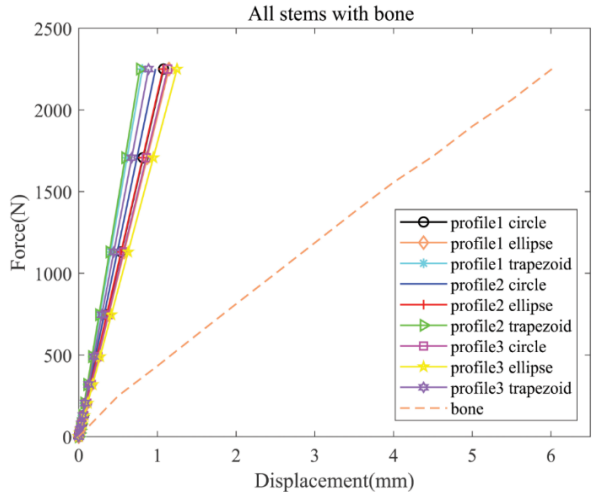


(ب)



(پ)

شکل ۱۹ نمودار نیرو- جابه‌جایی در پروتزهای پروفیل ۱ با سطح مقطع-های: الف) دایره، ب) بیضی و پ) ذوزنقه برای $m = 0$ (Ti) و $m = 0.1$ (FGM)



شکل ۲۰ نمودار نیرو- جابه‌جایی برای طراحی‌های مختلف پروتز FGM همراه با استخوان سالم

اعتبارسنجی مدل استخوان و پروتز

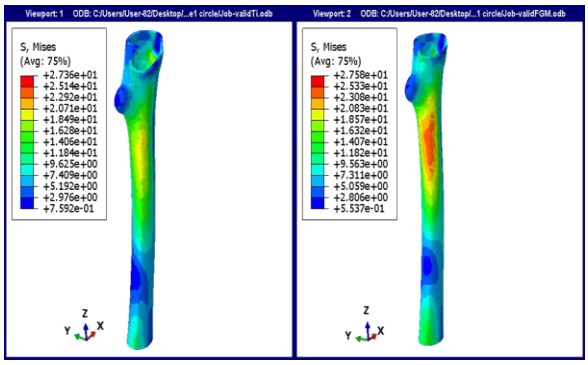
مدل‌های المان محدود پروتز قرار داده شده در استخوان با استفاده از نرم‌افزار تحلیل المان محدود ABAQUS با مدل توکل و همکارانش [19] مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. به این صورت که با توجه به مقاله مرجع، مجموعه استخوان و پروتز تحت بارگذاری نقطه‌ای در دو نقطه قرار گرفت و توزیع و مقادیر تنش فون میزس در استخوان با مقاله مرجع مقایسه شد که در این تحلیل المان محدود، از دو مدل با ماده همگن تیتانیومی و ترکیبی

از این ماده (گردن پروتز با $m = 0$ و FGM (ساقه پروتز با $m = 0.1$) برای پروتز استفاده شد و این دو حالت با هم مقایسه شدند.

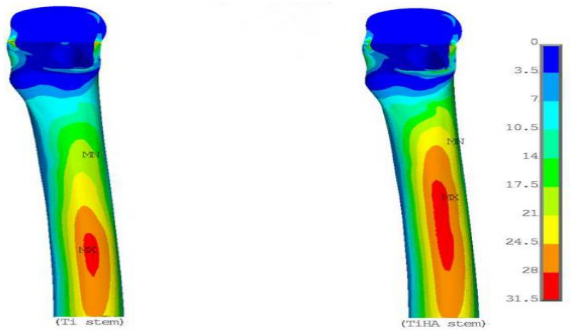
جدول ۵ درصد کاهش سفتی حاصل از استفاده از پروتز FGM در مقایسه با پروتز آلیاژی متراکم Ti-4Al-6V

مدل طراحی شده پروتز	سفتی (N/mm)	سفتی میانگین (N/mm)	کاهش سفتی نسبت به مدل همگن تیتانیومی (%)
Profile1 Circle	۲۰۸۷/۵۵	۲۲۷۶/۹۲	۴۰/۱
Profile1 Ellipse	۱۹۶۱/۹۸		
Profile1 Trapezoid	۲۷۸۱/۲۳		
Profile2 Circle	۲۳۰۷/۴۵	۲۴۳۳/۷۷	۳۶/۸
Profile2 Ellipse	۲۰۹۹/۷۰		
Profile2 Trapezoid	۲۸۹۴/۱۵		
Profile3 Circle	۱۹۸۹/۶۴	۲۱۰۹/۳۹	۴۵/۲
Profile3 Ellipse	۱۸۰۱/۸۰		
Profile3 Trapezoid	۲۵۳۶/۷۴		
Average of bulks(Ti) stems	۳۸۵۱/۲۸		

از شکل (۲۱) و مقایسه مقادیر تنش فون مایزس در حالت استفاده از ماده تیتانیومی کامل و مدل با ساقه FGM (تشکیل شده از دو ماده تیتانیوم و هیدروکسی آپاتیت با $m = 0.1$) و مقایسه آن با مقاله [19]، می‌توان مشاهده کرد که مقادیر تنش در هر دو حالت اختلاف قابل قبولی دارد و مقادیر به هم نزدیک هستند که دلیل این اختلاف کم هم، تفاوت هندسه و مشخص نبودن برخی شرایط دو مطالعه بوده است. بیشترین مقدار تنش فون میزس در حالت استفاده از پروتز همگن تیتانیومی در مقاله مرجع برابر ۲۸/۷ مگاپاسکال است که در مدل حاضر برابر ۲۷/۴ مگاپاسکال به دست آمده است و برای پروتز با گردن تیتانیومی و ساقه FGM برابر ۲۸/۹ مگاپاسکال است در حالی که برای مدل حاضر، مقدار ۲۷/۶ مگاپاسکال به دست آمد و این اختلاف با توجه به تفاوت‌هایی که دو مطالعه با هم دارند، مشکلی برای اعتبارسنجی مدل ما ایجاد نمی‌کند. به این ترتیب مدل مورد استفاده اعتبارسنجی شده و برای سایر هندسه‌ها و بررسی نتایج از آن استفاده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۲۱ توزیع تنش فون میزس در استخوان قشری برای پروتز همگن Ti6Al4V (سمت چپ) و پروتز FGM، Ti6Al4V-HA (راست) برای الف) مدل حاضر و ب) مدل توکل و همکاران [19]

نتایج

تنش فون میزس در استخوان و پروتز

تنش‌ها در هر لایه پروتز و همچنین استخوان از طریق نتایج تجزیه و تحلیل اجزا محدود برای ۹ هندسه پروتز متراکم و FGM برای مقادیر اندیس کسر حجمی $m = 0,0.1,0.5,1$ در یک سیکل راه رفتن عادی محاسبه شد. همان طور که در جدول (۶) نشان داده شده است، برای ماده FGM با اندیس $m = 0.1$ پروتزهای با سطح مقطع دایره بیشترین درصد کاهش میانگین تنش را نسبت به مدل متراکم تیتانیومی ($m = 0$) دارند و کمترین درصد کاهش میانگین تنش هم در پروتزهای با سطح مقطع ذوزنقه دیده می‌شود.

جدول ۶ حداکثر مقادیر تنش فون میزس (MPa) در پروتزها برای مقادیر $m = 0,0.1$ کسر حجمی

مدل طراحی شده پروتز	حداکثر مقادیر تنش ماده تشکیل‌دهنده پروتز	
	$m = 0$	$m = 0.1$
Profile1 Circle	۱۷۸/۹۲	۱۶۲/۳۵
Profile1 Ellipse	۱۶۹/۴۳	۱۵۴/۱۶
Profile1 Trapezoid	۱۵۵/۸۶	۱۴۱/۹۲
Profile2 Circle	۱۶۸/۸۲	۱۵۴/۱۵
Profile2 Ellipse	۱۶۴/۶۲	۱۵۰/۱۵
Profile2 Trapezoid	۱۵۶/۴۲	۱۴۲/۸۵
Profile3 Circle	۱۷۷/۳۲	۱۶۱/۱۵
Profile3 Ellipse	۱۶۸/۷۲	۱۵۴/۰۵
Profile3 Trapezoid	۱۵۳/۲۲	۱۳۹/۹۵

به مانند پروتز، استخوان (جدول ۷) با پروتزهای FGM $(m = 0.1)$ با سطح مقطع دایره بیشترین درصد افزایش میانگین تنش را نسبت به مدل متراکم $(m = 0)$ تیتانیومی دارند و کمترین درصد افزایش در پروتزهای با سطح مقطع ذوزنقه دیده می‌شود.

همان طور که در جدول (۸) نشان داده شده است، برای ماده FGM با اندیس $m = 0.5,1$ به مانند $m = 0.1$ پروتزهای با سطح مقطع دایره بیشترین درصد کاهش میانگین تنش را نسبت به مدل متراکم تیتانیومی دارند و کمترین درصد کاهش میانگین تنش هم در پروتزهای با سطح مقطع ذوزنقه دیده می‌شود.

جدول ۷ حداکثر مقادیر تنش فون میزس (MPa) در استخوان برای مقادیر $m = 0,0.1$ کسر حجمی

مدل طراحی‌شده پروتز	حداکثر مقادیر تنش ماده تشکیل‌دهنده پروتز	
	$m = 0$	$m = 0.1$
Profile1 Circle	۲۳/۹۷	۲۸/۶۸
Profile1 Ellipse	۲۱/۷۳	۲۶/۴۶
Profile1 Trapezoid	۱۹/۸۱	۲۴/۱۸
Profile2 Circle	۲۲/۹۱	۲۸/۲۱
Profile2 Ellipse	۲۱/۷۷	۲۶/۳۸
Profile2 Trapezoid	۲۱/۱۶	۲۵/۲۳
Profile3 Circle	۲۲/۴۹	۲۷/۵۳
Profile3 Ellipse	۲۱/۵۶	۲۶/۴۷
Profile3 Trapezoid	۲۰/۸۲	۲۴/۶۱

جدول ۸ حداکثر مقادیر تنش فون میزس (MPa) در پروتزها برای مقادیر $m = 0.5,1$ کسر حجمی

مدل طراحی‌شده پروتز	حداکثر مقادیر تنش ماده تشکیل‌دهنده پروتز	
	$m = 0.5$	$m = 1$
Profile1 Circle	۹۲/۸۲	۵۵/۶۳
Profile1 Ellipse	۸۷/۴۲	۵۱/۷۱
Profile1 Trapezoid	۷۹/۴۳	۳۸/۹۱
Profile2 Circle	۸۶/۸۹	۴۱/۱۶
Profile2 Ellipse	۸۴/۹۲	۳۹/۶۷
Profile2 Trapezoid	۸۱/۴۲	۳۶/۵۴
Profile3 Circle	۹۲/۷۶	۴۳/۵۱
Profile3 Ellipse	۸۶/۲۷	۴۱/۰۶
Profile3 Trapezoid	۸۱/۳۶	۳۷/۸۴

برای استخوان (جدول ۹) با پروتزهای FGM $(m = 0.5,1)$ با سطح مقطع دایره بیشترین درصد افزایش میانگین تنش را نسبت به مدل متراکم تیتانیومی دارند و کمترین درصد افزایش در پروتزهای با سطح مقطع ذوزنقه دیده می‌شود.

همچنین از مقادیر به دست آمده از تنش‌های وارد به پروتز و استخوان برای اندیس‌های مختلف (شکل‌های ۲۱ و ۲۲) می‌توان این نتیجه را گرفت که هر چه اندیس کسر حجمی ماده FGM بزرگ‌تر باشد، مقادیر تنش نیز نسبت به تنش‌های وارد به پروتز با ماده متراکم تیتانیومی، هم در پروتز و هم در استخوان، کاهش می‌یابد و بنابراین انتخاب کسر حجمی مناسب برای ماده FGM بسیار مهم است؛ چرا که هدف اصلی در استفاده از این مواد، کاهش تنش وارد به پروتز و افزایش تنش وارد به استخوان است و باید مقادیر متناسب باشند و از نظر استحکام و دوام مکانیکی برای پروتز اشکال به وجود نیاید و تنش وارد به استخوان نیز به حد کافی باشد که باعث رشد استخوان شود و از پدیده سپر تنشی جلوگیری شود.

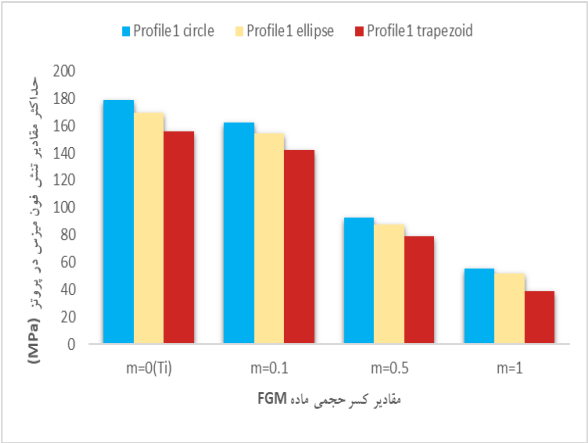
در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) به ترتیب نمودار تغییرات حداکثر مقدار تنش فون میزس در پروتز و استخوان نشان داده شده است که برای نمونه برای پروتزهای با پروفیل ۱ در این مقاله آورده شده است.

در نتیجه در همه پروتزها با استفاده از ماده FGM دارای تخلخل و با اندیس‌های کسر حجمی $m = 0.1,0.5,1$، تنش وارد

به پروتز نسبت به ماده متراکم تیتانیومی کاهش و به استخوان افزایش پیدا کرده است و این مقادیر به تفاوت در طراحی هر پروتز، پروفیل، سطح مقطع‌های متفاوت و اندیس ماده FGM، نسبت داده می‌شود.

جدول ۹ حداکثر مقادیر تنش فون میزس (MPa) در استخوان برای مقادیر m = 0.5,1 کسر حجمی

مدل طراحی شده پروتز	حداکثر مقادیر تنش ماده تشکیل دهنده پروتز	
	m = 0.5	m = 1
Profile1 Circle	۱۳/۴۴	۹/۴۱
Profile1 Ellipse	۱۲/۲۳	۸/۴۶
Profile1 Trapezoid	۱۰/۸۳	۵/۸۴
Profile2 Circle	۱۲/۶۴	۶/۸۹
Profile2 Ellipse	۱۱/۷۶	۶/۴۳
Profile2 Trapezoid	۱۱/۳۴	۶/۱۲
Profile3 Circle	۱۳/۲۷	۷/۰۶
Profile3 Ellipse	۱۲/۰۶	۶/۸۷
Profile3 Trapezoid	۱۱/۲۹	۵/۹۶

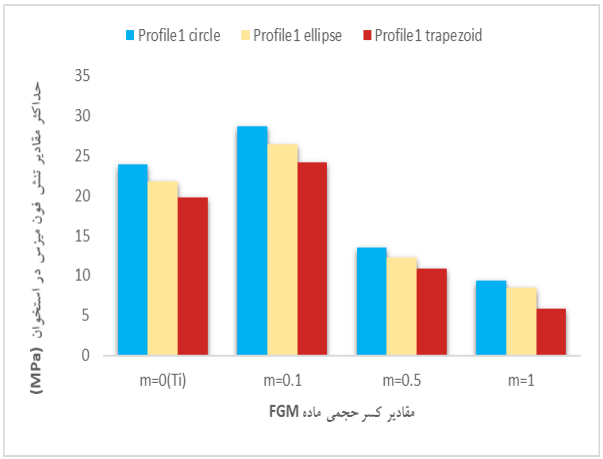


شکل ۲۲ نمودار تغییرات حداکثر مقدار تنش فون میزس بر حسب مقادیر کسر حجمی ماده FGM در پروتزهای پروفیل ۱

ریز حرکت در سطح مشترک استخوان و پروتز

با توجه به اینکه در نرم‌افزار آباکوس نتایج ریزحرکت به صورت CSLIP در بخش نتایج این نرم‌افزار قابل بررسی و CSLIP1 و CSLIP2 تحلیل است. از آنجایی که نتایج به دو صورت [12] نمایش داده می‌شود، با توجه به مقاله مرجع CSLIP2 برای بررسی ریزحرکت استفاده کرده است و CSLIP2 که از

همچنین با توجه به راهنمای نرم‌افزار، ما هم از آن برای بررسی نتایج ریزحرکت‌های بین استخوان و پروتزهای FGM (m = از آنجایی که ریزحرکت‌های بیشتر از) استفاده کردیم. 0.1 ۱۵۰ میکرومتر، بیش از حد در نظر گرفته می‌شود و باعث ناپایداری پروتز و شکست عمل جراحی می‌شود. همان طور که در شکل (۲۴) قابل مشاهده است، نمودار ریزحرکت (برحسب میکرومتر) بر حسب هندسه‌های مختلف پروتز آورده شده است و با توجه به نکته گفته شده، پروتزهای با هندسه پروفیل دو و سه- سطح مقطع ذوزنقه از مقدار مجاز عبور کرده‌اند و نباید مورد استفاده بیمار قرار گیرند و ریسک بالای آسیب را دارند و این طرح‌ها ممکن است منجر به شکست زودرس پروتز شود. همچنین در شکل (۲۵) نمایش گرافیکی ریز حرکت در فصل مشترک استخوان و پروتز متخلخل FGM(پروفیل یک-سطح مقطع دایره) برای دو ماده و آلیاژ تیتانیومی متراکم به عنوان یک نمونه آورده شده است.

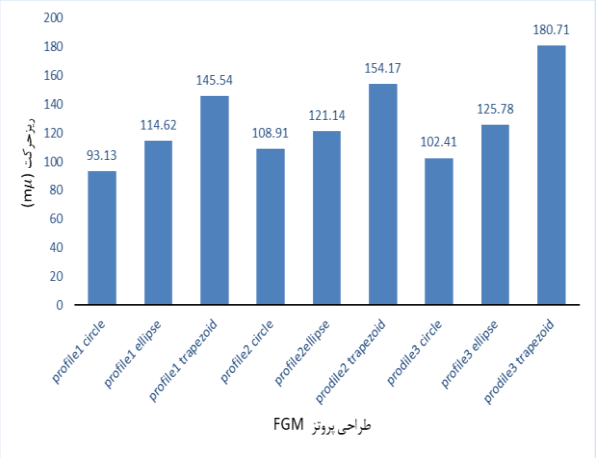


شکل ۲۳ نمودار تغییرات حداکثر مقدار تنش فون میزس در استخوان بر حسب مقادیر کسر حجمی ماده FGM برای پروتزهای پروفیل ۱

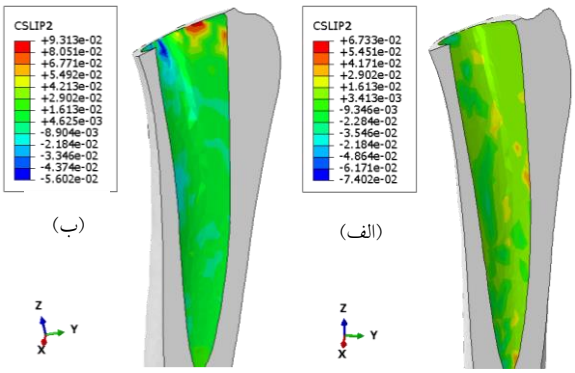
بیشترین مقدار ریزحرکت برای پروتز تیتانیومی کمتر از پروتز FGM متخلخل است که می‌توان نتیجه گرفت که کم‌ترین ریزحرکت‌های پروتز و استخوان به بیشترین سفتی پروتز که مربوط به آلیاژ متراکم تیتانیومی است، تعلق دارد که این یافته‌ها با مطالعات قبلی مطابقت دارد [16,21,22]. نکته دیگری که از این شکل شماتیک نتیجه می‌شود، این است که با توجه به نتایج، در طراحی پروتز برای THR، از نظر سفتی پروتز، پروتزهای منعطف

سپر تنشی کمتری را در استخوان اطراف ایجاد می‌کنند اما ریزحرکت بیشتری دارند و در مقابل، پروتزهای سفت و سخت سپر تنشی بالا، اما ریزحرکت‌های کمتری را القا می‌کنند.

بنابراین، چالش طراحی این اســت که بدانیم چگونه محافظ تنش را به حداقل برســانیم در حالی که ریزحرکت‌های رابط را در سطوح قابل قبول حفظ کنیم و از حد مجاز عبور نکنند.



شکل ۲۴ حداکثر مقدار ریزحرکت در فصل مشترک پروتز و استخوان ران برای هندسه‌های مختلف پروتز FGM



شکل ۲۵ نمایش گرافیکی ریز حرکت در فصل مشترک استخوان و پروتز (پروفیل یک- سطح مقطع دایره) برای پروتز با ماده: الف) آلیاژ تیتانیومی متراکم، ب) FGM

بحث و نتیجه‌گیری

از آنجایی که FGM ها از مواد جدید هستند هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر استفاده از FGM ها به جای مواد متراکم در کاهش پدیده سپر تنشی و تقویت رشد استخوان در پروتزهای ران بود.

در مدل پروتز- استوانه مشاهده شد که با استفاده از ماده FGM به جای ماده متراکم تیتانیومی، می‌توان سفتی پروتز را به سفتی استخوان نزدیک کرد و از آنجایی که پدیده سپر تنشی به دلیل عدم مطابقت و نزدیکی سفتی ایجاد می‌شود؛ بنابراین سپر تنشی هم کاهش یافته است.

برای بررسی پدیده سپر تنشی و همچنین تقویت رشد استخوان، از نتایج حاصل از تنش‌های فون میزس وارده به استخوان و پروتز استفاده شد. افزایش مقادیر تنش در استخوان در استفاده از پروتز FGM نشان می‌دهد که تنش‌های کمتری به پروتز نسبت به حالت متراکم وارد شده است و باقی‌مانده تنش به استخوان وارد شده است که سبب کاهش پدیده سپر تنشی می‌شود با افزایش تنش، فعالیت استخوان افزایش، چگالی آن افزایش و در نتیجه استخوان تقویت و رشد می‌یابد که در همه پروتزها این نتایج مشاهده شد.

همچنین با بررسی اندیس‌های مختلف ماده FGM و بررسی نتایج تنش‌های به دست آمده از مدل استخوان و پروتز، به این نتیجه رسیدیم که هر چه اندیس کسر حجمی ماده FGM بزرگ‌تر باشد، مقادیر تنش در پروتز و استخوان نسبت به تنش‌های وارد به مجموعه پروتز و استخوان در حالت استفاده از پروتز با ماده متراکم تیتانیوم، کاهش می‌یابد و بنابراین مقادیر اندیس کسر حجمی برای ماده FGM بسیار تأثیرگذار است و باید مورد توجه و بررسی بیشتر برای رسیدن به اندیس مناسب، قرار گیرد.

همچنین از مقادیر به دست آمده از تنش‌های وارد به پروتز و استخوان برای اندیس‌های مختلف (شکل‌های ۲۱ و ۲۲) می‌توان این نتیجه را گرفت که هر چه اندیس کسر حجمی ماده FGM بزرگ‌تر باشد، مقادیر تنش نیز نسبت به تنش‌های وارد به پروتز با ماده متراکم تیتانیومی، هم در پروتز و هم در استخوان، کاهش می‌یابد و بنابراین انتخاب کسر حجمی مناسب برای ماده FGM بسیار مهم است.

از نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی، ریزحرکت‌های ایجاد شده بین پروتزها به دست آمد و به جز دو مدل از پروتزها (پروتزهای با هندسه پروفیل دو و سه- سطح مقطع ذوزنقه) که مقادیر بالاتر از ۱۵۰ میکرومتر داشتند، بقیه مقادیر در محدوده قابل قبول بودند و ریزحرکت‌های ایجاد شده منجر به ایجاد مشکلات احتمالی برای پروتز نشدند و به رشد استخوان کمک کردند.

موارد زیر از جمله پیشنهاداتی است که می‌توان در ادامه این پژوهش انجام داد:

۱. استفاده از تئوری‌های بازسازی استخوان.
۲. بررسی استفاده از مواد FGM در تقویت رشد و چگالی استخوان.
۳. انجام تست‌های تجربی برای اعتبارسنجی نتایج.
۴. انجام تست خستگی بر روی هند سه‌های انتخاب شده و به دست‌آوردن خواص مکانیکی آن مانند تنش تسلیم و حد استقامت.

واژه‌نامه

تحلیل	Analysis
متخلخل	Porous
تعویض	Replacement
تنش	Stress
بازسازی	Remodeling
رشد	Growth
سپر	Shield
کدنویسی	Coding
تابعی	Functionally
مفصل ران	Hip
طراحی	Design
پروتز	Prosthesis
توزیع شده	Graded
ریزحرکت	Micromotion

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] D. Garrison, "Osteoarthritis, osteoporosis, and exercise," *Workplace Health & Safety*, vol. 60, no. 9, pp. 381-383, (2012).

[2] P. Kannus, J. Parkkari, H. Sievänen, A. Heinonen, I. Vuori, M. Järvinen, "Epidemiology of hip fractures," *Bone*, vol. 18, no. 1, pp. S57-S63, (1996).

[3] C. O. Yenusah, "Finite Element Study on the Influence of Bone-Implant Interface Condition on Femoral Fracture after Cementless Total Hip Replacement," *Mississippi State University*, pp, 6-7, (2017).

[4] A. Eshra, *An experimental set up to investigate non-invasive detection of hip prosthesis loosening*, (2004).

[5] S. Arabnejad, B. Johnston, M. Tanzer, D. Pasini, "Fully porous 3^D printed titanium femoral stem to reduce stress-shielding following total hip arthroplasty," *Journal Orthop Research*, vol. 35, no. 8, pp. 1774-1783, (2017).

[6] Y. Wang, S. Arabnejad, M. Tanzer, D. Pasini, "Hip Implant Design With Three-Dimensional Porous Architecture of Optimized Graded Density," *Journal of Mechanical Design*, vol. 140, no. 11, pp. , (2018).

[7] M. Rezaee, N. Sharafkhani, A. Ch. Khoei, "Electrostatically Actuated FGM Microgripper under the Effect of Thermal Moment," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 23, no. 2, pp. 65-80, (2012).

[8] A. A. Oshkour, N. A. Osman, M. Bayat, R. Afshar, F. Berto, "Three-dimensional finite element analyses of functionally graded femoral prostheses with different geometrical configurations," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, no. pp. 998-1008, (2014).

[9] H. S. Hedia, M. A. N. Shabara, T. T. El-Midany, N. Fouda, "A method of material optimization of cementless stem through functionally graded material," *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, vol. 1, no. pp. 329-346, (2004).

[10] H. Mehboob, F. Tarlochan, A. Mehboob, S-H. Chang, S. Ramesh, W. S. W. Harun, K. Kadirgama, "A novel design, analysis and 3D printing of Ti-6Al-4V alloy bio-inspired porous femoral stem," *Journal of Materials Science:*

Materials in Medicine, vol. 31, no. pp. 1-14, (2020).

[11] F. Tarlochan, H. Mehboob, A. Mehboob, S-H. Chang, "Influence of functionally graded pores on bone ingrowth in cementless hip prosthesis: a finite element study using mechano-regulatory algorithm," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 17, no. 3, pp. 701-716, (2018).

[11] N. F. Al Zoubi, F. Tarlochan, H. Mehboob, F. Jarrar, "Design of Titanium Alloy Femoral Stem Cellular Structure for Stress Shielding and Stem Stability: Computational Analysis," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, p. 1548, (2022).

[13] A. L. Sabatini, T. Goswami, "Hip implants VII: Finite element analysis and optimization of cross-sections," *Materials & Design*, vol. 29, no. 7, pp. 1438-1446, (2008).

[14] H. Gong, L. Kong, R. Zhang, J. Fang, M. Zhao, "A Femur-Implant Model for the Prediction of Bone Remodeling Behavior Induced by Cementless Stem," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 350-358, (2013).

[15] T. A. Enab, "Performance improvement of total knee replacement joint through bidirectional functionally graded material," *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* IJMME-IJENS, vol. 14, no. 2, pp. 104-113, (2014).

[16] N. AL Zoubi, N. F. Khaled, "Design of fully porous functionally graded TI-6AL-4V femoral stem for stress shielding and implants stability," *Qatar University*, vol. no. pp.51-73, (2022).

[17] D. Tarzjani, M. A. Nazari, M. Mahjoub, "Investigating the effect of tibia bone heterogeneity on natural frequency using modal test and finite element modeling," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 77-96, (2023).

[18] A. S. Arnold, S. S. Blemker, S. L. Delp, "Evaluation of a deformable musculoskeletal model for estimating muscle–tendon lengths during crouch gait," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 29, no. pp. 263-274, (2001).

[19] T. A. Enab, N. Fouda, I. Eldesouky, "Comparison of Functionally Graded Hip Stem Implants with Various Second-Generation Titanium Alloys," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 7, no.3, pp. 1315-1323, (2020).

[20] K. Hazlehurst, C. J. Wang, M. Stanford, "Evaluation of the stiffness characteristics of square pore CoCrMo cellular structures manufactured using laser melting technology for potential orthopaedic applications," *Materials & Design*, vol. 51, pp. 949-955, (2013).

[21] S. Limmahakhun, A. Oloyede, K. Sitthiseripratip, Y. Xiao, C. Yan, "Stiffness and strength tailoring of cobalt chromium graded cellular structures for stress-shielding reduction," *Materials & Design*, vol. 114, pp. 633-641, (2017).

[22] S. E. Alkhatib, F. Tarlochan, H. Mehboob, R. Singh, K. Kadirgama, W. S. B. W. Harun, "Finite element study of functionally graded porous femoral stems incorporating body- centered cubic structure," *Artificial Organs*, vol. 43, no. 7, pp. E152-E164, (2019).

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 3, 2024. (69-92)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

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

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Numerical Study of the Effect of Non-Uniform Magnetic Field on Ferrofluid Heat Transfer in a Channel with Double Forward-Facing Steps*

Research Article

Hamid-Reza Bahrami[1], Mahziyar Ghaedi[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.85877.1228

Abstract *Nowadays, liquid cooling channels are used for cooling of electronic equipment. These channels have to change the cross-section to pass over elements, so they undergo sudden contractions or expansions. These changes create areas that are unfavorable for heat transfer. Various methods have been proposed to improve heat transfer in these areas. In the present study, the possibility of using a non-uniform magnetic field to improve heat transfer in a milli-channel including two sudden contractions has been discussed. In this study, it is assumed that a ferrofluid (EMG-805-a commercial brand) flows in the channel with a laminar regime, fully developed and steady state conditions. The walls of the channel are adiabatic, while the walls of the steps, which are in the vicinity of the electronic element, have a constant heat flux. The effects of different parameters, including locations of dipoles on the bottom and top walls, the number of dipoles, the Reynolds number, and the strength of the magnetic field on the improvement of heat transfer have been investigated. The obtained results show that the increase in Reynolds number and the strength of the magnetic field cause an increase in local Nusselt. The results show that applying a magnetic dipole on the bottom wall and just after the steps results in a significant increase in the local Nusselt number and an increase of 164.05% in the average Nusselt number compared to the case without a magnetic field.*

Keywords: Magnetic Field, Ferrofluid, Nusselt Number, Heat Transfer, Dipole, Forward Facing Step.

1- Introduction

Enhancing heat transfer in channels with obstacles and sudden contractions or expansions has been a focus for researchers, with applications in areas, including electronic cooling. Studies have explored different methods, such as nanofluids, barriers, and magnetic fields in channels with obstacles. However, channels with two consecutive steps have received less attention, presenting a research gap. This study aimed to utilize non-uniform magnetic fields in channels with double-forward steps to enhance heat transfer using numerical simulations with a specific ferrofluid (EMG-805, a commercial brand, Ferrotec) to analyze distinct factors, namely Reynolds number variations and magnetic field positioning.

2- Problem Description

The present research focuses on a two-dimensional milli-channel with consecutive contractions. The geometry and computing domain are illustrated in Figure 1, detailing the channel's dimensions and calculation area.

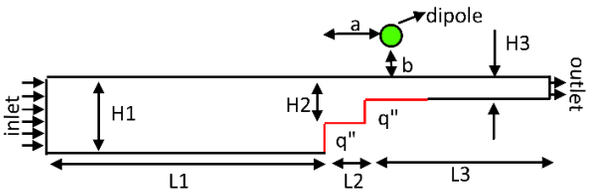


Figure 1. Schematic of the problem

3- Equations

The problem assumes two-dimensional incompressible flow, steady state, and constant fluid properties, neglects gravity, and incorporates magnetic field effects as volumetric forces. The equations can be found in Reference [4].

4- Fluids Properties

This study used the EMG-805 ferrofluid, a commercial product from Ferrotec Company. Some previous research [34, 42] presented the characteristics of the selected ferrofluid.

5- Mathematical Modeling

The problem was modeled using Ansys Fluent 2021 software, a finite volume-based numerical solver. A Coupled solver was employed for pressure and velocity, with second-order discretization for pressure, momentum, and energy equations. Convergence was achieved when the residual was below10^{-8}.

6- Results and Discussion

This section presents modeling results, including dipole number and location, Reynolds number effects, magnetic

*Manuscript received: January 13, 2024. Revised, February 13, 2024, Accepted, March 26, 2024.

[1] Corresponding Author, Assistant professor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, **Email**: taleshbahrami@qut.ac.ir

[2] M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

strength impact on the local Nusselt number, and overall Nusselt number variations.

Applying a magnetic dipole under the lower wall

In this section, a magnetic dipole is applied to the bottom wall, and its longitudinal distance (a) is changed to optimize cooling conditions. Figure 2 shows changes in the local Nusselt number. Applying a magnetic field alters the flow field due to interactions with ferrofluid and temperature/magnetic fields. The average Nusselt number was the highest at a longitudinal distance of zero and vertical distance of 1 mm, increasing by 56.57% compared to the case without a magnetic field.

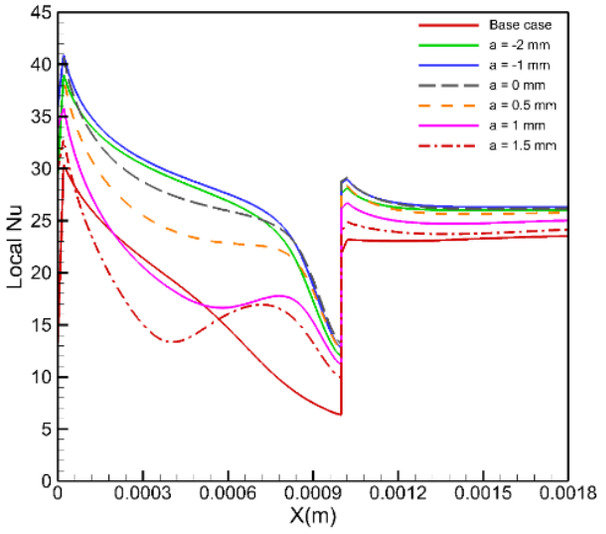


Figure 2. Variation of local Nusselt number with dipole location positioned under the lower wall

Applying a dipole on the upper wall

In this section, a magnetic dipole was applied to the top wall to optimize heat transfer. Changes in local Nusselt number with dipole location are observed (

Figure 3), with stronger effects closer to hot spots. Optimal cooling occurs when the dipole is positioned at 1.5 mm longitudinally, resulting in a 49.88% increase in average Nusselt compared to no magnetic field.

Applying dipole near critical areas

Placing magnetic dipoles on the bottom wall near steps improves average heat transfer by 164.05% in the optimal conditions as shown in Figure 4, occurring when the dipole is at a longitudinal distance of 0.25 mm and 1.25 mm behind steps, creating vortices that enhance heat transfer.

Applying two dipoles

This part explores the utilization of two dipoles simultaneously to enhance heat transfer. Various configurations were tested to find the optimal arrangement. Placing dipoles between steps yields more uniform local Nusselt variation. Despite some improvements, using two dipoles is not recommended due to complexity and marginal heat transfer enhancement. The average Nusselt increases by 183.14%, yet compared to the best single-dipole case, it only improves by 6.74%, making the use of two dipoles less favorable.

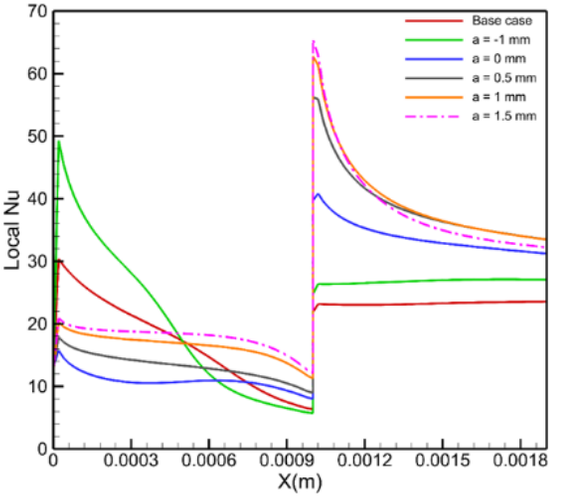


Figure 3. Variation of local Nusselt number considering dipole location position over the upper wall

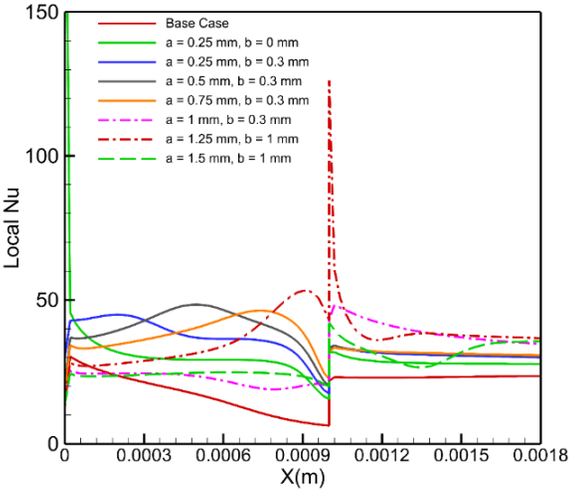


Figure 4. Effects of positioning dipoles on the critical points

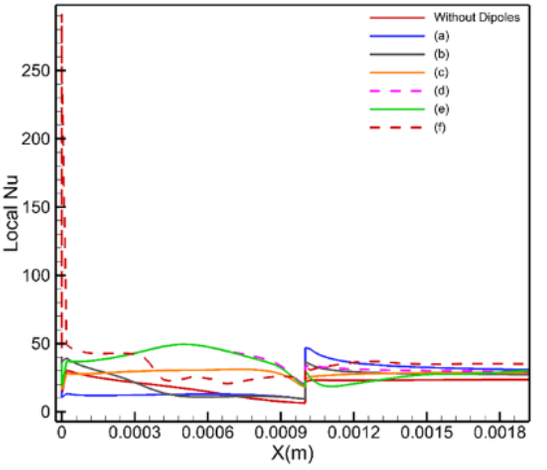


Figure 5. Using two dipoles with different arrangements ((a) a_1 = -1 mm, a_2 = 1 mm, b_1 = 3 mm, b_2 = 3 mm, (b) a_1 = -1 mm, a_2 = 1.5 mm, b_1 = -1 mm, b_2 = 3 mm, (c) a_1 = -1 mm, a_2 = 0.75 mm, b_1 = -1 mm, b_2 = 0.3 mm, (d) a_1 = 0.5 mm, a_2 = 1.5 mm, b_1 = 0.3 mm, b_2 = 1 mm, (e) a_1 = 0.5 mm, a_2 = 1 mm, b_1 = 0.3 mm, b_2 = 3 mm, (f) a_1 = 0.25 mm, a_2 = 1.25 mm, b_1 = 0 mm, b_2 = 1 mm)

7- Conclusions

Due to the critical need for effective cooling in compact electronic devices, the potential of magnetic dipoles to enhance heat transfer in front of a double-forward single-step was investigated. Results indicated that:

- Single dipole placement under the bottom wall significantly increased both local and average Nusselt numbers, with the most optimal condition yielding a 57.56% increase in average Nusselt number.
- Applying a single dipole over the upper wall also improved heat transfer but to a lesser extent. Optimal performance was achieved with a dipole located 1.5 mm away, resulting in a 49.88% rise in the average Nusselt number.
- Strategically placing dipoles in critical areas around the steps leads to the best thermal performance, with the highest average Nusselt (164.05%) achieved when placing a dipole at the back of the steps (longitudinal distance of 0.25 mm and vertical distance of 1.25 mm).
- The use of two dipoles increased both local and average Nusselt numbers by 183.14%, but the improvement was modest compared to a single dipole.
- Increasing the Reynolds number improved heat transfer but diminished the effect of the magnetic field caused by the dipole.
- The strength of the magnetic field significantly enhanced the local Nusselt number.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک،۳۶، ۳، ۱۴۰۳.(۹۲-۶۹)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

مطالعه عددی اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر انتقال حرارت فروسیال در کانال با دو پله پیشرو*

مقاله پژوهشی

حمیدرضا بهرامی(۱) مهزیار قائدی(۲)

***DOI**: 10.22067/jacsm.2024.85877.1228*

چکیده *امروزه برای خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی سامانه‌های رایانه‌ای، از کانال‌های خنک‌کننده مایع استفاده می‌شود. این کانال‌ها برای عبور از المان‌ها باید تغییر سطح مقطع بدهند، بنابراین دچار انقباض و یا انبساط ناگهانی می‌شوند. این تغییرات منجر به ایجاد نواحی می‌شود که از نظر انتقال حرارت نامساعد هستند. روش‌های مختلفی برای بهبود انتقال حرارت در این نواحی پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر، امکان استفاده از میدان مغناطیسی غیر یکنواخت برای بهبود انتقال حرارت در یک میلی‌کانال دارای دو انقباض ناگهانی پرداخته شده است. در این مطالعه فرض می‌شود فروسیال با خاصیت مغناطیسی (EMG-805-یک برند تجاری) با رژیم جریان آرام، توسعه یافته و پایا در میلی‌کانال جاری می‌شود. دیواره‌های کانال آدیاباتیک و تنها به دیواره‌های پله که در مجاورت المان الکترونیکی است، شار ثابت وارد می‌شود. اثرات مکان دوقطبی بر روی دیوارهای پایین و بالا، تعداد دوقطبی‌ها، عدد رینولدز و قدرت میدان مغناطیسی بر روی میزان بهبود انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز و قدرت میدان مغناطیسی موجب افزایش ناسلت محلی می‌شود. اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین و دقیقا بعد از پله موجب افزایش قابل توجه عدد ناسلت محلی و افزایش ۱۶۴/۰۵٪ عدد ناسلت متوسط نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی می‌شود.*

واژه‌های کلیدی میدان مغناطیسی، فروسیال، عدد ناسلت، انتقال حرارت، دوقطبی، پله پیشرو.

مقدمه

بهبود انتقال حرارت به کمک روش‌های مختلف برای جریان درون کانال‌ها در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد توجه محققان قرار گرفته است. در بیشتر کاربردهای صنعتی و واقعی، کانال‌ها به‌صورت مستقیم نبوده و در طول مسیر خود با موانعی مواجه می‌شوند. این هندسه‌ها در ادبیان فن به عنوان کانال‌های دارای انقباض یا انبساط ناگهانی (پله پیشرو یا پله پسرو) شناخته می‌شوند. به عنوان مثال، امروزه برای خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی مانند رایانه‌های خانگی و یا پردازشگرهای موازی از خنک‌کاری مایع استفاده می‌شود. بدین ترتیب، با عبور کانال‌های دارای سیال خنک‌کننده از روی تجهیزات الکترونیکی مانند سیستم پردازش مرکزی (CPU) و کارت گرافیک (GPU) خنک‌کاری انجام می‌شود [1-4]. از طرفی کانال‌های خنک‌کننده برای عبور از روی این تجهیزات باید تغییر سطح مقطع بدهند و بنابراین دچار انقباض و انبساط می‌شوند. به وجود آمدن پدیده جدایش و گردابه‌های تشکیل شده در این کانال‌ها که ناشی از انقباض یا انبساط ناگهانی است، شرایط خنک‌کاری و هیدرودینامیک جریان دچار تغییراتی می‌شود. مطالعات تجربی و

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۲۳و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱/۷ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

Email: taleshbahrami@qut.ac.ir

عددی بسیاری توسط محققان بر روی این موضوعات انجام شده است. از اولین بررسی‌های انجام شده در این زمینه، می‌توان به تحقیق می و پلوتکین [5] اشاره کرد که در آن به حل ریاضی معادلات ناویر و استوکس برای هندسه‌های دارای پله پیشرو پرداختند. محققان دیگری [6, 7] گزارش کردند که در هندسه دارای پله پیشرو، با افزایش عدد رینولدز مقدار گرادیان‌ها و طول ناحیه جدایش کاملا تغییر می‌کند. باربوسا و آناند [8] به صورت عددی و در یک هندسه سه‌بعدی دارای پله پیشرو به بررسی اثر تغییرات عدد رینولدز بر میزان انتقال حرارت پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در عدد رینولدز ۲۰۰ ناحیه جدایش، عدد ناسلت و میزان تنش برشی نسبت به جریان با عدد رینولدز ۸۰۰ کمتر است. استفاده از نانوسیال نیز ایده دیگری برای بهبود انتقال حرارت در این هندسه‌ها بوده است [9-12]. خربیت و همکاران [13] به صورت تجربی به بررسی اثر نانوسیال بر میزان بهبود انتقال حرارت در یک میکرو کانال دارای پله پیشرو و/یا پسرو پرداخته‌اند. در این مطالعه از آب مقطر به عنوان سیال پایه و سیلیسیم اکسید به عنوان نانوذره استفاده شده است. این مطالعه نشان داد که عدد ناسلت در میکروکانال دارای پله پیشرو تقریبا دو برابر میکروکانال دارای پله پسرو است. خربیت و همکاران [14] به بررسی عددی تأثیر استفاده از نانوسیال‌های مختلف با درصد حجمی متفاوت نانوذره بر میزان انتقال حرارت در یک میکروکانال دارای پله پیشرو پرداخت. در این مطالعه هندسه به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شده، رژیم جریان آرام و سیال پایه اتلین گلیکول با نانوذره‌های مختلف بوده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بهترین نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت، نانوسیال اتلین گلیکول با نانوذره سیلیسیم اکسید با درصد حجمی نانوذره ۴ درصد است. محققان دیگری [15, 16] نشان دادند که استفاده از مانع‌های استوانه‌ای در نزدیکی پله‌های پیشرو موجب بهبود انتقال حرارت در طول کانال می‌شود. برای بهبود انتقال حرارت در کانال‌های دارای پله از روش‌های متفاوت و متعددی استفاده شده است، یکی از روش‌ها استفاده از مانع قبل و بعد از پله است. بهرامی و طلائی [17] به استفاده از بافل‌های متخلخل با هندسه‌های متفاوت بعد از پله پسرو و تأثیر آن بر میزان انتقال حرارت پرداخته‌اند.

در برخی از کانال‌ها به دلایل مختلفی وجود دو پله پیشرو یا پسرو متوالی ناگزیر باشد. در این صورت پدیده‌های هیدرودینامیکی و حرارتی پیچیده‌تر می‌شود. به عنوان مثال، در کانال‌های دارای دو انقباض ناگهانی پدیده‌های، عدم تقارن انتقال حرارت و همچنین ناحیه جدایش دو بار متوالی مشاهده می‌شود. توگان و همکاران [18, 19] در دو مطالعه عددی به تأثیر وجود دو پله پیشرو متوالی در یک کانال با جریان آشفته پرداختند. همین طور به منظور بهبود انتقال حرارت از نانوسیال استفاده شده است. در مطالعه اول مشاهده می‌شود که استفاده از دو پله پیشرو موجب افزایش عدد ناسلت هنگام برخورد جریان به پله دوم می‌شود، همچنین کاهش ارتفاع پله‌ها موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود. آن‌ها در مطالعه دوم با استفاده از نانوسیال هایبرید (مخلوط چند نانوذره متفاوت در سیال پایه) تلاش کردند که انتقال حرارت درون یک کانال عمودی دارای دو پله پیشرو را بهبود دهند. آن‌ها نشان دادند که بهترین انتقال حرارت زمانی اتفاق می‌دهد که پله اول دارای ارتفاع بیشتری باشد.

یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است، استفاده از میدان‌های مغناطیسی خارجی در مقطع مورد نظر است. میدان مغناطیسی به‌عنوان یک روش فعال برای افزایش انتقال حرارت محسوب می‌شود. میدان مغناطیسی هنگامی که به کانال اعمال می‌شود می‌تواند موجب تشکیل گردابه در محل اعمال میدان شده که موجب می‌شود جریان از طرفی از روی سطح کانال جدا شود و از طرف دیگر به دلیل گردابه تشکیل شده جریان به دیگر سطح کانال بچسبد. این روش بسیار ساده و کارآمد است. معمولا در فضاهایی که از کانال‌های حاوی جریان خنک‌کننده برای بهبود انتقال حرارت در تجهیزات الکترونیکی می‌شود، سیم‌های حامل جریان‌های الکتریکی نیز وجود دارد. میدان مغناطیسی سیم‌های حامل جریان الکتریکی را می‌توان برای تغییر در الگوی جریان‌های فروسیال در کانال‌های مورد نظر استفاده شود.

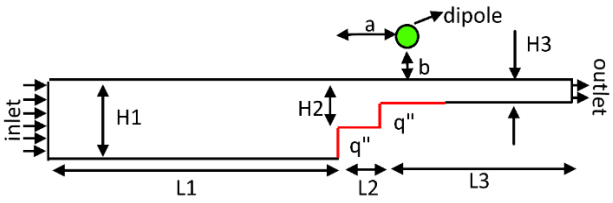
مطالعات زیادی در زمینه استفاده از فروسیال‌ها و استفاده از میدان مغناطیسی خارجی برای بهبود انتقال حرارت استفاده شده است. به عنوان مثال، گانگولی و همکاران [20] به بررسی تأثیر استفاده از یک و/یا چند دوقطبی مغناطیسی در یک کانال ساده و دوبعدی بر رژیم جریان و انتقال حرارت پرداخته‌اند. مطالعه

آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از میدان مغناطیسی موجب بهبود انتقال حرارت در اعداد رینولدز بسیار پایین می‌شود. از طرفی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر قدر تعداد دوقطبی‌های مغناطیسی بیشتر باشد انتقال حرارت بهتر می شود. قاسمیان و همکاران [21] یک مطالعه عددی در زمینه استفاده از میدان مغناطیسی متناوب و یکنواخت در یک کانال دوبعدی و تأثیر آن بر بهبود انتقال حرارت پرداخته‌اند. محققان زیادی [22-27] در سال‌های اخیر از یک یا چند میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت در کانال‌های ساده، سینک حرارتی و یا کانال‌های دارای پله استفاده کرده‌اند. بررسی ارتعاشات ناشی از میدان مغناطیسی در میکرولوله، ادغام و ترکیب میدان مغناطیسی، نانوسیال و دیگر قیدهای بهبود دهنده انتقال حرارت از جمله ناحیه متخلخل از جمله نوآوری‌ها و بررسی‌های نو انجام شده هستند [28-30].

مروری بر منابع انجام شده نشان می‌دهد که خاطر کوچک-شدن تجهیزات الکترونیکی تولید انتقال حرارت بر واجد سطح در تجهیزات الکترونیکی به‌شدت زیاد شده است. در نتیجه دیگر روش‌های انتقال حرارت رایج و سنتی نظیر استفاده از فن‌های هوا برای دفع حرارت جوابگو نیست؛ بنابراین از روش دیگری نظیر کانال‌های حاوی مایع برای دفع حرارت استفاده می‌شود. این کانال‌ها بعد از عبور از قطعات الکترونیکی دچار انقباض انبساط‌های ناگهانی می‌شود که رژیم جریان را تغییر داده و انتقال حرارت را تضعیف می‌کنند. روش‌های مختلفی مانند استفاده از نانوسیالات، استفاده از موانع، تغییر ساختار سطح و استفاده از میدان‌های مغناطیسی ثابت و یا غیر یکنواخت برای بهبود انتقال حرارت در این هندسه‌ها پیشنهاد شده که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند. در این بین هندسه‌های با دو انقباض و دو انبساط علی‌رغم پیچیدگی بیشتر در ساختار جریان کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با توجه به تحقیقات نویسندگان، تا کنون مطالعه‌ای در مورد استفاده از میدان‌های مغناطیسی غیر یکنواخت برای بهبود انتقال حرارت در کانال‌های دارای دو پله پیشرو متوالی انجام نشده است، علی‌رغم اینکه سیم‌های حامل جریان (به عنوان منابع میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بالقوه) در مدارهای الکتریکی به‌وفور در دسترس هستند؛ بنابراین کار حاضر در نظر دارد این خلأ تحقیقاتی را پر کند. کار مورد نظر به صورت عددی و با استفاده از فرو سیال‌های برند تجاری انجام خواهد شد و اثر عامل‌های مختلف نظیر عدد رینولدز، مکان میدان مغناطیسی و غیره بررسی می‌شوند.

هندسه و دامنه محاسباتی

هندسه مورد مطالعه، یک میلی‌کانال دوبعدی دارای دو انقباض متوالی است که در شکل (۱) ناحیه محاسباتی و ابعاد کانال مورد نظر قابل مشاهده است. ابعاد به صورت متریک هستند و فرض شده است که جریان فروسیال (EMG-805) پیش از ورود به کانال به حالت توسعه‌یافتگی رسیده است. محل میدان مغناطیسی با دو فاصله عمودی (b) و طولی (a) مشخص می‌شود. ابعاد میلی‌کانال در جدول (۱) قرار داده شده است. تمامی دیوارهای میلی‌کانال آدیاتیک و تنها به پله‌های پیشرو و دیوارهای مجاور آن‌ها شار ثابت q''_w اعمال شده است تا شرایط مشابه شرایط واقعی خنک‌کاری یک المان واقعی در یک بورد الکترونیکی باشد.



شکل ۱ شماتیک هندسه و ناحیه محاسباتی مسئله

جدول ۱ ابعاد مسئله

پارامتر	واحد	مقدار
H_1	میلی‌متر	۲
H_2	میلی‌متر	۱/۳۳۳۴
H_3	میلی‌متر	۰/۶۶۶۷
L_1	میلی‌متر	۳۰
L_2	میلی‌متر	۱
L_3	میلی‌متر	۱۶
a	میلی‌متر	وابسته به شرایط مسئله
b	میلی‌متر	وابسته به شرایط مسئله

معادلات حاکم بر مسئله

معادلات حاکم بر مسئله برای ناحیه محاسباتی به صورت دوبعدی است. فرض می‌شود که جریان تراکم‌ناپذیر، پایا و آرام است. از

اثرات نیروی حجمی گرانش صرف نظر شده است. اثرات میدان مغناطیسی به صورت یک نیروی حجمی در دو راستای x و y به معادله مومنتوم در دو راستا اضافه می‌شود. فرض می‌شود که خواص ترموفیزیکی سیال ثابت است. با توجه به نکات ذکر شده، معادلات پیوستگی (۱)، مومنتوم (۲) و (۳) و انرژی (۴) به صورت زیر بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی [31]:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

معادله انرژی [32]:

$$\rho C_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (۲)$$

معادلات مومنتوم [33]:

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+S_x \qquad (۳)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+S_y \qquad (۴)$$

دو مؤلفه S_x و S_y بیانگر نیروی حجمی ناشی از میدان مغناطیسی خارجی است که به میلی کانال اعمال شده است و اثرات میدان مغناطیسی در معادلات مومنتوم (۳) و (۴) لحاظ می‌شوند. برای بیان نیرویی میدان مغناطیسی در معادلات مومنتوم لازم است که محاسبات و معادلاتی را در زمینه الکترومغناطیس بیان و ساده‌سازی کرد. استفاده از قوانین الکترومغناطیس و معادلات ماکسول برای بیان میدان مغناطیسی به زبان ریاضی استفاده می‌شود. در ابتدا با استفاده از قوانین آمپر (۵) و گاوس (۶) به ترتیب، شدت میدان مغناطیسی و شار مغناطیسی بیان می‌شوند [34]:

$$\vec{\nabla}\times\vec{H}=\mathbf{0} \qquad (۵)$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0 \qquad (۶)$$

برای شبیه‌سازی میدان مغناطیسی از مدل لانژوین (Langevin) استفاده می‌شود. این مدل با در نظر گرفتن اشباع مغناطیس در نانوذرات به هنگام اعمال میدان مغناطیسی، شرایط و اثر اعمال میدان مغناطیسی را بر روی جریان فروسیال شبیه‌سازی می‌کند. مؤلفه و خاصیت مغناطش (Magnetization) بین شار و شدت مغناطیسی به صورت زیر ارتباط ریاضی برقرار می‌کند [35]:

$$\vec{B}=\mu_0(\vec{M}+\vec{H}) \qquad (۷)$$

در ادامه به کمک بردار میدان مغناطیسی (Magnetic field vector) ، پتانسیل اسکالر مغناطیسی (Magnetic scalar potential) (۸) برای یک سیم حامل جریان تعریف می‌شود. سپس با استفاده از معادلات ریاضی (۹)، بردار میدان مغناطیسی غیر یکنواخت در مختصات قطبی (۱۰) و کارتزین (۱۱ و ۱۲) بیان می‌شود [36]:

$$\vec{H}=-\vec{\nabla}\cdot V_m \qquad (۸)$$

$$V_m(x,y)=\frac{m\sin\theta}{r} \qquad (۹)$$

$$\vec{H}(r,\phi)=\frac{m}{r^2}(\sin(\phi)\,\hat{e}_r-\cos(\phi)\,\hat{e}_\theta) \qquad (۱۰)$$

$$\phi=\tan^{-1}\left(\frac{y-b}{x-a}\right) \qquad (۱۱)$$

$$r=\sqrt{(x-a)^2+(y-b)^2} \qquad (۱۲)$$

مغناطش فروسیال (M) با استفاده از تابع و معادلات لانژوین از طریق رابطه (۱۳) بیان می‌شود [24]:

$$\vec{M}=M_s L(\alpha)\frac{\vec{H}}{|\vec{H}|} \qquad (۱۳)$$

حداکثر مقدار قابل دسترس مغناطش برای فروسیال را می‌توان به کمک رابطه (۱۴) تعریف کرد که در این رابطه متغیر α بیان‌کننده نسبت انرژی مغناطیسی به انرژی حرارتی است که از طریق رابطه (۱۵) تشریح می‌شود [37]:

$$L(\alpha) = \frac{1}{\tanh(\alpha)} - \frac{1}{\alpha} \quad (۱۴)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{6}\frac{\mu_0 M_d |\vec{H}| d^3}{k_B T} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)، d بیانگر قطر میانگین ذرات جامد نانومغناطیس، M_d دامنه مغناطش، $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\left(\frac{N}{A^2}\right)$ نفوذپذیری مغناطیسی در خلأ و $k_B = 1.38 \times 10^{-23}\ J/K$ ثابت بولتزمن است. دامنه مغناطش در رابطه (۱۶) تعریف می‌شود و مؤلفه ϕ غلظت نانوذرات مغناطیسی در فروسیال است. در نهایت با استفاده از روابط (۵) تا (۱۶) اثر میدان مغناطیسی به‌صورت یک نیرو بر واحد حجم در رابطه (۱۷) تعریف می‌شود و در معادلات مومنتوم لحاظ می‌شود [38]:

$$M_d = \frac{M_s}{\phi} \quad (۱۶)$$

$$S_k = M_s L(\alpha)\vec{\nabla}\left((\vec{H}\cdot\vec{H})^{0.5}\right) \quad (۱۷)$$

معادلات مورد نیاز جریان از جمله عدد رینولدز، عدد ناسلت، قطر هدرولیک و توسعه‌یافتگی جریان به ترتیب در روابط (۱۸) تا (۲۱) بیان شده‌اند [39]:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu} \quad (۸)$$

$$Nu = h \times \frac{D_h}{k} \quad (۹)$$

$$D_h = 2H_1 \quad (۱۰)$$

$$u = 6U_{mean}\left[\frac{y}{h} - (\frac{y}{h})^2\right] \quad (۱۱)$$

خواص ترموفیزیکی فروسیال مورد استفاده

فروسیال‌ها در علم مهندسی کاربرد بسیار زیادی دارند [40]. در مطالعه حاضر استفاده از فروسیال EMG-805 که یک برند تجاری است که توسط شرکت فروتک (Ferrotec) تولید می‌شود [41]، به‌عنوان فروسیال انتخاب شده است. مشخصات فروسیال مورد نظر در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی و مغناطیسی فروسیال مورد استفاده [34, 42]

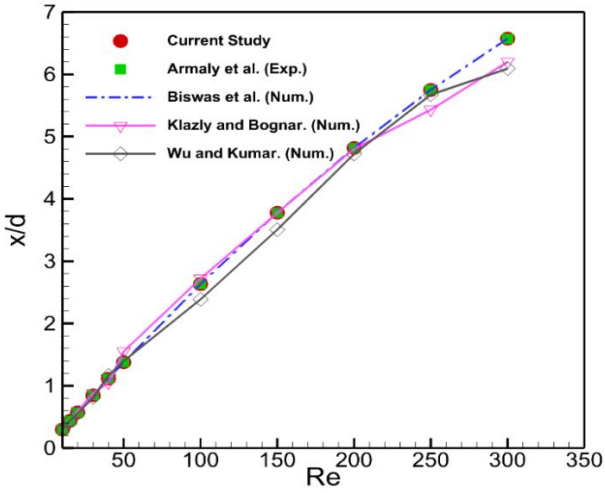
پارامتر	واحد	مقدار
چگالی (ρ)	kg/m^3	۱۱۹۰
گرمای ویژه (C_p)	J/kg-K	۳۴۷۵/۲
هدایت حرارتی (K)	W/m.K	۰/۶۷
لزجت (μ)	Pa.S	۰/۰۰۳
کسر حجمی جامد ($\emptyset$)	%	۳/۶
مغناطش اشباع (M_s)	mT	۲۲
حساسیت مغناطیسی (χ_{ff})	-	۲/۸۹

روش مدل‌سازی ریاضی

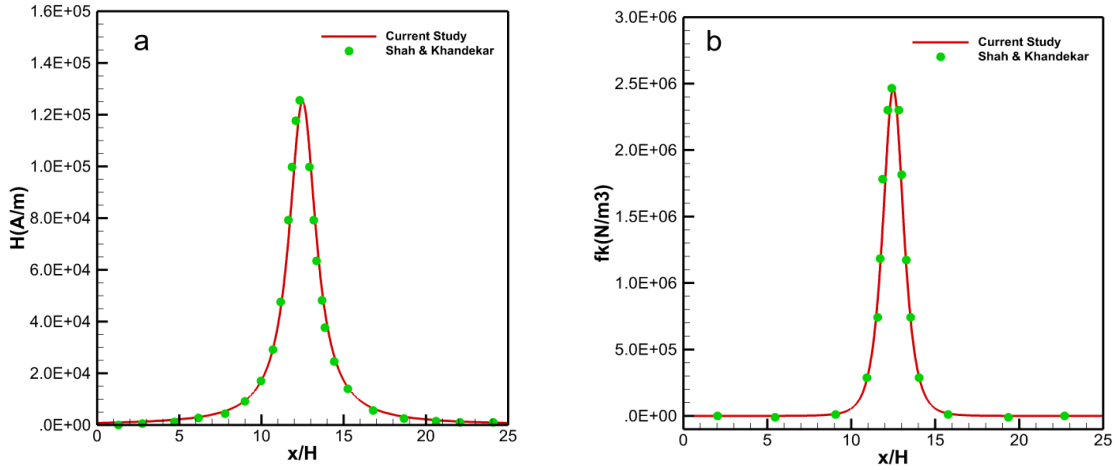
برای مدل‌سازی مسئله مورد نظر از نرم‌افزار انسیس فلوئنت (Ansys Fluent 2021 R1) ۲۰۲۱ که حلگر عددی بر اساس حجم محدود است، استفاده شده است. نوع حلگر کوپل برای فشار و سرعت و گسسته‌سازی معادلات فشار، مومنتوم و انرژی از مرتبه دو هستند. برای اطمینان از همگرایی، همه معادلات تا دستیابی به باقی‌مانده کمتر از 10^{-8} حل می‌شوند. برای مدل‌سازی از سیستم با پردازنده نسل ۷ و پردازنده ۲٫۷ گیگاهرتز استفاده شده است و مقدار حافظه سیستم ۱۶ گیگابایت است.

اعتبارسنجی

قبل از مدل‌سازی اصلی مسئله، لازم است از اعتبار درستی روش حل اطمینان حاصل شود. در این بخش دو اعتبارسنجی مختلف ارائه شده است. اعتبارسنجی اول با مطالعات محققان در حوزه تغییر جریان پس از عبور از جریان در کانال دارای پله پسرو است. آرملی و همکاران [43] به‌صورت تجربی، بیسواس و همکاران [44]، کلیزلی و بوگنار [45]، وو و کومار [46] به‌صورت عددی به بررسی تأثیر استفاده از پله پسرو بر هدرودینامیک جریان پرداخته‌اند. در شکل (۲) نتایج صحت‌سنجی مطالعه حاضر در مورد طول جدایش با نتایج محققان یاد شده ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود کار حاضر هم‌خوانی مناسبی با نتایج تحقیقات قبلی دارد.



شکل ۲ اعتبارسنجی مطالعه اخیر با مطالعات تجربی و عددی، آرملی و همکاران [43]، بیسواس و همکاران [44]، کلیزلی و بوگنار [45]، وو و کومار [46]



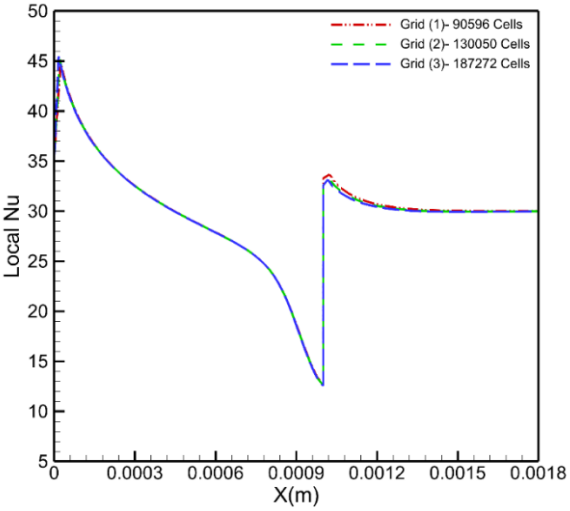
شکل ۳ اعتبارسنجی مطالعه اخیر با شاه و خندکار [24] (a) اعتبارسنجی شدت میدان مغناطیسی (b) اعتبارسنجی نیروی حجمی ناشی از میدان مغناطیسی

در بخش دوم درستی استفاده از میدان مغناطیسی خارجی صحت‌سنجی شده است. برای این کار از حل عددی شاه و خندکار [24] استفاده شده است. آن‌ها در مدل‌سازی خود تأثیر استفاده از میدان مغناطیسی بر جریان فروسیال در یک کانال دوبعدی را برای جریان آرام بررسی کرده‌اند. در این اعتبارسنجی فروسیال EMG-805 با عدد رینولدز ۲۵ در کانال دوبعدی جریان دارد. نتایج این مقایسه برای دو وضعیت میزان نیروی اعمال شده بر فروسیال و نیز بزرگی میدان مغناطیسی در شکل (۳) مقایسه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، مطالعه حاضر دقت مناسبی دارد.

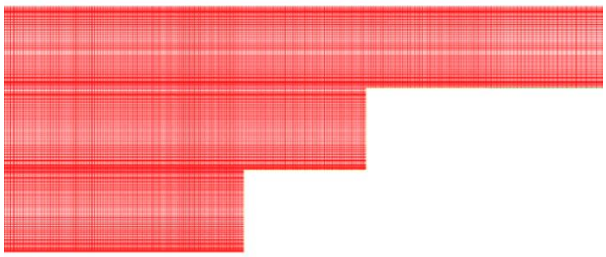
مطالعه شبکه

در مدل‌سازی‌های عددی یکی از گام‌های اصلی مطالعه شبکه‌بندی هندسه مورد نظر است. با بررسی مطالعات گذشته [24,36,47] نتیجه می‌شود هنگام استفاده از میدان مغناطیسی شبکه‌بندی بسیار اهمیت پیدا می‌کند. در این مطالعه سه شبکه‌بندی غیر یکنواخت مربعی متفاوت برای بررسی استقلال عددی از شبکه در نظر گرفته شده‌اند. بدین منظور، رینولدز جریان ۵۰، شار حرارتی 10^5 وات بر مترمربع، دوقطبی مغناطیسی با قدرت یک آمپر در متر در نزدیکی پله پیشرو برای هندسه شکل (۱) به‌عنوان شرایط مرزی و ورودی مسئله در نظر گرفته شده است. با افزایش رینولدز گرادیان‌های نزدیک دیواره‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند و استفاده از شبکه‌بندی ریز و غیر یکنواخت در نزدیکی دیواره توصیه می‌شود. اطمینان از استقلال حل عددی

از شبکه با بررسی عدد ناسلت انجام می‌شود. در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار شبکه‌بندی، نتایج تطابق بیشتری دارند و مطابق با نتایج شکل (۴)، کانال با تعداد شبکه ۱۳۰۰۵۰ به عنوان شبکه بهینه و اصلی برای مدل‌سازی‌ها انتخاب می‌شود. شکل (۵) یک نمونه شبکه‌بندی را در برای این کار نشان می‌دهد.



شکل ۴ مطالعه استقلال حل عددی از شبکه، (در عدد رینولدز = ۵۰ و شار حرارتی = 10^5 وات بر مترمربع)



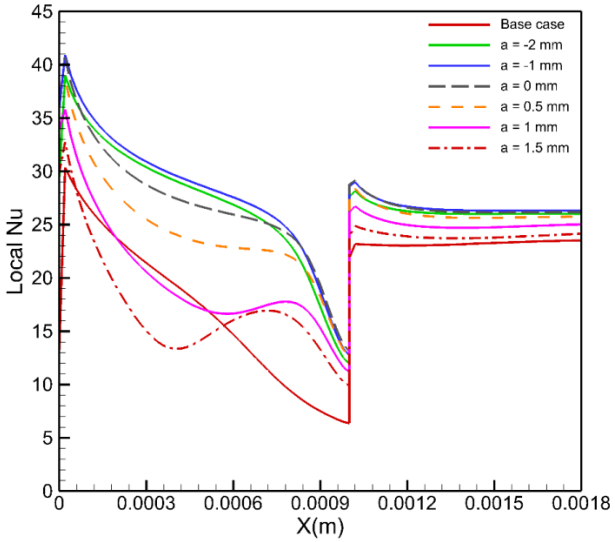
شکل ۵ شبکه‌بندی بهینه با تعداد ۱۳۰۰۵۰ شبکه

نتایج و بحث

در این بخش به ترتیب نتایج مدل‌سازی‌ها همچون تعداد و محل بهینه دوقطبی، تأثیر عدد رینولدز، تأثیر مقاومت مغناطیسی در مقدار عدد ناسلت محلی و عدد ناسلت ارائه می‌شود.

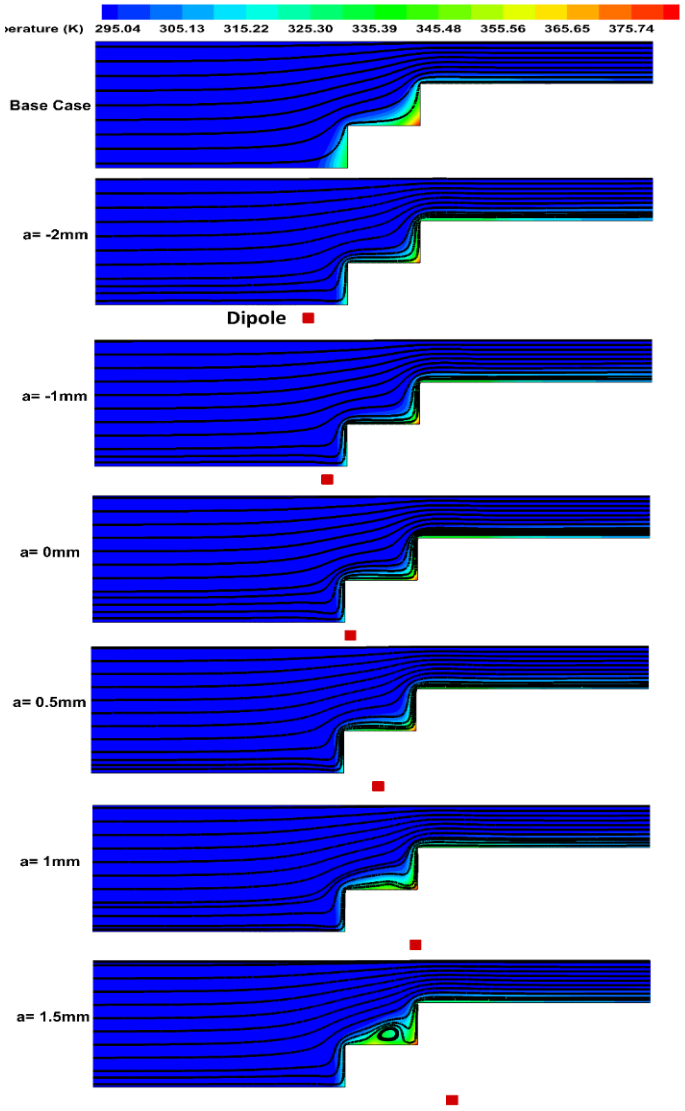
اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین

در این بخش یک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین اعمال می‌شود. با تغییر فاصله طولی (a) و ثابت ماندن فاصله عمودی (b) دوقطبی، به دنبال شرایط بهینه برای خنک‌کاری هستیم. شکل (۶) و (۷)، به ترتیب تغییرات عدد ناسلت محلی و کانتور دمای استاتیک مطابق با محل اعمال دوقطبی ارائه شده است. با بررسی حالت نتایج بدون اعمال میدان مغناطیسی ملاحظه می‌شود که تغییرات عدد ناسلت مشابه مطالعات گذشته محققان [19,48] است که در آن در گوشه پایین پله‌های پیشرو به خاطر جدایش جریان عدد ناسلت بسیار کاهش می‌یابد. با اعمال میدان مغناطیسی، در اثر اندرکنش‌های میدان و فروسیال و میدان‌های دما و مغناطیسی، میدان جریان تغییر می‌کند. ملاحظه می‌شود که متناسب با مکان دوقطبی میدان جریان و عدد ناسلت محلی دستخوش تغییر می‌شود. مطابق شکل (۶) و (۷) ملاحظه می‌شود که هر قدر دوقطبی به سمت راست حرکت می‌کند، به دلیل اینکه میدان به مناطق داغ‌تری اعمال می‌شود، مطابق رابطه (۱۳) مغناطش فروسیال بزرگ‌تر شده و در نتیجه همان طوری که انتظار می‌رود نیروی حجمی بزرگ‌تری بر میدان جریان وارد می‌شود. در نتیجه وقتی میدان در راست‌ترین نقطه قرار دارد، یعنی در a= ۱٫۵ میلی‌متر، گردابه بزرگی بر روی دیواره مابین دو پله ایجاد می‌شود که جریان را از روی سطح بلند کرده و انتقال حرارت را با مشکل مواجه می‌کند؛ بنابراین ملاحظه می‌شود که بر روی دیواره مابین دو پله دما بالا رفته که این به نفع قطعه زیرین نیست. مطابق شکل (۸) که نتایج ناسلت متوسط را متناسب با محل دوقطبی مغناطیسی نشان می‌دهد، نتیجه می‌شود که بیشترین میزان ناسلت متوسط در فاصله طولی (صفر میلی‌متر) و فاصله عمودی ثابت (یک میلی‌متر) که دقیقا پایین پله اول است حاصل می‌شود و مقدار ناسلت متوسط در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی مقدار، ٪۵۶/۵۷ افزایش‌یافته است.

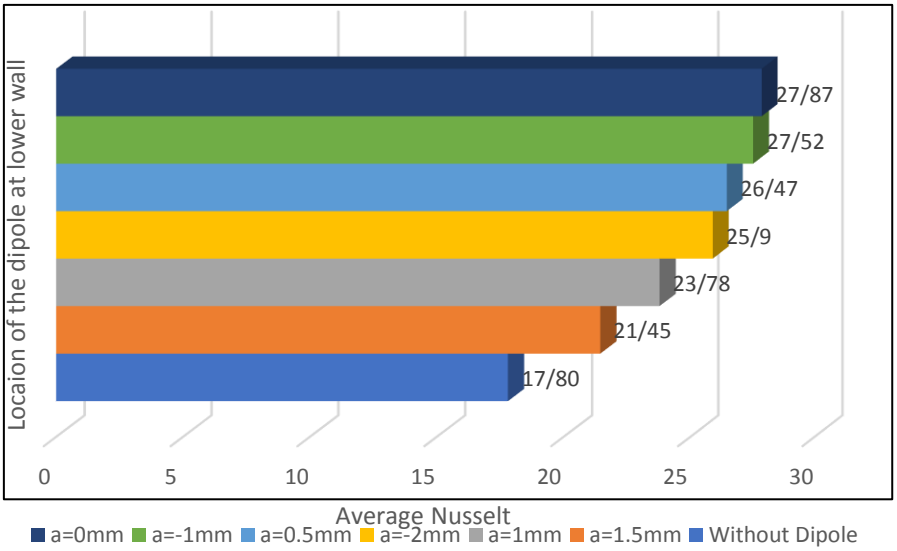


شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر محل دوقطبی بر دیوار پایین

(رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



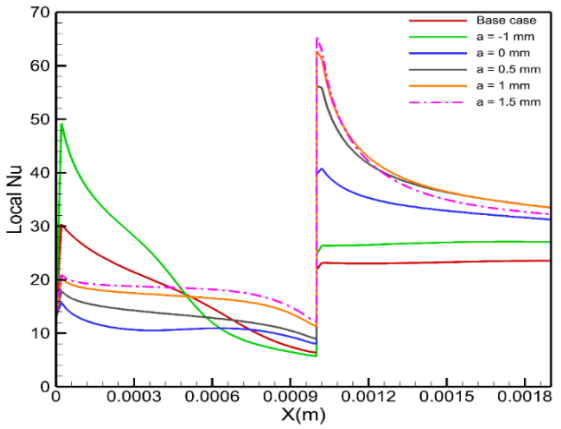
شکل ۷ تغییرات کانتورهای دما و خطوط جریان با تغییر محل دوقطبی بر دیوار پایین (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



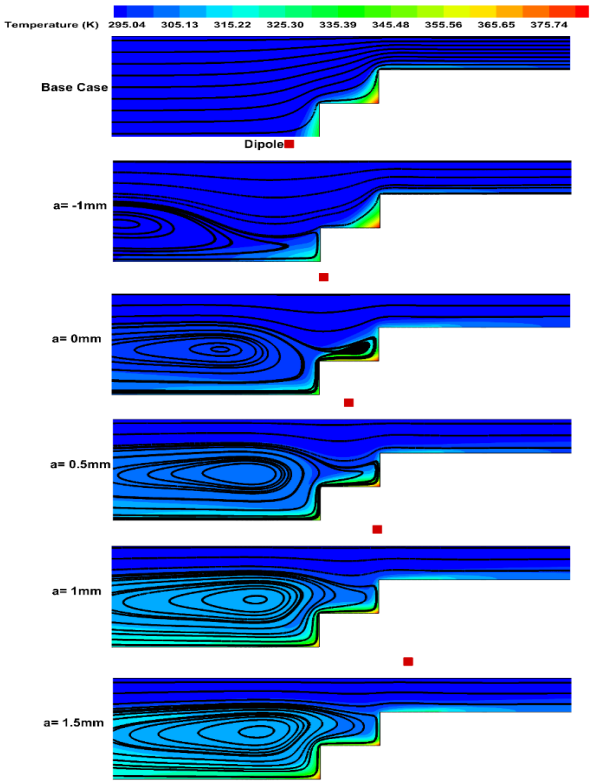
شکل ۸ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر محل دوقطبی بر دیوار پایین (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)

اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر روی دیوار بالا

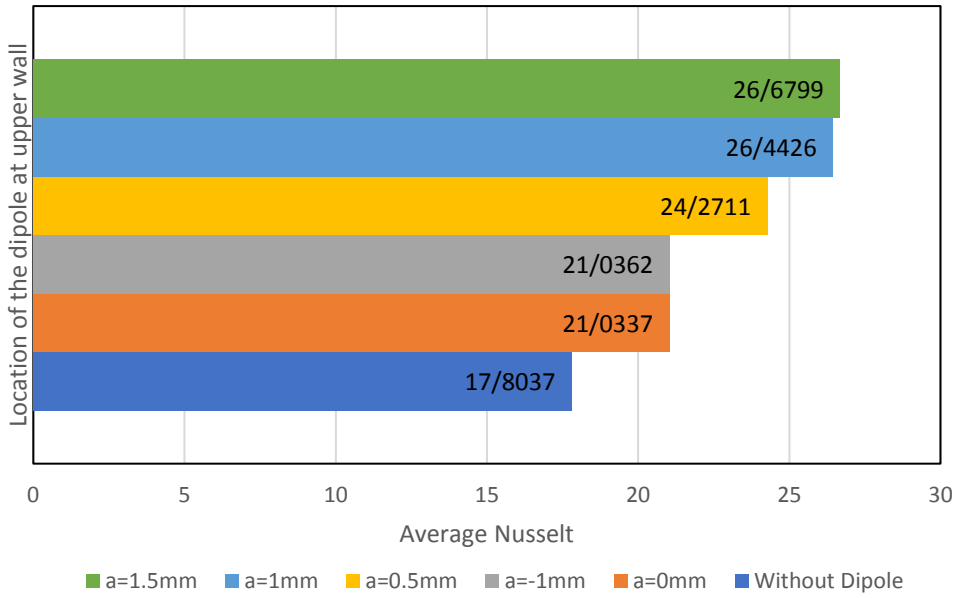
در این بخش، یک دوقطبی مغناطیسی تنها بر روی دیوار بالا اعمال می‌شود. با تغییر فاصله طولی (a) و ثابت ماندن فاصله عمودی (b) دوقطبی، تلاش می‌شود تا حالت بهینه برای خنک‌کاری یافت شود. در این بخش در تمامی مدل‌ها، دوقطبی در فاصله عمودی ۳ میلی‌متر قرار دارد. با اعمال دوقطبی بر دیوار بالای کانال، یک نیروی حجمی پادساعت‌گرد بر دیوار کانال توسط دوقطبی وارد می‌شود. مطابق شکل (۹)، با تغییر مکان دوقطبی عدد ناسلت محلی تغییر می‌کند. مجددا ملاحظه می‌شود که هر قدر دوقطبی فاصله کمتری با محل‌های داغ داشته باشد، اثر آن بر ویدا جریان پررنگ‌تر می‌شود و گردابه‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. این گردابه‌ها تنها زمانی مفید هستند که بتواند الگوی جریان و دما بر روی دیواره داغ را به‌گونه‌ای تغییر دهند که نتیجه مثبتی بر روی انتقال حرارت داشته باشند. می‌توان گفت که فیزیک جریان در نواحی نزدیک پله ناشی از تعامل پیچیده‌ای بین میدان مغناطیسی و خود پله‌ها است. از طرفی میدان مغناطیسی بر فروسیال اثر کرده و نیروی حجمی ایجاد می‌کند که این نیرو با افزایش دما بزرگ‌تر می‌شود. از طرفی هندسه پله‌ها نیز خود منجر به گرادیان‌های مثبت و منفی در نواحی مختلف ایجاد می‌کنند. مطابق شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که با تغییر محل دوقطبی الگوی خطوط جریان نیز بزرگ‌تر می‌شود. مطابق با شکل (۹) و شکل (۱۰)، خنک‌کاری هنگامی که دوقطبی در فاصله طولی ۱٫۵ میلی‌متر است، بهترین عملکرد خود را دارد. در شکل (۱۱)، تغییرات عدد ناسلت متوسط متناسب با تغییر فاصله طولی دوقطبی مشاهده می‌شود که بهترین شرایط در فاصله طولی ۱٫۵ میلی‌متر به دست می‌آید و مقدار ناسلت متوسط در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی مقدار، ۴۹/۸۸٪ افزایش یافته است.



شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر محل دوقطبی بر دیوار بالا (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



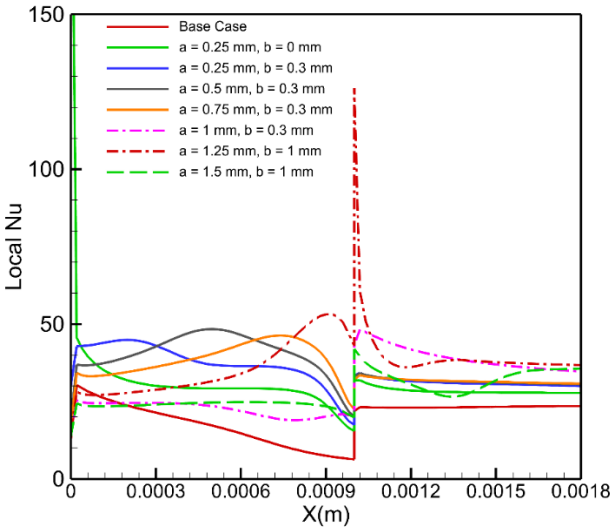
شکل ۱۰ تغییرات کانتورهای دما و خطوط جریان با تغییر محل دوقطبی بر دیوار بالا (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



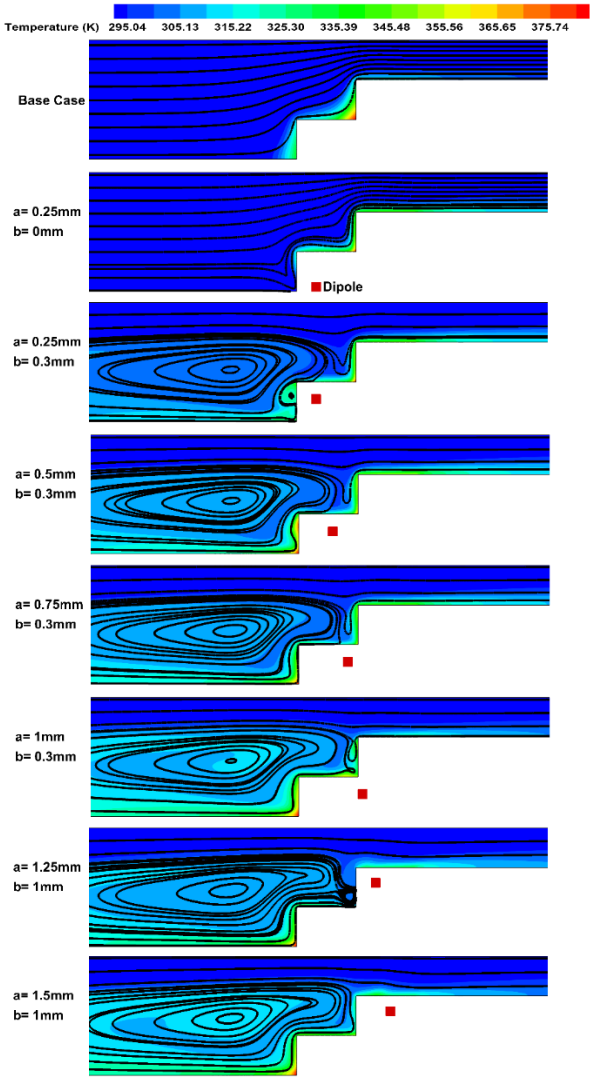
شکل ۱۱ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر محل دوقطبی بر دیوار بالا (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)

اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر نواحی بحرانی و گوشه‌های پله‌ها

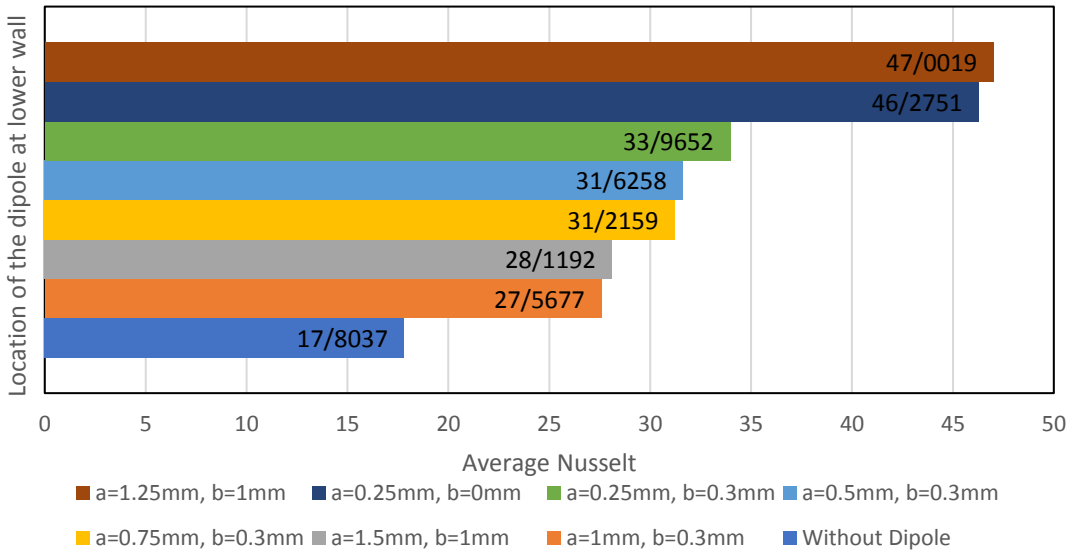
مطابق نتایج به دست آمده در بخش‌های قبل، قرارداد دوقطبی بر دیوار پایین از نظر خنک‌کاری شرایط بهتری را فراهم می‌کند. در این بخش، دوقطبی در گوشه‌های پله‌ها و در فواصل بین دو پله و نزدیک دیوار پایین کانال قرار داده می‌شود. با تغییر هر دو فاصله طولی (a) و فاصله عمودی (b) دوقطبی، تلاش می‌شود تا حالت بهینه برای خنک‌کاری یافت شود. مطابق شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، قرار دادن دوقطبی مغناطیسی در محل‌های بحرانی و نزدیک پله که از لحاظ خنک‌کاری مستعد تخریب حرارتی هستند، خنک‌کاری را در بخش‌های بحرانی بهبود می‌دهد. با مقایسه و نتیجه‌گیری از شکل (۸) بخش ۶-۱ و شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود که در تقریبا تمامی مکان‌های دوقطبی، با ثابت ماندن فاصله طولی و تغییر فاصله عمودی دوقطبی (نزدیک کردن دوقطبی به دیوار) انتقال حرارت بهبود پیدا می‌کند. مطابق با شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، تنها هنگامی که دوقطبی در فاصله طولی ۰/۲۵ میلی‌متر قرار دارد، با نزدیک کردن دوقطبی به دیوار خنک‌کاری در ابتدای پله کاهش پیدا می‌کند که دلیل این اتفاق قرارگیری دوقطبی در ناحیه داغ و تشکیل گردابه است. مطابق بخش‌های قبل با تغییر مکان دوقطبی و نزدیک شدن به محل‌های داغ، گردابه‌های بزرگی ناشی از تعامل برخورد جریان با پله و همچنین میدان مغناطیسی تشکیل می‌شوند. مطابق شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، نیز نتیجه می‌شود که قرارگیری دوقطبی دقیقا در پشت پله‌ها (فاصله‌های طولی ۰/۲۵ و ۱/۲۵ میلی‌متر)، بهترین شرایط را از نظر انتقال حرارت مهار می‌کند و مقدار ناسلت متوسط در بهترین حالت در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی مقدار، ۱۶۴/۰۵٪ افزایش یافته است.



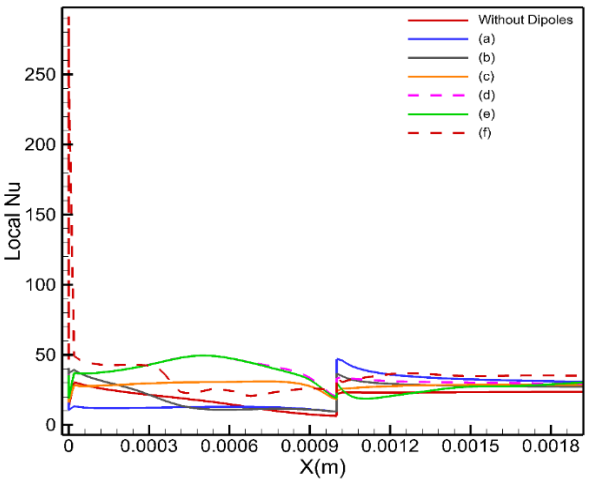
شکل ۱۲ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر فاصله عمودی و طولی (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



شکل ۱۳ تغییرات کانتورهای دما و خطوط جریان با تغییر محل دوقطبی بر دیوار (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)

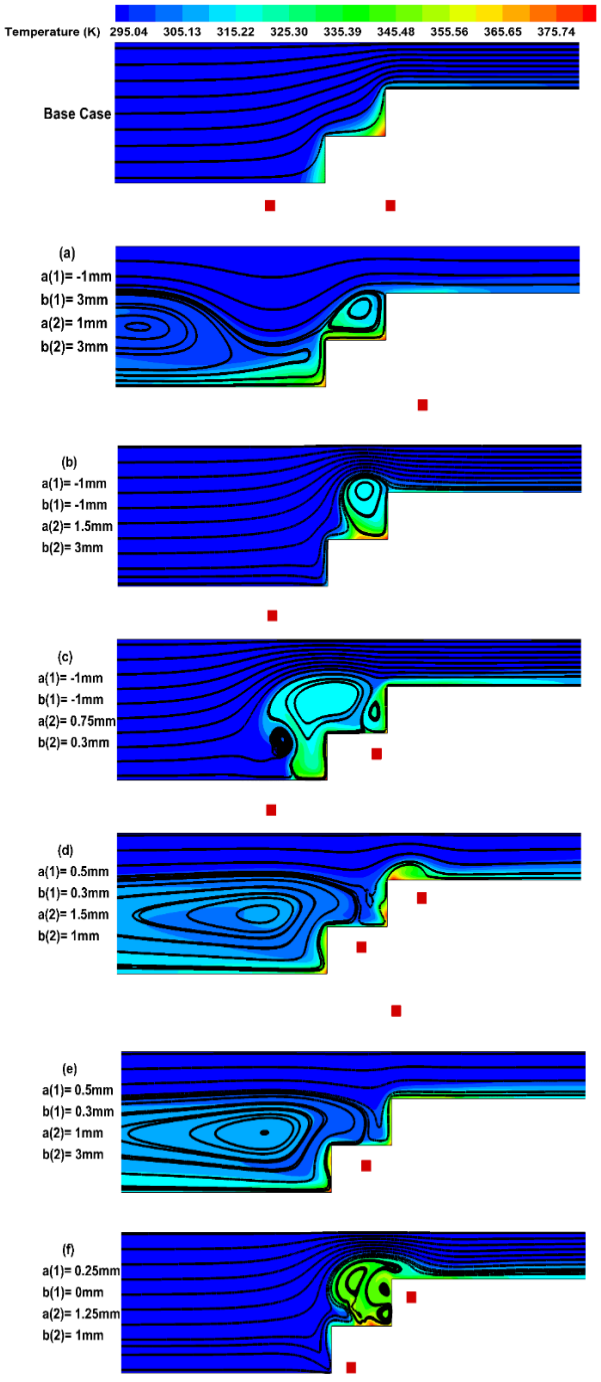


شکل ۱۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر فاصله عمودی و طولی (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



شکل ۱۵ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر محل دوقطبی‌ها بر دیوار (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)

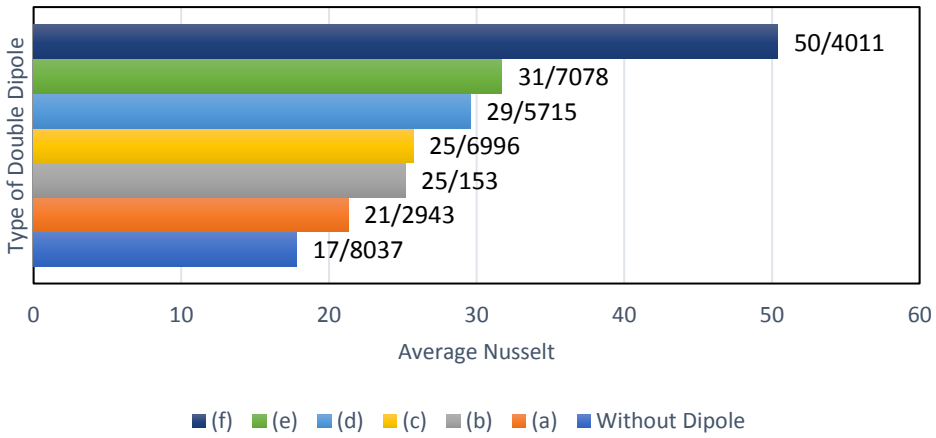
می‌کند، اما به دلیل اضافه‌کردن یک المان بیشتر و پیچیده‌تر شدن سیستم توصیه نمی‌شود. مطابق شکل (۱۷)، مقدار ناسلت متوسط در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی مقدار، ۱۸۳/۱۴٪ افزایش یافته است که در مقایسه با بهترین حالت تک دوقطبی، حدود ۶/۷۴٪ انتقال حرارت را بهتر کرده است و استفاده از دو دوقطبی توصیه نمی‌شود.



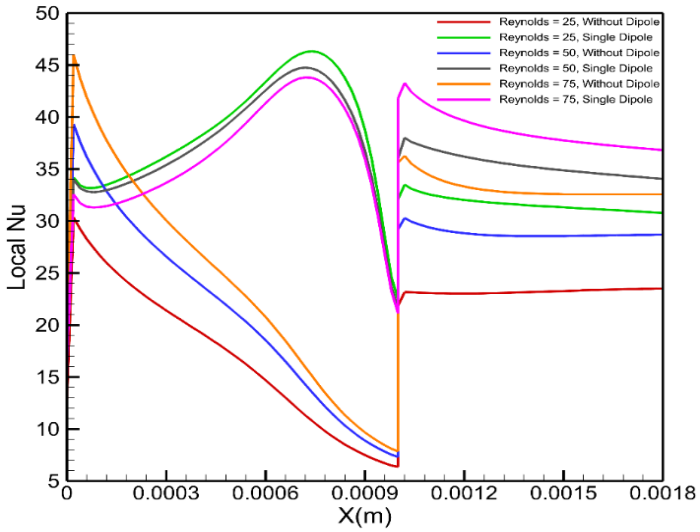
اعمال دو دوقطبی مغناطیسی

در این بخش، به طور هم‌زمان از دو دوقطبی برای بهبود انتقال حرارت استفاده می‌شود. متناسب با بخش‌های قبل که از تک دوقطبی استفاده شده است، به ترکیب حالت‌های بهینه آن‌ها پرداخته می‌شود تا بهترین محل برای دو دوقطبی پیدا شود. تلاش شده است که با تغییر فاصله عمودی و طولی دوقطبی‌ها و همچنین چیدمان‌های مختلف، بهینه‌ترین حالت برای خنک‌کاری با اعمال دو دوقطبی حاصل شود. مطابق شکل (۱۵)، اگر چیدمان دوقطبی‌ها بین دو پله باشد، (فاصله طولی ۰/۲۵ میلی‌متر و فاصله طولی ۱/۲۵ میلی‌متر)، تغییرات عدد ناسلت محلی حالت یکنواخت‌تری دارد و مانند بخش‌های قبل ناگهان کاهش یا افزایش پیدا نمی‌کند. مطابق شکل (۱۶)، با اعمال دوقطبی‌ها در ناحیه داغ گردابه‌های بزرگی تشکیل می‌شود. مطابق شکل‌های این بخش، بهینه‌ترین حالت از دیدگاه حرارتی برای چیدمان دو دوقطبی، حالت (f) است که دو دوقطبی دقیقا در پشت پله‌های اول و دوم هستند. مطابق نتایج مشاهده شده، استفاده از دو دوقطبی تأثیر بسیار زیادی برای بهبود انتقال حرارت در کانال ندارد و تقریبا نتایج، به نتایج به دست آمده به هنگام استفاده از تک دوقطبی نزدیک است. در نتیجه استفاده از دو دوقطبی با اینکه به نسبت تک دوقطبی مقدار بسیار ناچیزی انتقال حرارت را بهتر

شکل ۱۶ تغییرات کانتورهای دما و خطوط جریان با تغییر محل دوقطبی‌ها بر دیوار (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



شکل ۱۷ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر محل دو دوقطبی (رینولدز=۲۵، قدرت=۱ آمپر-متر)



شکل ۱۸ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر عدد رینولدز (قدرت=۱ آمپر-متر)

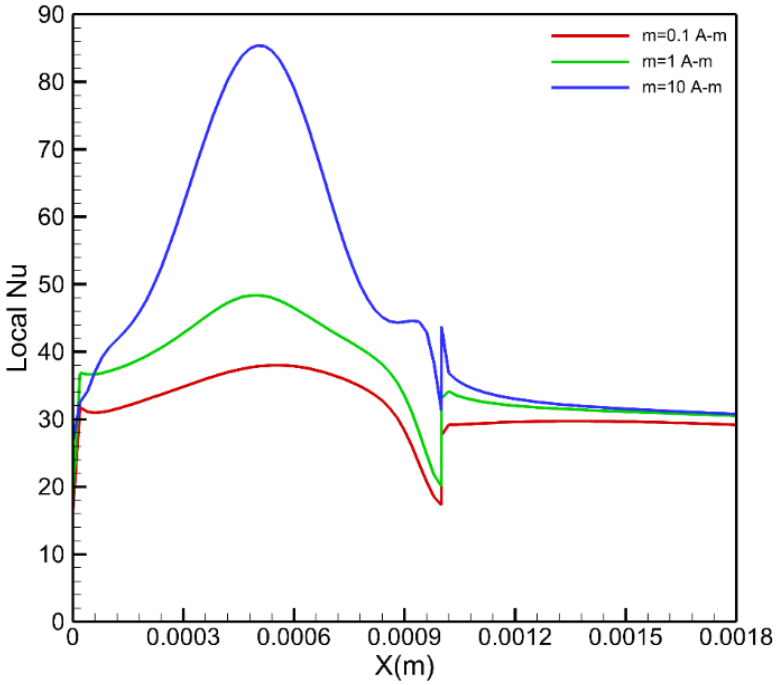
تأثیر تغییر عدد رینولدز بر مشخصه‌های جریان

در این بخش، تأثیر افزایش عدد رینولدز بر میزان اثر میدان مغناطیسی بررسی شده است. مطابق شکل (۱۸)، نتایج به دست آمده با حالت بدون استفاده از دوقطبی مقایسه شده است. با افزایش عدد رینولدز، خنک‌کاری به دلیل افزایش اختلاط و مومنتوم ذرات در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد. با اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین در فاصله طولی ۰/۷۵ میلی‌متر و فاصله عمودی ۰/۳ میلی‌متر، با افزایش رینولدز مشاهده می‌شود که اثر میدان مغناطیسی ناشی از دوقطبی کاهش پیدا می‌کند. طبق شکل (۱۸)، مشاهده می‌شود که عدد ناسلت محلی در محلی که تک دوقطبی مغناطیسی اعمال شده است، در جریانی که دارای رینولدز ۲۵ است، بیشتر است از جریانی که دارای رینولدز ۷۵ است. همین طور، اختلاف عدد ناسلت محلی برای جریان با رینولدز ۲۵ در حالت با میدان و بدون میدان نسبت به جریان با رینولدز ۷۵ بیشتر است که هر چه اختلاف بیشتر باشد به این معنی است که اثر دوقطبی بیشتر است.

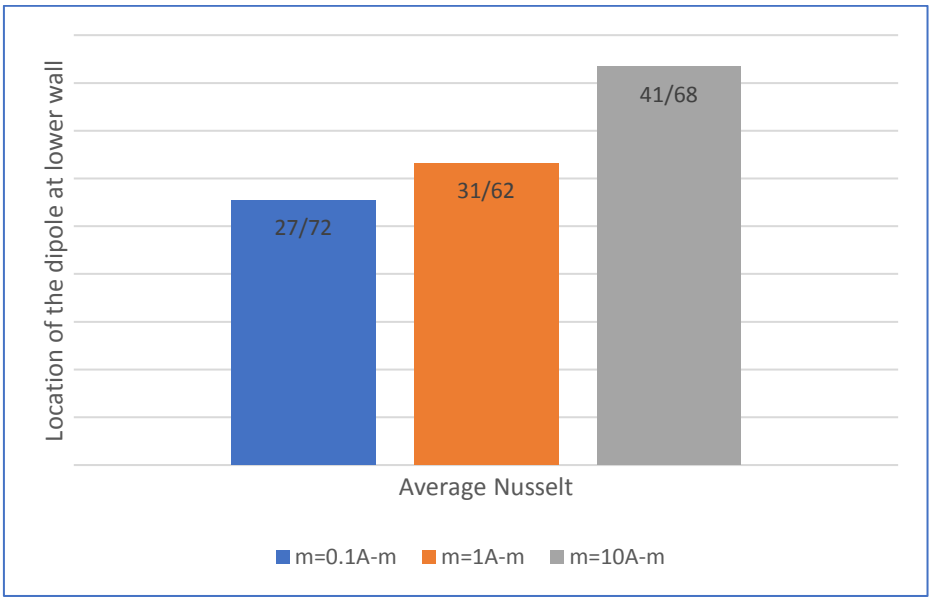
تأثیر تغییر قدرت دوقطبی بر مشخصه‌های جریان

در این بخش، تأثیر تغییر قدرت دوقطبی مغناطیسی بر میزان انتقال حرارت بررسی شده است. برای مدل‌سازی در این بخش، دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین و در فاصله طولی ۰/۵ میلی‌متر و فاصله عمودی ۰/۳ میلی‌متر از دیوار قرار داده شده است. طبق

شکل (۱۹) و (۲۰)، با افزایش قدرت دوقطبی، عدد ناسلت محلی در بخشی که میدان مغناطیسی مؤثر است، افزایش پیدا می‌کند و با کاهش دوقطبی نیز عدد ناسلت محلی به مقدار قابل توجه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۹ تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییر قدرت دوقطبی (رینولدز=۲۵)



شکل ۲۰ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر قدرت دوقطبی (رینولدز=۲۵)

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت خنک‌کاری مؤثر در دستگاه‌های شامل بوردهای الکترونیکی بسیار چگال، در این تحقیق به امکان‌سنجی استفاده از دوقطبی‌های مغناطیسی به منظور بهبود انتقال حرارت در جلوی دو پله پیشرو پرداخته شده است. هدف تعیین تأثیر پارامترهای مختلف نظر مکان و تعداد دوقطبی، قدرت و عدد رینولدز جریان پرداخته شده است. مطابق با بررسی‌ها و مدل‌سازی‌های انجام شده نتایج نشان می‌دهند که:

۱. اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین، موجب بهبود عدد ناسلت محلی و عدد ناسلت متوسط نسب به حالت بدون میدان مغناطیسی می‌شود و با قرارگیری دوقطبی در فاصله طولی صفر میلی‌متر بهینه‌ترین حالت افزایش عدد ناسلت متوسط ۵۶/۵۷٪ نتیجه می‌شود.

۲. اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار بالا نیز موجب بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت می‌شود، اما به نسبت قرارگیری دوقطبی در دیوار پایین کمتر است. با قرارگیری دوقطبی در فاصله طولی ۱/۵ میلی‌متر بهینه‌ترین حالت و افزایش عدد ناسلت متوسط ۴۹/۸۸٪ نتیجه می‌شود.

۳. با اعمال تک دوقطبی در نواحی بحرانی و گوشه‌های پله‌ها، نتیجه می‌شود که بهترین عملکرد از دیدگاه حرارتی و بیشترین ناسلت متوسط (۱۶۴٪/۰۵)، به هنگام اعمال دوقطبی در پشت پله‌ها نتیجه (فاصله طولی ۰/۲۵ میلی‌متر و فاصله طولی ۱/۲۵ میلی‌متر) می‌شود.

۴. اعمال دو دوقطبی بر کانال، باعث افزایش ناسلت محلی و ناسلت متوسط (۱۸۳٪/۱۴) می‌شود، اما نسبت به حالت تک دوقطبی مقدار بسیار ناچیزی (۶٪/۷۴) است. بهترین عملکرد خنک‌کاری، هنگامی است که دو دوقطبی را در پشت پله‌های کانال (فاصله طولی ۰/۲۵ میلی‌متر و فاصله طولی ۱/۲۵ میلی-متر) قرار داده شده است.

۵. افزایش عدد رینولدز موجب بهبود بیشتر انتقال حرارت می-شود، اما اثر میدان مغناطیسی ناشی از دوقطبی را کاهش می-دهد.

۶. افزایش قدرت میدان مغناطیسی ناشی از دوقطبی به میزان قابل توجه موجب افزایش عدد ناسلت محلی می‌شود.

فهرست علائم

پارامتر	توضیح
a	مختصات دوقطبی مغناطیسی (m)
b	مختصات دوقطبی مغناطیسی (m)
B	چگالی شار مغناطیسی (T)
Cp	گرمای ویژه ($kJ/kg.^oC$)
d	میانگین قطر نانوذره (m)
D_h	قطر هیدرولیک (m)
e_r	بردار یکه
e_θ	بردار یکه
f	ترم نیرویی در معادلات مومنتوم (N/m^3)
g	شتاب جاذبه (m/s^2)
H	شدت میدان مغناطیسی (A/m)
h	ضریب انتقال حرارت ($W/(m^2.K)$)
H	پارامتر در شکل ۱(m)
K	هدایت حرارتی (W/m.K)
k_B	ثابت بولتزمن (J/K)
L	پارامتر در شکل ۱(m)
L(α)	پارامتر لانژوین
M	مغناطش ماده (A/m)
m	قدرت دوقطبی مغناطیسی (A.m)
M_d	دامنه مغناطش (A/m)
M_s	مغناطش اشباع (T)
Nu	عدد ناسلت
p	فشار (Pa)
r	شعاع در مختصات قطبی(m)
Re	عدد رینولدز
S	پارامتر در شکل یک (m)
T	دما (^oC, K)
q”	شار گرمایی (W/m^2)
Tin	دمای ورودی (^oC)
Tw	دمای دیوار (^oC)
u	سرعت در راستای طولی (m/s)
U_{in}	سرعت ورودی (m/s)
v	سرعت در راستای مختصات عرضی (m/s)
$\vec{V}$	بردار سرعت (m/s)
$\overline{V}$	سرعت متوسط (m/s)
V_m	پتانسیل اسکالر مغناطیسی (A)
x	مختصات طولی
y	مختصات محوری

علائم یونانی

μ	ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)
μ_0	نفوذپذیری در خلأ (N/A^2)
α	لانژوین پارامتر
θ	زاویه در مختصات قطبی

چگالی (kg/m^3)	ρ	مغناطش	Magnetization
غلظت فروسیال (%)	φ	بردار میدان مغناطیسی	Magnetic field vector
زیرنویس		پتانسیل اسکالر مغناطیسی	Magnetic scalar potential
هیدرولیک	h	فروتک	Ferrotec
ورودی	in	انسیس فلوئنت ۲۰۲۱	Ansys Fluent 2021 R1
دیوار	w	**تقدیر و تشکر**	
واژه‌نامه			
لانژوین	Langevin		

مراجع

[1] A. Siricharoenpanich, S. Wiriyasart, P. Naphon, "Study on the thermal dissipation performance of GPU cooling system with nanofluid as coolant," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 25, p. 100904, (2021) doi: 10.1016/j.csite.2021.100904.

[2] F. M. Naduvilakath-Mohammed, R. Jenkins, G. Byrne, A. J. Robinson, "Closed loop liquid cooling of high-powered CPUs: A case study on cooling performance and energy optimization," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 50, p. 103472, (2023). doi: 10.1016/j.csite.2023.103472.

[3] M. Gorzin, A. A. Ranjbar, and M. J. Hosseini, "Experimental and numerical investigation on thermal and hydraulic performance of novel serpentine minichannel heat sink for liquid CPU cooling," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3375–3385, (2022), doi:10.1016/j.egyr.2022.02.179.

[4] H. Bahrami, M. Ghaedi, A. Attarzadeh, "Employing nonuniform magnetic fields to improve energy transfer of flow after a sudden expansion inside a miniature channel: A hydrothermal study," *Engineering Reports*, vol. n/a, no. n/a, p. e12847, doi: 10.1002/eng2.12847.

[5] R. W. Mei, A. Plotkin, "Navier-Stokes solutions for laminar incompressible flows in forward-facing step geometries," *AIAA Journal*, vol. 24, no. 7, pp. 1106–1111, 1986, doi: 10.2514/3.9399.

[6] H. Stüer, A. Gyr, W. Kinzelbach, "Laminar separation on a forward facing step," *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 18, no. 4, pp. 675–692, (1999), doi: 10.1016/S0997-7546(99)00104-1.

[7] D. Wilhelm, C. Hrtel, and L. Kleiser, "Computational analysis of the two-dimensionalthree-dimensional transition in forward-facing step flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 489, pp. 1–27, (2003), doi: 10.1017/S0022112003004440.

[8] J. G. Barbosa-Saldaña, N. K. Anand, "Flow Over a Three-Dimensional Horizontal Forward-Facing Step," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 1–17, (2007), doi:10.1080/10407780701446473.

[9] K. Javaherdeh, H. Karimi, "Numerical analysis of the obstacle effect with different geometry on the heat transfer of nanofluid flow in a rectangular channel," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 51–64, (2023). doi:10.22067/jacsm.2023.69607.1020.

[10] K. Javaherdeh, H. Karimi, "Numerical analysis of mix convection of sodium alginate non-Newtonian fluid with Al2O3 nanoparticle in a channel with block," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 93–110, (2021). doi:10.22067/jacsm.2021.40042.

[11] H. Sayehvand and A. Basiri Parsa, "Numerical and Analytical Investigation of Thermal Dispersion Effects on the Heat Transfer of Nanofluid flow inside a Channel," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 29, no. 2, pp. 21–40, (2018), doi:10.22067/fum-mech.v29i2.58387.

[12] A. Ahmadi Nadooshan, D. Bahrami, M. Bayareh, "Numerical study of forced convection in a microchannel in the presence of nanofluid using the slip condition," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 4, pp. 53–64, (2022). doi:10.22067/jacsm.2022.77928.1133.

[13] A. Sh. Kherbeet, H. A. Mohammed, B. H. Salman, H. E. Ahmed, O. A. Alawi, M. M. Rashidi, "Experimental study of nanofluid flow and heat transfer over microscale backward- and forward-facing steps," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 65, pp. 13–21, (2015). doi:10.1016/j.expthermflusci.2015.02.023.

[14] A. Sh. Kherbeet, H. A. Mohammed, K. M. Munisamy, B. H. Salman, "Combined convection nanofluid flow and heat transfer over microscale forward-facing step," *International Journal of Nanoparticles*, vol. 7, no. 1, p. 1, (2014), doi:10.1504/IJNP.2014.062008.

[15] A. Barman and S. K. Dash, "Effect of obstacle positions for turbulent forced convection heat transfer and fluid flow over a double forward facing step," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 134, pp. 116–128, (2018). doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.009.

[16] K. U. Rehman, W. Shatanawi, A. B. Çolak, "Thermal analysis of flowing stream in partially heated double forward-facing step by using artificial neural network," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 37, p. 102221, (2022), doi:10.1016/j.csite.2022.102221.

[17] H. Talaei and H.-R. Bahrami, "Backward-facing step heat transfer enhancement: a systematic study using porous baffles with different shapes and locations and corrugating after step wall," *Heat and Mass Transfer*, vol. 59, no. 12, pp. 2213–2230, (2023).

[18] H. Togun, G. Ahmadi, T. Abdulrazzaq, A. J. Shkarah, M. S. Newaz Kazi, A. Badarudin, M. R. Safaei, "Thermal performance of nanofluid in ducts with double forward-facing steps," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 47, pp. 28–42, (2015), doi:10.1016/j.jtice.2014.10.009.

[19] H. Togun, R. Homod, T. Abdulrazzaq, "Hybrid Al2O3-Cu/water nanofluid flow and heat transfer over vertical double forward-facing step," *Thermal Science*, vol. 25, no. 5 Part A, pp. 3517–3529, (2021), doi: 10.2298/TSCI201130080T.

[20] R. Ganguly, S. Sen, I. K. Puri, "Heat transfer augmentation using a magnetic fluid under the influence of a line dipole," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 271, no. 1, pp. 63–73,(2004.) doi: 10.1016/j.jmmm.2003.09.015.

[21] M. Ghasemian, Z. Najafian Ashrafi, M. Goharkhah, M. Ashjaee, "Heat transfer characteristics of Fe_3O_4 ferrofluid flowing in a mini channel under constant and alternating magnetic fields," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 381, pp. 158–167, (2015.) doi:10.1016/j.jmmm.2014.12.078.

[22] M. Ashjaee, M. Goharkhah, L. A. Khadem, R. Ahmadi, "Effect of magnetic field on the forced convection heat transfer and pressure drop of a magnetic nanofluid in a miniature heat sink," *Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 7, pp. 953–964, (2015). doi: 10.1007/s00231-014-1467-1.

[23] M. Bezaatpour, M. Goharkhah, "A magnetic vortex generator for simultaneous heat transfer enhancement and pressure drop reduction in a mini channel," *Heat Transfer*, vol. 49, no. 3, pp. 1192–1213, (2020). doi: 10.1002/htj.21658.

[24] R. K. Shah, S. Khandekar, "Exploring ferrofluids for heat transfer augmentation," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 475, pp. 389–400, (2019). doi:10.1016/j.jmmm.2018.11.034.

[25] Z. Mehrez, A. El Cafsi, "Forced convection magnetohydrodynamic Al_2O_3–Cu/water hybrid nanofluid flow over a backward-facing step," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 135, no. 2, pp. 1417–1427, (2019). doi: 10.1007/s10973-018-7541-z.

[26] M. Atashafrooz, M. Sheikholeslami, H. Sajjadi, A. Amiri Delouei, "Interaction effects of an inclined magnetic field and nanofluid on forced convection heat transfer and flow irreversibility in a duct with an abrupt contraction," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 478, pp. 216–226, (2019). doi: 10.1016/j.jmmm.2019.01.111.

[27] F. Selimefendigil, H. F. Öztop, "Hydro-thermal performance of CNT nanofluid in double backward facing step with rotating tube bundle under magnetic field," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 185, p. 105876, (2020), doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105876.

[28] A. Allahverdizadeh, B. Dadashzadeh, H. Azimzadeh, "Nonlinear Vibration Analysis of Fluid Conveying Microtube under Parametric Magnetic Excitation," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 31, no. 1, pp. 69–86, (2020). doi:10.22067/fum-mech.v31i1.80049.

[29] F. Moradi and P. Pournaderi, "Simulation of nanofluid flow at low Reynolds number in a microchannel with one-sided sudden expansion under the effect of a magnetic field," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 85–100, (2023). doi:10.22067/jacsm.2023.79298.1143.

[30] S. Bazkhane, I. Zahmatkesh, "Heat Transfer of Nanofluid in a Channel with Magnetic Field and Porous Obstacle using the Darcy-Brinkman-Forchheimer Model in the LBM Method," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 153–172, (2021). doi: 10.22067/jacsm.2021.56842.0.

[31] H. Kazemi, Moghadam, S. S. Baghbani, S. Samadzadeh, H. Babazadeh, "Study of thermal performance of a ferrofluid with multivariable dependence viscosity within a wavy duct with external magnetic force," *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, vol. 143, no. 5, pp. 3849, (2021) doi: 10.1007/s10973-020-09324-4.

[32] Y. Menni, M. Ghazvini, H. Ameur, M. Kim, M. H. Ahmadi, M. Sharifpur, "Combination of baffling technique and high-thermal conductivity fluids to enhance the overall performances of solar channels," *Engineering with Computers*, vol. 38, no. S1, pp. 607–628, (2022), doi:10.1007/s00366-020-01165-x.

[33] M. Malekan, A. Khosravi, S. Syri, "Heat transfer modeling of a parabolic trough solar collector with working fluid of Fe_3O_4 and CuO/Therminol 66 nanofluids under magnetic field," *Applied Thermal Engineering*, vol. 163, p. 114435, (2019). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114435.

[34] P. A. Petrini, D. R. Lester, G. Rosengarten, "Enhanced laminar heat transfer via magnetically driven ferrofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 217, p. 124703, (2023), doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124703.

[35] R. K. Shah and S. Khandekar, "Manipulation of Taylor bubble flow in a magneto-fluidic system," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 593, p. 124589, (2020), doi:10.1016/j.colsurfa.2020.124589.

[36] M. Goharkhah, M. Esmaeili, M. Ashjaee, "Numerical Simulation and Optimization of Forced Convection Heat Transfer of Magnetic Nanofluid in a Channel in the Presence of a Non-Uniform Magnetic Field," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 11-19, (2018).

[37] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics, Dover edition. Mineola*, New York: Dover Publications, Inc, 2014, [E.book].

[38] R. K. Shah, J. K. Drave, S. Khandekar, "Thermal Transport in Laminar Convective Flow of Ferrofluids in the Presence of External Magnetic Field," *Journal of Heat Transfer*, vol. 143, no. 6, p. 062101, (2021). doi: 10.1115/1.4050411.

[39] H. K. Pazarlıoğlu, R. Ekiciler, K. Arslan, N. Adil Mohammed Mohammed, "Exergetic, Energetic, and entropy production evaluations of parabolic trough collector retrofitted with elliptical dimpled receiver tube filled with hybrid nanofluid," *Applied Thermal Engineering*, vol. 223, p. 120004, (2023). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120004.

[40] A. Dahmani, J. Muñoz-Cámara, S. Laouedj, J. P. Solano, "Heat transfer enhancement of ferrofluid flow in a solar absorber tube under non-uniform magnetic field created by a periodic current-carrying wire," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 101996, (2022). doi:10.1016/j.seta.2022.101996.

[41] https://ferrofluid.ferrotec.com/products/ferrofluid-emg/water/

[42] H. Bahrami, M. Ghaedi, "Using a non-uniform magnetic field to enhance heat transfer before a sudden compression in A 2D milli-channel," *Journal of Enhanced Heat Transfer*, vol. 31, no. 4, pp. 45–69, (2024). doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2023050891.

[43] B. F. Armaly, F. Durst, J. C. F. Pereira, B. Schönung, "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 127, no. 1, p. 473, (1983), doi:10.1017/S0022112083002839.

[44] G. Biswas, M. Breuer, F. Durst, "Backward-Facing Step Flows for Various Expansion Ratios at Low and Moderate Reynolds Numbers," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 126, no. 3, pp. 362–374, (2004), doi: 10.1115/1.1760532.

[45] M. M. Klazly, G. Bognár, "CFD investigation of backward - facing step nanofluid flow," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1564, no. 1, p. 012010, (2020). doi: 10.1088/1742-6596/1564/1/012010.

[46] W. Wu and A. Kumar, "Numerical Investigation of Nanofluid Flow over a Backward Facing Step," *Aerospace*, vol. 9, no. 9, p. 499, (2022.) doi: 10.3390/aerospace9090499.

[47] M. Bezaatpour, M. Goharkhah, "Effect of magnetic field on the hydrodynamic and heat transfer of magnetite ferrofluid flow in a porous fin heat sink," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 476, pp. 506–515, (2019), doi: 10.1016/j.jmmm.2019.01.028.

[48] O. A. Hussein, “Laminar Mixed Convective Nanofluid Flow in a Channel with Double Forward-Facing Steps: A Numerical Simulation Study,” *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, vol. 24, no. 1, pp. 38–49, **(**2017**)**, doi: 10.25130/tjes.24.1.04.

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

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

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Effect of Using Vortex Generator in the Flow Path of Combustion Product in the Chimney of a Natural Gas Wall-Mounted Water Heater on Flow Hydrodynamics and Improving Heat Transfer

Research Article

Seyed Hadi Pourhoseini[1], Mojtaba Baghban [2]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.85997.1231

Abstract *In this study, the effect of using vortex generators in the form of semicircular plates with different angles and at different longitudinal distances in the chimney of a laboratory furnace with natural gas fuel on the hydrodynamics of the flow and the rate of heat transfer from combustion products has been investigated experimentally and numerically. The investigated parameters were angles for blades and the number of blades. In order to properly simulate the process, the three-dimensional model of the geometry, including the blades producing the vortex and the middle chamber of the chimney, has been prepared in the Gambit software and used in the modeling of the process by the Fluent software. The governing equations for the flow of combustion products entered the chimney and passed over the blades include the equations of conservation of mass, momentum, energy and kinetic energy of turbulence and its dissipation. To model the turbulence, the standard k-ε model is used as one of the simplest yet most accurate and widely used turbulence models in the simulation of turbulent flows. The results show that vortex generators with reducing the speed in the central area of the chimney and increasing the residence time of the combustion products and also by directing the flow towards the boundary layer adjacent to the wall, increases the heat transfer to the chimney. The angle of 55º and the number of blades 7 was the optimum condition that prevents the flow of exhaust gases from returning and the concentration of carbon monoxide was lower than standard level. The results revealed that in optimum case, by changing the gas flow rate in the range of 0.5 to 0.75 m^3/hr, the heat transfer to the chimney wall increases by 21% on average.*

Key Words Vortex generator, Combustion products, Heat transfer enhancement, Blade angle, Number of blades.

1- Introduction

Natural gas flame has poor radiation heat transfer characteristics. Therefore, the heat transfer efficiency of the flame is low and the combustion products in the chimney have high temperatures, and heat recovery from the flow of gases passing through the chimney will prevent heat loss in gas combustion systems. Installation of twisted tapes and vortex generators is the most common method for improving heat transfer in internal flows. Twisted tapes by creating rotation in the flow and the rotational movement of the flow on the surface increase the contact surface and contact time between the fluid and the surface, leading to higher heat transfer.

The low thermal efficiency of gas-burning equipment produced in the country, including wall-mounted gas-burning water heaters, explains the necessity of optimizing this equipment to save on the consumption of natural gas as the cleanest source of fossil fuel. As mentioned, the use of vortex generators is one of the most optimal ways to enhance the heat transfer coefficient and the rate of heat transfer to the wall in internal flows. Considering that in wall-mounted gas water heaters, the resulting combustion products are from the burning of natural gas while passing through the central chimney of the water heater. They exchange heat with the wall of the tank, increasing the temperature of the water inside the tank. Therefore, the use of these vortex-producing vanes in the flow path of the combustion products passing through the chimney can increase the heat transfer coefficient of the combustion products and the heat transfer rate to the wall of the water heater by creating turbulence, reducing the flow speed in the central area of the chimney, and increasing the flow speed in the boundary layer adjacent to the chimney wall. Consequently, in the present research, the effect of using vortex generators as semicircular plates with different angles and at diverse length distances in the chimney of a natural gas wall-mounted water heater on the hydrodynamics of the flow and rate of heat transfer from combustion products is investigated. Moreover, the optimal arrangement for the vortex blades in terms of the number and angle of the blades was obtained by combining the results with the laboratory data.

*Manuscript received: November 28, 2023. Revised, February 20, 2024, Accepted, March 19, 2024.

[1]Corresponding author: Associate Professor at Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

Email: hadipoorhoseini@gonabad.ac.ir

[2] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

2- Numerical simulation

In order to simulate the effect of using vortex generator in the middle chimney of the water heater, a three-dimensional model, including the vortex vanes and the middle chamber of the water heater chimney was prepared in Gambit software and was used in process modeling by Fluent software. Figure 1 shows the geometry of the problem consisting of the chimney and vortex blades and Table 1 shows the geometric quantities and dimensions of the problem.

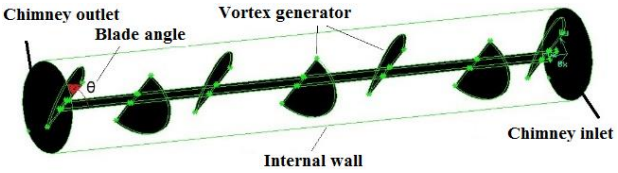


Figure 1. Geometry of chimney and vortex generator

Table 1. Dimensions of chimney and vortex generator

Chimney length	720 mm
Chimney diameter	110 mm
Blades radius	50 mm
Blades number	3-4-7
Blades angle	30º-45º-55º
Blades thickness	3 mm

The boundary conditions used in the simulation include the velocity inlet boundary condition at the entrance of the combustion products to the chimney, the out flow boundary condition at the exit of the chimney, and the wall boundary condition for the fins and the chimney wall. It should be noted that due to the lack of boundary conditions at the exit of the chimney, the out flow boundary condition was used. This boundary should be used more in the simulation of developed flows, and the development of the boundary is acceptable considering the geometry of the problem and the entangled regime of the flow caused by the vortex generator. Moreover, the thermal boundary condition of the type of convection heat transfer on the external wall of the chimney was used and the convection heat transfer coefficient "h" was calculated and replaced from the Churchill and Chu's equation. A standard k-ε model was used to model turbulence. Coupling between pressure and speed was performed with the help of simple algorithm. In addition, the discretization of pressure was performed using the Presto method. The discretization of other equations was done first by the upstream method of the first order, followed by the upstream method of the second order. The following discount coefficients were applied for energy and eddy viscosity of 0.5 and 0.8, respectively. The convergence condition of 10^{-4} was considered for all equations except the energy equation. This value is 10^{-6} for the energy equation. To ensure the accuracy of the simulation and validation of the results obtained from the modeling, a laboratory sample of the simulated blades was made and installed inside the middle chimney of a gas wall-mounted water heater and the heat transfer flux on the chimney wall in the case of using vortex generator was determined and compared with the corresponding modeling results.

3- Results

Figure 2 shows the effect of the number and angle of the vortex generator blades on the rate of heat transfer to the chimney wall. As can be seen, an increase in the number of blades augments the rate of heat transfer to the wall. Increasing the angle of the blades also raised the rate of heat transfer to the chimney wall. Furthermore, with the increase in the number of blades, the effect of blade angle on improving the heat transfer rate also increases. The important point is that with a rise in the blades number and the angle of the blades, the amount of pressure drop increases, which augments the possibility of flue gas flow reversal. Consequently, the blade angle of 55 and the blade number of seven are the optimal mode that prevents the reverse flow of exhaust gases.

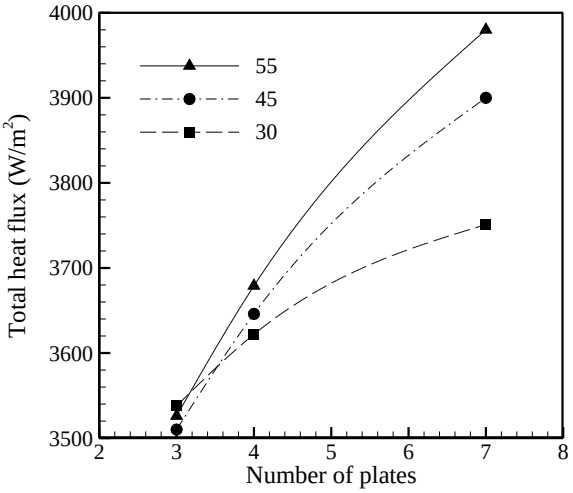


Figure 2. Effect of the number and angle of blades on the rate of heat transfer to the chimney wall

Figure 3 shows the heat flux transferred to the chimney wall with and without the vortex generator and for different gas flow rates. As can be seen, the use of vortex generator in the path of combustion products passing through the chimney increases the heat transfer to the chimney wall by an average of 21%.

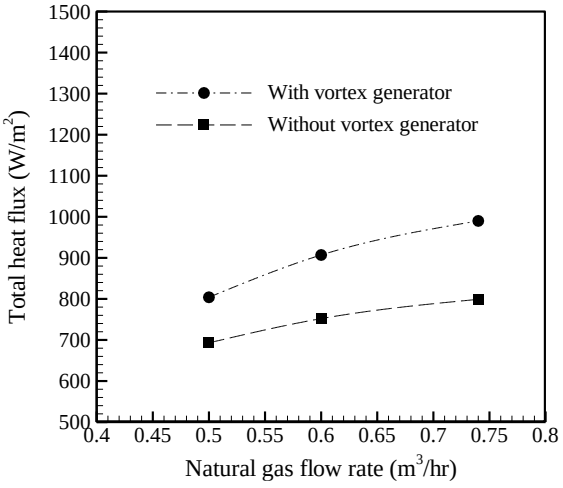


Figure 3. Effect of gas flow rate on the rate of heat transfer to the chimney wall

Figure 4 shows the distribution of the flow speed of combustion products in the chimney using vortex generator. As can be seen, vortex generator reduces speed in the central region of the chimney. Moreover, it disturbs and directs the flow towards the boundary layer adjacent to the chimney wall which increases the flow speed in the vicinity of the wall and consequently raises the convection heat transfer to the chimney wall.

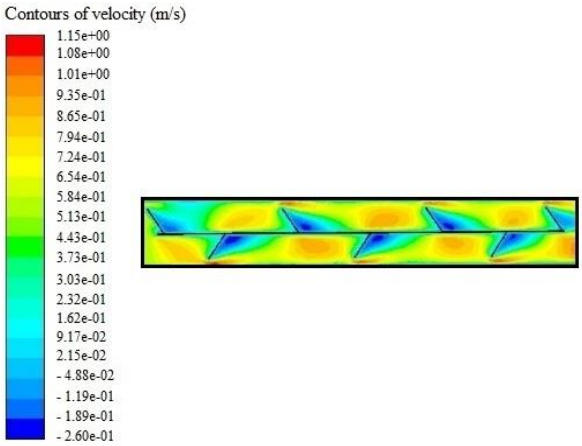


Figure 4. Combustion products flow distribution in the chimney using optimal vortex generator

3- Conclusion

The effect of using vortex generators as semicircular plates with different angles and at diverse longitudinal distances in the chimney of a gas wall-mounted water heater on the hydrodynamics of the flow and the rate of heat transfer from the combustion products to the wall was investigated experimentally and numerically.

1- Placing a vortex generator reduces flow speed in the central region of the chimney and increases the residence time of the combustion products. Furthermore, it disturbs and directs the flow towards the boundary layer adjacent to the chimney wall which increases the flow speed in the vicinity of the wall and consequently raises the convection heat transfer to the chimney wall.

2- In general, with an increase in the number of vortex generator blades, the rate of heat transfer to the wall augments. In addition, increasing the angle of the blades raises the rate of heat transfer to the chimney wall. Furthermore, with a rise in the number of blades, the effect of the angle of the blades on improving the rate of heat transfer increases.

3- By augmenting the number and angle of the blades, the amount of pressure drop and the possibility of the return of the flue gas flow increase. Consequently, the blade angle of 55 and the blade number of seven are the optimal mode that prevents the reverse flow of exhaust gases.

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد

مطالعه اثر استفاده از پره‌های ایجاد کننده اغتشاش در دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری بر هیدرو دینامیک جریان و بهبود انتقال حرارت*

مقاله پژوهشی

سید هادی پورحسینی[۱] مجتبی باغبان[۲]

***DOI**: 10.22067/jacsm.2024.85997.1231*

چکیده *در تحقیق حاضر تأثیر استفاده از تولیدکننده‌های گردابه به شکل صفحات نیم‌دایره‌ای با زاویه و فواصل طولی مختلف بر هیدرودینامیک جریان و آهنگ انتقال حرارت از محصولات احتراق به دیواره دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری به شیوه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر تعداد و زاویه پره‌ها بر آهنگ انتقال حرارت به دیواره تعیین شده است. به منظور شبیه‌سازی مناسب فرایند، مدل سه‌بعدی هندسه شامل پره‌های تولیدکننده گردابه و محفظه میانی دودکش در نرم‌افزار Gambit تهیه و در مدل‌سازی فرایند توسط نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان محصولات احتراق ورودی به دودکش و عبوری از روی پره‌های تولید کننده گردابه شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی و انرژی جنبشی اغتشاش و اتلاف آن است. همچنین برای مدل‌سازی تلاطم (اغتشاش) از مدل k-ε استاندارد به عنوان یکی از ساده‌ترین و در عین حال دقیق‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های اغتشاش در شبیه سازی جریان‌های مغشوش استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که قرار دادن پره‌های ایجاد کننده اغتشاش (تولیدکننده گردابه) در دودکش، ضمن کاهش سرعت در ناحیه مرکزی دودکش و افزایش زمان ماند محصولات احتراق، با مغشوش کردن و هدایت جریان به سمت لایه مرزی مجاور دیواره، باعث افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش می‌شود. همچنین آرایش ۷ پره تولیدکننده گردابه با زاویه ۵۵ درجه نسبت به راستای طولی حالت بهینه‌ای است که علاوه بر افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره برگشت جریان محصولات احتراق نیز رخ نمی‌دهد و غلظت منوکسیدکربن مطابق استاندارد آزمون ایمنی عملکردی آبگرمکن‌های گازی مخزن‌دار کمتر از حد مجاز است. نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که در آرایش پره بهینه، با تغییر دبی گاز در محدوده ۰/۵ تا ۰/۷۵ متر مکعب بر ساعت، انتقال حرارت به دیواره دودکش به طور متوسط ۲۱٪ افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی پره تولیدکننده گردابه، محصولات احتراق، بهبود انتقال حرارت، زاویه پره، تعداد پره‌ها.

مقدمه

انرژی حرارتی یکی از مهم‌ترین شکل‌های انرژی است که کاربرد فراوانی در صنعت و مصارف خانگی دارد. علی‌رغم توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، تولید انرژی حرارتی به وسیله احتراق سوخت‌های فسیلی مهم‌ترین منبع تولید انرژی حرارتی بوده و محدود بودن و کاهش سریع منابع سوخت‌های فسیلی لزوم بهبود کارایی تجهیزات احتراقی به منظور کاهش مصرف سوخت را ضروری می‌کند [1-3]. وجود منابع عظیم گازی در کشور و سازگاری سوخت گاز طبیعی با محیط زیست (به دلیل تولید آلاینده‌های کمتر در فرایند احتراق) باعث شده تا استفاده از سوخت گاز طبیعی به عنوان پاک‌ترین سوخت فسیلی برای تولید انرژی حرارتی در صنعت و مصارف خانگی رو به گسترش باشد [4]. این درحالی است که بسیاری از این سیستم‌های حرارتی بر پایه سوخت‌های مایع (گازوئیل، مازوت) و جامد (ذغال سنگ) طراحی شده و جایگزین کردن سوخت گاز طبیعی به جای سوخت‌های فسیلی مایع و جامد باعث کاهش شدید راندمان حرارتی این تجهیزات شده است که این موضوع ضرورت پژوهش در مورد روش‌هایی که بهبود راندمان حرارتی و در نتیجه

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۲/۲۹ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.
Email: hadipoorhoseini@gonabad.ac.ir
(۲) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.

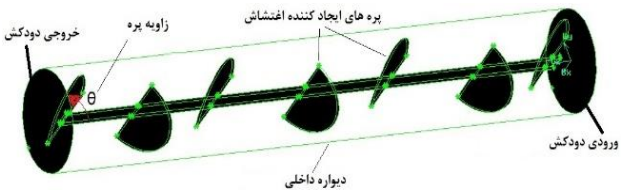
کاهش مصرف گاز طبیعی در سیستم‌های حرارتی گازسوز را تبیین می‌نماید، مشخص می‌کند. [7-5]. به دلیل خصوصیات انتقال حرارت تابشی ضعیف شعله گاز طبیعی راندمان انتقال حرارتی شعله پایین بوده و محصولات احتراق در دودکش دارای دمای بالایی هستند و بازیابی حرارت از جریان گازهای عبوری از دودکش باعث جلوگیری از اتلاف حرارتی در سیستم‌های احتراقی گاز سوز خواهد شد. استفاده از نوارهای پیچ‌خورده و سطوح تولیدکننده گردابه متداول‌ترین روش‌ها برای بهبود انتقال گرما در جریان‌های داخلی است [8]. نوارهای پیچ‌خورده با ایجاد چرخش در جریان و حرکت چرخشی جریان بر روی سطح باعث افزایش سطح تماس و افزایش زمان تماس سیال و سطح می‌شوند که این عوامل باعث افزایش انتقال حرارت خواهند شد. پارامترهای هندسی نظیر طول، عرض، ضخامت، زاویه و جهت پیچش سطح نسبت به راستای جریان عبوری از روی آن متغیرهایی هستند که تأثیر آن‌ها بر بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ساها و همکاران [9] اثر نسبت پیچش نوار و عرض نوار را بر بهبود انتقال حرارت در یک لوله حلقوی بررسی کرده و دریافتند که کاهش عرض نوار نرخ بهبود انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. ایاسما و همکاران [10] نیز در تحقیقات خود دریافتند که کاهش نسبت پیچش باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. در پژوهشی دیگر ایامسا و همکاران [11] اثر نسبت طول را بر بهبود ضریب انتقال حرارت بررسی کردند و دریافتند که نوارهای با نسبت طول کوچک با ثابت نگه داشتن نسبت پیچش در مقایسه با نوارهای با نسبت طول بزرگ باعث افزایش چرخش جریان و بهبود ضریب انتقال حرارت در ناحیه ورودی و ابتدایی لوله می‌شوند و این در حالی است که نوارهای با نسبت طول بزرگ، چرخش جریان در تمام طول لوله را بهبود می‌بخشند. سارادا و همکاران [12] در تحقیق خود مشاهده کردند که عرض نوار پیچ خورده به طور مؤثری بر نرخ انتقال حرارت مؤثر است به طوری که افزایش عرض نوار نرخ انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. اسماعیلزاده و همکاران [13] اثر ضخامت نوار پیچ‌خورده را بر بهبود انتقال حرارت در حضور نانوسیال بررسی و دریافتند که افزایش ضخامت نوار باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت و فاکتور عملکرد حرارتی می‌شود. ایامسا و پرومونگ [14] اثر استفاده از آرایه‌های متناوب نوارهای پیچ‌خورده به صورت ساعتگرد و پادساعتگرد و با زاویه پیچش‌های مختلف را بر آهنگ انتقال حرارت در یک لوله بررسی و دریافتند که استفاده از این آرایش نواری در مقایسه با نوار پیچ‌خورده معمولی باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت می‌شود. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که افزایش زاویه پیچش باعث بهبود نرخ انتقال حرارت خواهد شد. پاتیل و ویجایبابو [15,16] آزمایش‌هایی را برای درک اثر نسبت پیچش بر بهبود نرخ انتقال حرارت انجام داده و مشاهده کردند که کاهش نسبت پیچش باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت می‌شود. آن‌ها همچنین نوارهای پیچ‌خورده با نسبت پیچش افزایشی- کاهشی و کاهشی- افزایشی را نیز آزمایش کرده و دریافتند که نوار پیچ خورده با نسبت پیچش افزایشی- کاهشی بیشترین فاکتور عملکرد حرارتی را دارد. همچنین تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که نوار پیچ‌خورده ذخیره انرژی را نیز افزایش می‌دهد. سیواشانموگام و همکاران [17,18] اثر استفاده از نوارهای پیچ‌خورده مارپیچی با نسبت پیچش مختلف را بر بهبود نرخ انتقال حرارت در لوله‌های ساده بررسی کردند و بیان داشتند که این نوارها باعث بهبود نرخ انتقال حرارت و افزایش فاکتور عملکرد انتقال حرارت می‌شوند. رحیمی و همکاران [19] تحقیقاتی را بر روی عملکرد حرارتی نوارهای پیچ‌خورده بهبود یافته شامل نوار پیچ‌خورده سوراخ‌دار، بریده شده و دندانه‌دار انجام داده و دریافتند که نوارهای پیچ‌خورده دندانه‌دار به دلیل ایجاد تلاطم بیشتر در جریان در نزدیک دیواره لوله بهترین عملکرد حرارتی را در مقایسه با دیگر نوارها دارند. شبانیان و همکاران [20] به تحلیل بهبود نرخ انتقال حرارت با استفاده از سه نوع المان داخل شونده در لوله با عنوان نوار پیچ‌خورده ساده، نوار پیچ‌خورده دندانه‌دار و المان پروانه‌ای پرداخته و مشاهده نمودند که المان پروانه‌ای در مقایسه با نوار پیچ‌خورده دندانه‌دار و نوار پیچ‌خورده ساده بهترین عملکرد حرارتی را دارد. دشموخ و ودولا [21] استفاده از تولیدکننده گردابه برای افزایش اغتشاش در جریان داخل لوله و افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره لوله را به جای استفاده از نوار پیچ‌خورده پیشنهاد داده و گزارش نمودند که استفاده از تولیدکننده گردابه باعث افزایش قابل توجه

عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر روی دیواره لوله و در نتیجه افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره لوله می‌شود. یانگ و چن [22] اثر استفاده از صفحات شیاردار (راه راه) به شکل V و با زاویه‌های مختلف را به عنوان تولیدکننده گردابه بر بهبود انتقال حرارت بررسی کرده و دریافتند که با افزایش زاویه صفحه (جمع شدن شیارها) نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. کالیسکان [23] به مقایسه تولیدکننده گردابه به شکل لبه‌های مستطیلی و مثلثی که در امتداد طولی بر روی یک صفحه پانچ شده بودند و تأثیر آن بر بهبود انتقال حرارت در یک کانال مکعب مستطیلی شکل پرداخت. او همچنین اثر زاویه لبه‌های مستطیلی و مثلثی با صفحه را نیز بر بهبود عملکرد حرارتی مورد بررسی قرار داد. نتایج به دست آمده نشان داد که هر دو تولیدکننده گردابه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی جریان عبوری در کانال را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهند و باعث افزایش نرخ انتقال حرارت به میزان ۲۳ تا ۵۵ درصد می‌شوند. فاکتور عملکرد حرارتی برای تولیدکننده‌های گردابه به شکل لبه‌های مثلثی در زاویه ۴۵ درجه ۲/۹۲ بود و این مقدار برای تولید کننده‌های گردابه به شکل لبه‌های مستطیلی ۲/۸۵ به دست آمد. اگر چه هر دو تولیدکننده گردابه به دلیل انسداد جریان و ایجاد جریان برگشتی باعث افزایش تلفات (افت فشار) جریان عبوری می‌شوند ولی تولیدکننده‌های گردابه به شکل لبه‌های مستطیلی افت فشار و تلفات بسیار بیشتری را نسبت به تولیدکننده‌های گردابه به شکل لبه مثلثی ایجاد می‌کنند. همچنین با افزایش عدد رینولدز جریان میزان افت فشار افزایش می‌یابد. مین و همکاران [24] با بریدن گوشه‌های تولیدکننده گردابه با لبه مستطیلی به آرایش بهینه‌ای رسیدند که باعث کاهش افت فشار و بهبود انتقال حرارت در مقایسه با تولیدکننده گردابه با لبه مستطیلی می‌شد. اسکولانگ و همکاران [25] تأثیر استفاده از تولیدکننده‌های گردابه به شکل مثلثی از نوع پیشرو و پسرو و با زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه را بر بهبود نرخ انتقال حرارت در یک گرمکن خورشیدی بررسی کرده و دریافتند که عملکرد حرارتی پره‌های نوع پیشرو نسبت به پسرو بهتر بوده و همچنین در هر دو حالت زاویه ۴۵ درجه بیشترین فاکتور عملکرد حرارتی را به دست می‌دهد.

بازدهی حرارتی پایین تجهیزات گازسوز تولیدی در کشور از جمله آبگرمکن‌های گازسوز دیواری مخزنی لزوم بهینه‌سازی این تجهیزات برای صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی به عنوان پاکترین منبع سوخت فسیلی را تبیین می‌کند. همان طور که اشاره شد استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه یکی از بهینه‌ترین راه های افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و آهنگ انتقال حرارت به دیواره در جریان‌های داخلی است و با توجه به اینکه در آبگرمکن‌های گازسوز دیواری مخزنی محصولات احتراق حاصل از سوختن گاز طبیعی در حین عبور از دودکش میانی آبگرمکن با دیواره مخزن تبادل حرارت نموده و از این طریق باعث افزایش دمای آب داخل مخزن می‌شوند، بنابراین استفاده از این پره‌های تولیدکننده گردابه در مسیر جریان محصولات احتراق عبوری از دودکش می‌تواند از طریق ایجاد اغتشاش و کاهش سرعت جریان در ناحیه مرکزی دودکش و افزایش سرعت جریان در لایه مرزی مجاور دیواره دودکش باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محصولات احتراق و افزایش نرخ انتقال حرارت به دیواره آبگرمکن شود. بر این اساس، در تحقیق حاضر تأثیر استفاده از تولیدکننده‌های گردابه به شکل صفحات نیم‌دایره‌ای با زاویه‌های مختلف و در فواصل طولی مختلف در دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری مخزنی بر هیدرودینامیک جریان و آهنگ انتقال حرارت از محصولات احتراق مورد بررسی قرار گرفته و با ترکیب نتایج با داده‌های آزمایشگاهی آرایش بهینه برای پره‌های تولید کننده گردابه از نظر تعداد و زاویه پره‌ها به دست آمده است.

شبیه‌سازی عددی

به منظور شبیه‌سازی تأثیر استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه در دودکش میانی آبگرمکن، یک مدل سه‌بعدی شامل پره‌های تولیدکننده گردابه و محفظه میانی دودکش آبگرمکن در نرم‌افزار Gambit تهیه و در مدل‌سازی فرایند توسط نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. برای شبکه‌بندی هندسه کوره از شبکه‌بندی نوع (Tet/TGrid) استفاده شده است. شکل (۱) هندسه مسئله متشکل از دودکش و پره‌های تولیدکننده گردابه و جدول (۱) کمیت‌های هندسی و ابعاد مسئله را نشان می‌دهد.

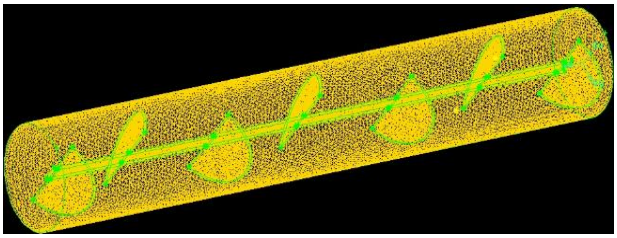


شکل ۱ هندسه مسئله شامل دودکش و پره‌های تولیدکننده گردابه

جدول ۱ کمیت‌های هندسی مسئله

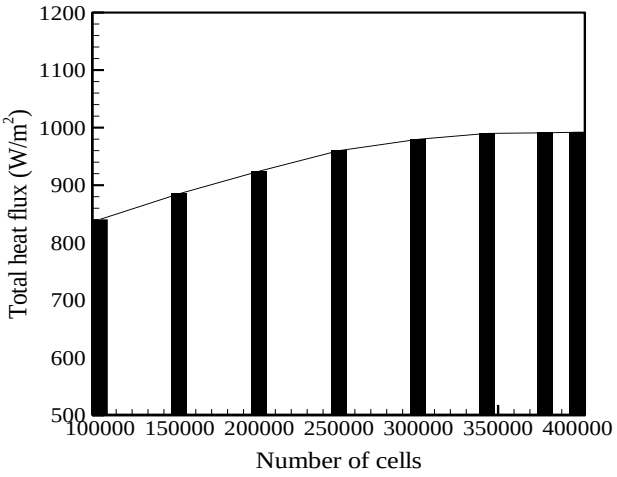
طول دودکش	720 mm
قطر دودکش	110 mm
شعاع پره‌ها	50 mm
تعداد پره‌ها	3-4-7
زاویه پره‌ها	30º-45º-55º
ضخامت پره‌ها	3 mm

شکل (۲) تصویری از شبکه‌بندی هندسه مسئله شامل پره‌های تولیدکننده گردابه به شکل نیم‌دایره را در درون محفظه استوانه‌ای شکل دودکش نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به منظور بررسی اثر تعداد و زاویه پره‌ها بر آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش و رسیدن به نرخ انتقال حرارت حداکثری، شبیه‌سازی جریان با پره‌های با زاویه و تعداد مختلف صورت گرفته است. زوایای مورد بررسی برای پره‌ها نسبت به راستای طولی ۳۰، ۴۵ و ۵۵ درجه و تعداد پره‌ها نیز ۳، ۴ و ۷ عدد در نظر گرفته شده و آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش در هر حالت به دست آمده است. لازم به ذکر است که انتخاب زاویه و تعداد پره‌ها بر اساس زوایای پیشنهاد شده در تحقیقات قبلی [25] و تعداد حداکثر نیز بر اساس عامل افت فشار کل که تعیین‌کننده برگشت یا پس زدن جریان محصولات احتراق است انتخاب شده است.



شکل ۲ پره‌های تولیدکننده گردابه به شکل نیم‌دایره درون دودکش

ابعاد شبکه محاسباتی بر دقت نتایج محاسبات عددی و زمان حل مؤثرند. شکل (۳) داده‌های بررسی استقلال از تعداد مش در فرایند مدل‌سازی مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۳ داده‌های بررسی استقلال از مش (تأثیر تعداد مش بر شار انتقال حرارت به دیواره دودکش)

براساس شکل (۳) شبکه‌بندی با تعداد ۳۴۳۲۵۹ سلول برای حل عددی استفاده شده است. شرایط مرزی استفاده شده در شبیه سازی شامل شرط مرزی Velocity inlet در ورودی محصولات احتراق به دودکش، شرط مرزی Out flow در خروجی دودکش و شرط مرزی Wall برای پره‌ها و دیواره دودکش است. لازم به ذکر است که به دلیل عدم داشتن شرایط مرزی در خروجی دودکش از شرط مرزی Out flow استفاده شده است. این مرز در شبیه‌سازی جریان‌های توسعه‌یافته بیشتر مورد استفاده قرار گیرد و توسعه یافتگی جریان با توجه به هندسه مسئله و رژیم درهم جریان ناشی از پره‌های تولیدکننده گردابه قابل قبول است. همچنین از شرط مرزی حرارتی از نوع انتقال حرارت جابه‌جایی بر روی دیواره خارجی دودکش استفاده شده و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی h از رابطه چرچیل و چو محاسبه و جایگزین شده است [26].

$$Nu = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492/\mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}} \right]^2 \qquad (۱)$$

$$h = \frac{Nu.k}{L} \qquad (۲)$$

که در این رابطه h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی جریان

آب روی دیواره داخ آباً مکن (دودکش)، $L = 720mm$ طول دیواره داخلی، و Ra و Pr اعداد رایلی و پرانتل ه ستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad (۳)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (۴)$$

در این روابط T_s دمای سطح خارجی مخزن آبگرمکن و مجاور آب درون مخزن، T_∞ دمای متوسط آب مخزن، β و ν ضریب انبساط حرارتی و ویسکوزیته سینماتیکی آب هستند.

همچنین با توجه به ساختار لوله‌ای شکل دودکش میانی آبگرمکن، عدد رینولدز جریان گازهای عبوری از دودکش برای تعیین رژیم جریان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (۵)$$

در این رابطه چگالی گازهای عبوری از دودکش،V سرعت متو سط جریان، D قطر داخلی داخلی دودکش و μ وی سکوزیته دینامیکی گازهاست.

معادلات حاکم بر جریان محصولات احتراق ورودی به دودکش و عبوری از روی پره‌های تولیدکننده گردابه شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی و انرژی جنبشی اغتشاش و اتلاف آن است. فرضیات اصلی حاکم بر معادلات پایدار بودن جریان، جریان تراکم‌ناپذیر و خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر گرفته شده است. شکل کلی معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی برای جریان سیال تراکم‌ناپذیر در حالت پایدار به صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{\nabla}.\vec{V} = 0 \quad (۶)$$

$$\rho(u\frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + v\frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + w\frac{\partial\vec{V}}{\partial z}) = -\vec{\nabla}p + \vec{\nabla}.\bar{\tau} \quad (۷)$$

$$\rho C_P(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z}) = k\nabla^2 T + (\bar{\tau}.\vec{\nabla})\vec{V} \quad (۸)$$

در این روابط ρ ، C_P و k خواص ترموفیزیکی چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیال بوده و $\vec{V}$ بردار سرعت جریان سیال است. همچنین $\bar{\bar{\tau}}$ تانسور تنش برشی است.

برای مدل‌سازی تلاطم (اغتشاش) از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. این مدل یکی از ساده‌ترین و در عین حال پرکاربردترین مدل‌های اغتشاش در شبیه‌سازی بسیاری از جریان-های مغشوش است. مدل $k-\varepsilon$ استاندارد یک مدل دو معادله‌ای نیمه‌تجربی است، که بر پایه معادلات مدل شده برای انرژی جنبشی تلاطم k و اتلاف آن ε بیان شده است. به دلیل دقت و سرعت رضایت‌بخش، مدل‌های دو معادله‌ای بیشتر از سایر مدل-های جریان متلاطم مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل $k-\varepsilon$ استاندارد برای جریان‌های مغشوش بسیار مناسب بوده و دقت آن مورد تأیید بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [27]. دقت و سرعت رضایت‌بخش (هزینه محاسباتی کمتر) از یکسو و نیز کاربرد فراوان و تأیید دقت آن در جریان‌های مغشوش سبب شده است تا در این پژوهش نیز از همین مدل استفاده شود. همچنین برای مدل‌سازی رفتار نزدیک دیوار، از روش بهبود یافته استفاده شده است که این روش نیازمند مقدار y^+ کمتر از یک در شبکه نزدیک دیوار است. در فضاهایی که دارای مناطقی با دماهای متفاوت مانند کوره‌ها و محفظه‌های احتراقی که شامل سطوح و گازهای مختلف نشرکننده، پخش‌کننده و جذب‌کننده شارهای حرارتی تابشی می‌باشد؛ نیاز به مدلی است که انتقال حرارت تابشی را با دقت کافی تقریب بزند. مدل‌های تابش، شار حرارت را بین سطوح و گازهای مختلف محاسبه و امکان پیش‌بینی دقیق-تر توزیع دما و شار انتقال حرارت در نقاط مختلف را فراهم می کنند. برای مسائل از نظر نوری نازک، فقط مدل‌های DO و DTRM مناسب می‌باشند [27,28]. در این پژوهش قطر دودکش میانی ۱۱۰ میلی‌متر بوده و بنابراین مسئله از لحاظ نوری نازک است. علاوه بر این فقط مدل‌های P-1 و DO می‌توانند تبادل تابش بین گازهای دی‌اکسیدکربن و بخار آب را در نظر بگیرند. همچنین فقط مدل‌های P-1 و DO می‌توانند پراکندگی و نشر را به خوبی محاسبه کنند. از اجتماع شرایط فوق مدل تابش به کار گرفته شده در این پژوهش مدل تشعشع انتقالی گسسته (DO) انتخاب شده است [29]. کوپلینگ بین فشار و سرعت به کمک الگوریتم سیمپل انجام شده است. همچنین گسسته‌سازی فشار به کمک روش پرستو انجام پذیرفته است. گسسته‌سازی سایر معادلات در ابتدا با استفاده از روش بالادست مرتبه اول و سپس با استفاده از روش بالادست مرتبه دوم انجام شده است. ضرایب زیر تخفیف برای انرژی و لزجت گردابی به ترتیب ۰/۵ و ۰/۸ اعمال شده است. شرط همگرایی 10^{-4} برای همه معادلات به جز

معادله انرژی در نظر گرفته شد. این مقدار برای معادله انرژی 10^{-6} می‌باشد. برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی، نمونه آزمایشگاهی از پره‌های شبیه‌سازی شده با کمیت‌های هندسی ذکر شده در جدول (۱) ساخته شده و در داخل دودکش میانی یک آبگرمکن گازسوز دیواری مخزنی نصب گردید و شار انتقال حرارت بر روی دیواره دودکش (دیواره مخزن) در حالت استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه تعیین و با نتایج مدل‌سازی متناظر آن مقایسه گردید. به منظور اندازه‌گیری آزمایشگاهی شار انتقال حرارت بر روی دیواره دودکش (دیواره مخزن)، پس از قرار دادن پره‌های تولیدکننده گردابه در دودکش میانی آبگرمکن، آبگرمکن روشن شده و دبی گاز ورودی به آبگرمکن به گونه‌ای تنظیم گردید که دمای محصولات احتراق در بالای برنر و ورودی به دودکش میانی آبگرمکن با دمای شبیه‌سازی برابر شود. این کار با نصب یک ترموکوپل نوع K در بالای برنر و ورودی دودکش میانی آبگرمکن انجام گردید. این ترموکوپل قادر به اندازه‌گیری دماهای کمتر از ۱۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بوده و دقت اندازه‌گیری آن ٪۰/۷۵± دمای اندازه‌گیری شده است. پس از رسیدن به حالت پایدار دمای آب ورودی و خروجی به آبگرمکن اندازه‌گیری شد. برای اندازه-گیری دمای آب ورودی و خروجی از دو دماسنج جیوه‌ای با محدوده اندازه‌گیری ۱۰- تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و دقت ۲± درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. همچنین دبی جرمی آب نیز با استفاده از یک ظرف مدرج و با روش پیمانه‌ای تعیین گردید. با توجه به ضخامت کوچک دیواره دودکش، آهنگ انتقال حرارت ورودی به دیواره دودکش از گازهای عبوری از دودکش، در حالت پایدار با آهنگ حرارت منتقل شده از دیواره به جریان آب داخل مخزن آبگرمکن برابر است. با داشتن دبی جرمی و دمای آب ورودی و خروجی می‌توان آهنگ حرارت منتقل شده به جریان آب داخل مخزن آبگرمکن را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T \qquad (۹)$$

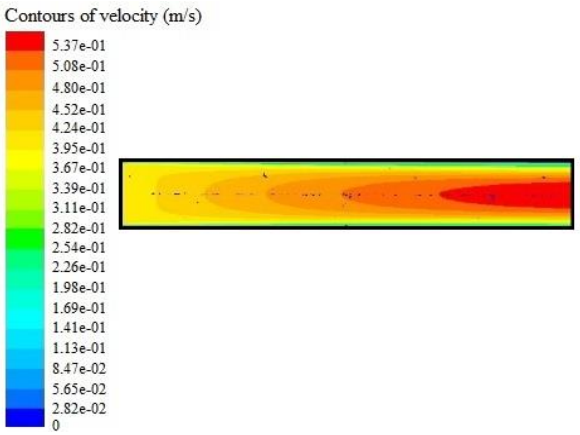
که در این رابطه $\dot{Q}$ آهنگ حرارت منتقل شده به جریان آب، $\dot{m}$ دبی جرمی جریان آب عبوری، ΔT اختلاف دمای آب ورودی و خروجی و c ظرفیت گرمایی ویژه آب است. همان طور که بیان شد با توجه به ضخامت کوچک دیواره دودکش، آهنگ انتقال حرارت ورودی به دیواره دودکش از گازهای عبوری از دودکش، در حالت پایدار با آهنگ حرارت منتقل شده از دیواره به جریان آب داخل مخزن آبگرمکن برابر است و بنابراین با تقسیم $\dot{Q}$ بر مساحت جانبی دیواره دودکش، شار حرارت ورودی به دیواره دودکش از گازهای عبوری از آن محاسبه گردید. همچنین برای اطمینان از صحت نتایج آزمایش دو بار تکرار و عدم قطعیت آزمایش ناشی از دقت تجهیزات و تکرار آزمایش به دست آمد. برگشت محصولات احتراق (پس زدن) باعث افزایش غلظت منوکسیدکربن در محیط نصب آن می‌شود. بنابراین به این منظور با استفاده از یک دستگاه گاز آنالایزر KIGAS 310 غلظت محصولات احتراق به ویژه منوکسیدکربن که باعث خفگی می‌شود در محیط نصب آبگرمکن اندازه‌گیری شده (این روش، روش استاندارد آزمون ایمنی عملکردی آبگرمکن‌های گازی مخزن‌دار مطابق استاندارد ۱۲۱۹ می‌باشد). با در نظر گرفتن شرایط بیشترین شار انتقال حرارت و عدم تجاوز غلظت منوکسیدکربن در محیط از حد استاندارد ناشی از برگشت یا پس زدن جریان محصولات احتراق به محیط، آرایش ۷ پره تولیدکننده گردابه با زاویه ۵۵ درجه نسبت به راستای طولی حالت بهینه‌ای بود که علاوه بر افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره، برگشت جریان محصولات احتراق نیز به میزانی بود که غلظت منوکسیدکربن کمتر از حد مجاز بود. شار انتقال حرارت برای آرایش بهینه (آرایش ۷ پره با زاویه ۵۵ درجه) در حالت آزمایشگاهی و مدل‌سازی به ترتیب ۱۸ ±۹۰۰ و ۹۵۰ وات بر متر مربع به دست آمدند که نشان‌دهنده دقت مناسب فرایند مدل‌سازی است.

نتایج

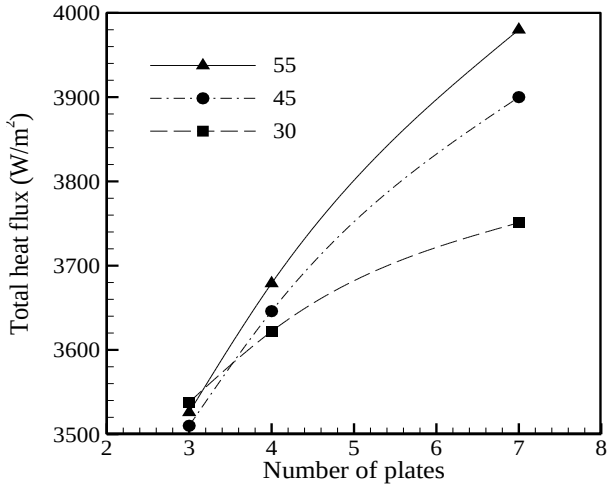
شکل (۴) توزیع سرعت جریان محصولات احتراق در دودکش را در حالت بدون استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه و ایجادکننده اغتشاش نشان می‌دهد. با توجه به ساختار لوله‌ای شکل دودکش، عدد رینولدز گذار برای تبدیل جریان از حالت آرام به درهم در محدوده ۲۳۰۰ بوده و با محاسبه عدد رینولدز جریان محصولات احتراق ورودی به دودکش می‌توان دریافت که رژیم جریان از نوع آرام است. همان طور که مشاهده می‌شود به دلیل کوچک بودن طول دودکش، جریان توسعه یافته نبوده و با حرکت به سمت خروجی دودکش سرعت جریان گازها در ناحیه مرکزی دودکش و خارج از لایه مرزی ایجاد شده بر روی دیواره دودکش افزایش می‌یابد؛ که با کاهش زمان ماند محصولات احتراق باعث اتلاف انرژی حرارتی خواهد شد. بنابراین انتظار

می‌رود که قرار دادن تولیدکننده گردابه ضمن کاهش سرعت در ناحیه مرکزی دودکش و افزایش زمان ماند محصولات احتراق، با مغشوش کردن و هدایت جریان به سمت لایه مرزی مجاور دیواره، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش شود.

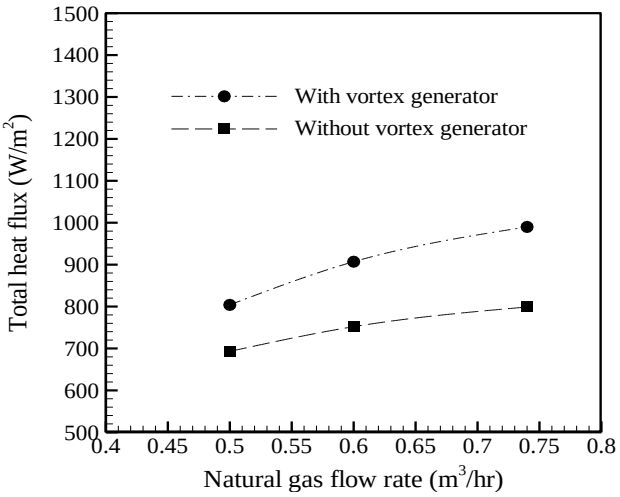
شکل (۵) تأثیر تعداد و زاویه پره‌های تولیدکننده گردابه را بر آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود به طور کلی با افزایش تعداد پره‌ها، آهنگ انتقال حرارت به دیواره افزایش می‌یابد. افزایش زاویه پره‌ها نیز باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش می‌شود. به طوری که در حالت استفاده از پره با زاویه ۵۵ درجه، افزایش تعداد پره‌ها از ۳ به ۷ عدد، آهنگ انتقال حرارت به دیواره را به میزان ۱۳ درصد افزایش می‌دهد. همچنین افزایش زاویه پره از ۳۰ به ۵۵ درجه در آرایش ۷ پره، افزایش انتقال حرارت به دیواره را به میزان ۶/۱ درصد به دنبال دارد. همچنین با افزایش تعداد پره‌ها تأثیر زاویه پره بر بهبود آهنگ انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت این است که با افزایش تعداد پره‌ها و زاویه پره‌ها، میزان افت فشار افزایش یافته که احتمال برگشت جریان گازهای دودکش را تقویت می‌کند و همان طور که قبلا اشاره شد زاویه ۵۵ و تعداد پره‌های تولیدکننده گردابه با بیشترین تعداد ۷ بهینه‌ترین حالتی است که مانع برگشت جریان گازهای خروجی می‌شود.



شکل ۴ توزیع سرعت جریان محصولات احتراق در دودکش بدون استفاده از پره‌های تولید کننده گردابه



شکل ۵ تأثیر تعداد و زاویه پره‌های تولید کننده گردابه بر آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش

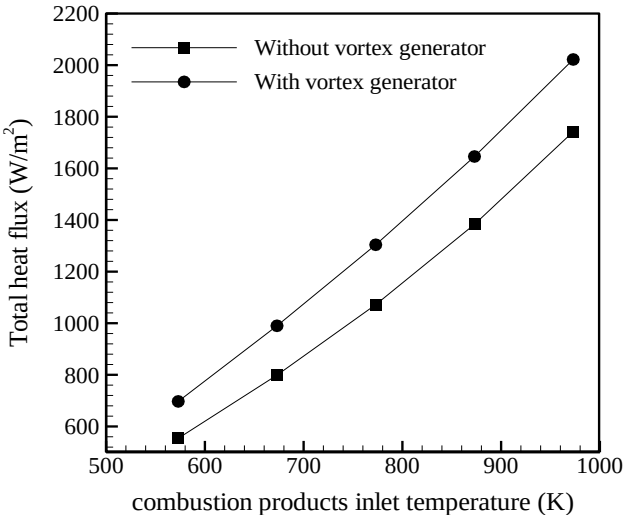


شکل ۶ مقایسه شار انتقال حرارت منتقل شده به دیواره با و بدون استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه و در دبی‌های مختلف گاز ورودی

شکل (۶) شار گرمای منتقل شده به دیواره دودکش را با و بدون استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه و برای دبی‌های مختلف جریان گاز نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه در مسیر محصولات احتراق عبوری از دودکش باعث می‌شود تا انتقال حرارت به دیواره دودکش به طور متوسط ٪۲۱ افزایش یابد. با افزایش دبی حجمی گاز ورودی به محفظه احتراق، دبی حجمی محصولات احتراق و دمای آن‌ها افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش دبی گاز ورودی باعث افزایش انرژی حرارتی حاصل از واکنش احتراق

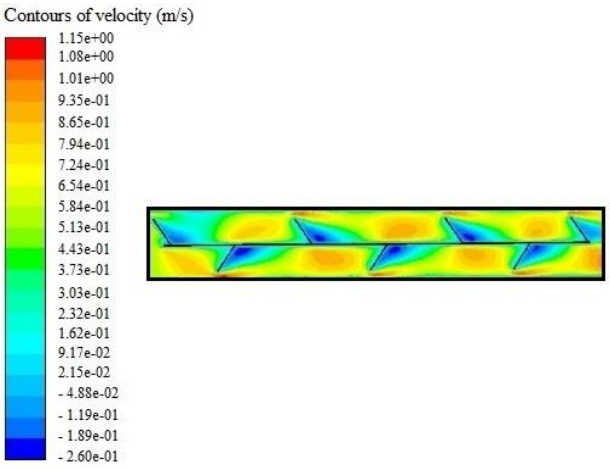
شده و سبب افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش می‌شود. همچنین با افزایش دبی گاز تأثیر استفاده از پره‌ها بر افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش بیشتر می‌شود.

در شکل (۷) اثر شار گرمای منتقل شده به دیواره داخلی دودکش با و بدون استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه و در دماهای مختلف جریان محصولات احتراق ورودی به دودکش نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش دمای محصولات احتراق نیز باعث افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش خواهد شد و استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه افزایش شار انتقال حرارت به دیواره داخلی دودکش در دماهای مختلف را به دنبال دارد.



شکل ۷ مقایسه شار انتقال حرارت منتقل شده به دیواره دودکش در دماهای ورودی مختلف محصولات احتراق با و بدون پره‌های تولیدکننده گردابه

شکل (۸) توزیع سرعت جریان محصولات احتراق در دودکش را در حالت استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه و ایجاد کننده اغتشاش نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود قرار دادن تولیدکننده گردابه ضمن کاهش سرعت در ناحیه مرکزی دودکش با مغشوش کردن و هدایت جریان به سمت لایه مرزی مجاور دیواره دودکش و افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش مطابق نتایج شکل‌های (۶) و (۷) می‌شود.



شکل ۸ توزیع سرعت جریان محصولات احتراق در دودکش با استفاده از پره‌های تولید کننده گردابه بهینه

نتیجه‌گیری

تأثیر استفاده از تولیدکننده‌های گردابه به شکل صفحات نیم‌دایره‌ای با زاویه‌های مختلف و در فواصل طولی مختلف در دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری بر هیدرودینامیک جریان و آهنگ انتقال حرارت از محصولات احتراق به دیواره به شیوه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت:

۱. قرار دادن تولیدکننده گردابه ضمن کاهش سرعت در ناحیه مرکزی دودکش و افزایش زمان ماند محصولات احتراق، با مغشوش کردن و هدایت جریان به سمت لایه مرزی مجاور دیواره، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش می‌شود.

۲. به طور کلی با افزایش تعداد پره‌های تولیدکننده گردابه، آهنگ انتقال حرارت به دیواره افزایش می‌یابد. همچنین افزایش زاویه پره‌های تولیدکننده گردابه نیز باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش می‌شود و با افزایش تعداد پره‌ها تأثیر زاویه پره بر بهبود آهنگ انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد.

۳. با افزایش تعداد پره‌ها و زاویه پره‌ها، میزان افت فشار افزایش می‌یابد که احتمال برگشت جریان گازهای دودکش را تقویت می‌کند و بر این اساس زاویه ۵۵ و تعداد پره‌های تولیدکننده گردابه ۷ عدد ماکزیمم حالتی است که مانع برگشت جریان گازهای خروجی می‌شود.

۴. با تغییر دبی گاز در محدوده ۰/۵ تا ۰/۷۵ متر مکعب بر ساعت

انتقال حرارت به دیواره دودکش به طور متوسط ۲۱٪ افزایش می‌یابد.

واژه‌نامه

نوارهای پیچ‌خورده	Twisted tape
تولیدکننده گردابه	Vortex generator
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	h
عدد رایلی	Ra
عدد پرانتل	Pr
دمای سطح خارجی مخزن آبگرمکن	T_s
دمای متوسط آب مخزن	T_∞
ضریب انبساط حرارتی	β
ویسکوزیته سینماتیکی	ν
چگالی گازهای عبوری از دودکش	ρ
سرعت متوسط جریان	V
قطر داخلی داخلی دودکش	D
ظرفیت گرمایی ویژه	C_P
ضریب هدایت حرارتی	k
تانسور تنش برشی	$\bar{\bar{\tau}}$
الگوریتم سیمپل	SIMPLE
روش گسسته‌سازی پرستو	PRESTO
آهنگ انتقال حرارت	$\dot{Q}$
دبی جرمی	$\dot{m}$
اختلاف دما	ΔT

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از واحد پژوهش شرکت گاز استان خراسان رضوی به عنوان حامی مالی این پژوهش، آقای دکتر افشون رئیس محترم واحد پژوهش شرکت گاز استان خراسان رضوی، ناظر محترم طرح آقای مهندس محمدیان و همچنین همکار آزمایشگاهی آقای انتظاری اعلام می‌دارند.

مراجع

[1] M. Anbarsooz, M. Pasandideh-Fard, N. Shaleh, "Numerical simulation of Toos power plant boiler to improve its thermal efficiency," *Journal of Applied and Computational Science in Mechanics*, vol. 27, no. 1, pp. 117-134, (2016).

[2] B. W. Bulter, M. K. Denison, B. W. Webb, "Radiation heat transfer in a laboratory scale pulverized coal fired reactor," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 9, pp. 69-79, (1994).

[3] A. J. Ahmadian Hosseini, S. H. Pourhoseini, M. Moghiman, M. R. Mahpeykar, "Parametric assessment of changing inlet air swirl intensity on flow dynamic behavior, temperature and radiation heat flux of Harwell furnace," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 47, no. 4, pp. 31-37, (2018).

[4] M. Moghiman, S. H. Pourhoseini, "Experimental study on the effect of coal particles injection on flame structure, radiation heat transfer, temperature distribution and thermal efficiency in natural gas diffusion flames," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 7, pp. 163-168, (2014).

[5] S. H. Pourhoseini, I. Taghvaei, M. Moghiman, M. Baghban, "Tangential Flue Gas Recirculation (TFGR) technique for enhancement of radiation characteristics and reduction of NOx emission in natural gas burners," *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, vol. 94, p. 104130, (2021).

[6] S. H. Pourhoseini, N. Naghizadeh, "A Comparative study of Thermal, luminous, and infrared radiation characteristics of natural gas flame in the presence of alkali, alkali-earth, and transition metallic solution additive," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 144, pp. 1-5, (2022).

[7] S. H. Pourhoseini, "Enhancement of radiation characteristics and reduction of NOx emission in natural gas flame

through silver-water nanofluid injection," *ENERGY*, vol. 194, p. 116900, (2020).

[8] C. Maradiya, J. Vadher, R. Agarwal, "The heat transfer enhancement techniques and their Thermal Performance Factor," *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1-21, (2018).

[9] S. K. Saha, A. Dutta, and S. K. Dhal, "Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, no. 22, pp. 4211-4223, (2001).

[10] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Promvonge, "Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 33, no. 10, pp. 1225-1233, (2006).

[11] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, P. Promvonge, "Convective heat transfer in a circular tube with short length twisted tape insert," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 4, pp. 365-371, (2009).

[12] S. N. Sarada, A. Sita Rama Raju, K. Kalyani Radha, L. Shyam Sunder, "Enhancement of heat transfer using varying width twisted tape inserts," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 107-118, (2010).

[13] E. Esmaeilzadeh, H. Almohammadi, A. Nokhosteen, A. Motezaker, A.N. Omrani, "Study on heat transfer and friction factor characteristics of γ-Al_2O_3/water through circular tube with twisted tape inserts with different thicknesses," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 82, pp. 72-83, (2014).

[14] S. Eiamsa-ard, P. Promvonge, "Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 1364-1372, (2010).

[15] S. V. Patil, P. V. Vijay babu, "Heat transfer and pressure drop studies through a square duct fitted with increasing and decreasing order of twisted tape," *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, no. 14-15, pp. 1380-1387, (2014).

[16] S. V. Patil, P. V. Vijaybabu, "Heat transfer enhancement through a square duct fitted with twisted tape inserts," *Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 1803-1811, (2012).

[17] P. Sivashanmugam, and P. K. Nagarajan, "Studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with right and left helical screw-tape inserts," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, no. 1, pp. 192-197, (2007).

[18] P. Sivashanmugam, S. Suresh, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 1311-1319, (2007).

[19] M. Rahimi, S. R. Shabanian, A. A. Alsairafi, "Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 48, pp. 762-770, (2009).

[20] S. R. Shabanian, M. Rahimi, M. Shahhosseini, and A.A. Alsairafi, "CFD and experimental studies on heat transfer enhancement in an air cooler equipped with different tube inserts," *International Communications in Heat and Mass*

Transfer, vol. 38, pp. 383-390, (2011).

[21] P. W. Deshmukh, R. P. Vedula, "Heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with vortex generator inserts," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 79, pp. 551-560, (2014).

[22] Y. T. Yang, and C. H. Chen, "Numerical simulation of turbulent fluid flow and heat transfer characteristics of heated blocks in the channel with an oscillating cylinder," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 1603-1612, (2008).

[23] S. Caliskan, "Experimental investigation of heat transfer in a channel with new winglet-type vortex generators," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 78, pp. 604-614, (2014).

[24] C. Min, C. Qi, X. Kong, J. Dong, "Experimental study of rectangular channel with modified rectangular longitudinal vortex generators," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 15-16, pp. 3023-3029, (2010).

[25] S. Skullong, P. Promvonge, C. Thianpong, and M. Pimsarn, "Thermal performance in solar air heater channel with combined wavy-groove and perforated-delta wing vortex generators," *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 611-620, (2016).

[26] S. W. Churchill, H. H. S. Chu, "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate Lois de correlation en convection naturelle laminaire et turbulente sur une plaque verticaleKorrelationen für laminare und turbulente freie konvektion an einer senkrechten platte," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, no. 11, pp. 1323-1329, (1975).

[27] M. Moghiman, *Numerical heat transfer and fluid flow*. Ferdowsi University of Mashhad Press, (1993).

[28] M. F. Modest, S. Mazumder, *Radiative Heat Transfer*. Elsevier, (2013).

[29] T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman, "Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model," *Journal of Heat Transfer*, vol. 104, no. 4, pp. 602-608, (1982).

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 3, 2024. (107-122)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

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

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Using New Friction Models to Investigate the Mechanical Properties of Liver Cancer Tissue Atomic Force*

Research Article

Moein Taheri[1], Zahra Sadat Eghdami[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.87206.1245

Abstract *Today, liver cancer ranks sixth among cancers and ranks fourth among the causes of death. Examining the condition of the body and early recognition of this disease can be effective in its control and treatment. Examining the mechanical properties of the liver tissue and studying its Young's modulus will identify the health status of the tissue and the patient. In this research, Young's modulus has been theoretically calculated using slab friction models, reset integration, and Bleiman and Sorin models. Also, using atomic force microscope, this modulus has been extracted experimentally. Comparison of theoretical and experimental modules obtained will have similar results. According to the examination of texture and relationships at the nano level, the second model of Billman and Sorin is more accurate due to the smaller range of changes and the more complex equation. Therefore, it is suggested to use the second model of Billman and Sorin in future researches.*

Key Words Liver cancer tissue, Dahl friction model, Reset integration, Bleiman and Sorin friction models, Atomic force microscope.

1- Introduction

Excessive growth of liver cells leads to the formation of a mass in the upper and right part of the abdomen and causes liver cancer. Today, with the increase in the incidence of this disease, this cancer is named as the sixth most common cancer and the fourth cause of death due to cancer. Primary liver cancer originates from the cells and tissues of the liver. Consequently, investigating and studying the properties of these areas will identify the condition of the tissue. The use of atomic force microscope with the approach of moving nanoparticles plays an important role in extracting the mechanical properties of tissues and nanoparticles. Choosing suitable friction models to calculate the force and depth of penetration in scanning by an atomic force microscope will increase the accuracy and precision of the experiments. Therefore, various investigations have been conducted all over the world to assess the mechanical properties of different tissues using the friction model. Moreover, some research has been performed to examine the used model and compare the friction models. The present research aimed to investigate the liver cancer tissue in order to identify its mechanical properties by the Young's modulus. In this study, slab friction models, reset integration, and Bliman and Sorine models are used exclusively. Young's modulus was first extracted experimentally using the atomic force microscope nano tool. Finally, the results of theoretical simulations were compared with experimental diagrams. As a result of comparing and matching these two groups of graphs, Young's modulus of liver cancer tissue was determined. The innovation of the current research is the use of different friction models for the first time in investigating the mechanical properties of liver cancer tissue and extracting its Young's modulus.

2- Modeling

In this section, the governing equations of some of the different friction models available in the articles are reviewed and explained, and their relationships and applications are explained. The models used in this study were four Dahl models, reset integration, and Bliman and Sorine models. Following examining their governing relationships, the Bliman and Sorine model had the best effect on the obtained results. The equation of this model is as follows [1-4]:

$$A = \begin{pmatrix} {}^{-1}/_{(\eta\varepsilon_f)} & 0 \\ 0 & {}^{-1}/_{(\varepsilon_f)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

*Manuscript received: December 21, 2023. Revised, February 20, 2024 , Accepted, March 23, 2024.

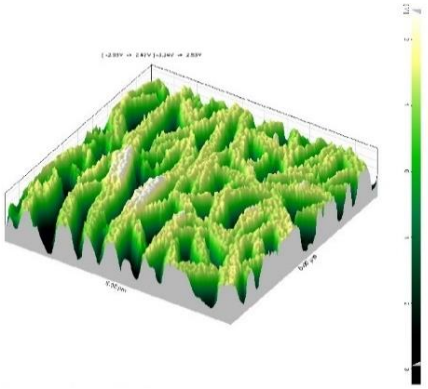
[1] Corresponding author: Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. **Email:** m-taheri@araku.ac.ir

[2] Phd student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

$$B = \begin{pmatrix} f_1 / (\eta \varepsilon_f) \\ f_2 / (\varepsilon_f) \end{pmatrix} \quad and \quad C = (1 \ 1), \tag{2}$$

3- Experimental studies

In order to obtain the mechanical properties of the liver cancer tissue, investigations have been performed by scanning with a force microscope. Examination of tissue using atomic force microscope requires preparation of cancerous tissue or its culture. The tissue separated from the body, after being placed and cut to the desired dimensions, is placed in paraffin preservative solutions. Afterwards, the tissue is dried and placed on a slide. Topographic images of the tissues are extracted by the software associated with the device.

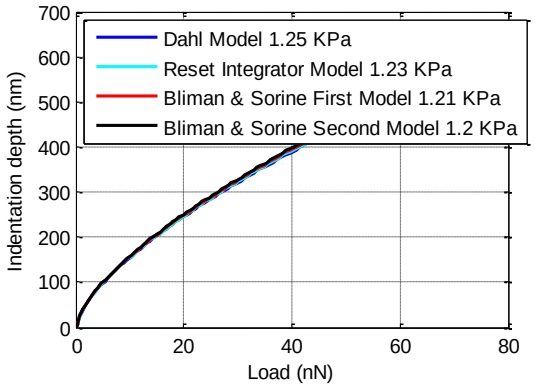


3D image

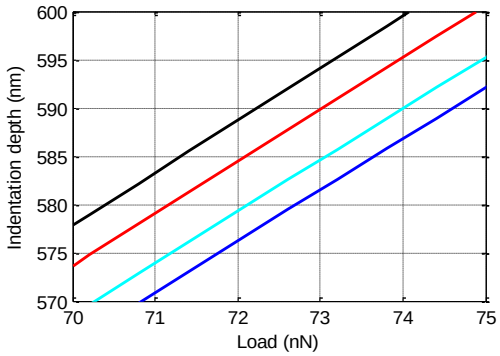
Figure 1. Topography recorded by atomic force microscope

4- Conclusion

In this article, the range of Young's modulus of liver cancer tissue was investigated using atomic force microscopy by four slab friction models, reset integration, and Bliman and Sorine models. In this research, the module obtained from the experimental technique and the theoretical methods were compared. The results showed that the comparison of Young's modulus values experimentally and using the second model of Bliman and Sorine had a closer range to each other. Therefore, the average Young's modulus is predicted to be 1.2 kPa. In Figure 2, using reference [5], the correctness of the research can be seen. According to this diagram, the obtained Young's modulus is close to the previous researches.



(a) Plot of penetration depth in terms of force



(b) Partial comparison of graphs

Figure 2. Comparison of force-penetration depth theory diagrams

Understanding the mechanical properties of cancerous tissues can be effective in preventing and controlling the proliferation process. The use of atomic force microscope and various friction models calculates the Young's modulus of the tissue with the closest and least damage. In this research, liver cancer tissue was evaluated using atomic force microscopy, slab friction models, reset integration, and Bliman and Sorine models.

The main purpose of this research was to investigate the effectiveness of friction models used in the force and depth of liver cancer tissue penetration. In this research, Young's modulus was theoretically calculated at the nanoscale due to the measurement of modulus using atomic force microscope. Among the methods used, the model obtained using the Bliman and Sorine model was more accurate than others. The minimum and maximum differences in the Bliman and Sorine model had a smaller value and a tighter tolerance than others. Furthermore, by comparing the graphs governing all four models and paying attention to equation 2, it can be seen that this equation is more complicated. Nanoscale studies require more complexity due to the importance of surface to volume. Therefore, using a model with the complexity of relationships, followed by higher accuracy, will extract a more desirable module.

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد

استفاده از مدل‌های اصطکاکی نوین به منظور بررسی خواص مکانیکی بافت سرطانی کبد*

مقاله پژوهشی

معین طاهری(۱) زهرا سادات اقدامی(۲)

***DOI**: 10.22067/jacsm.2024.87206.1245*

چکیده *امروزه سرطان کبد جایگاه ششم در میان سرطان ها و رتبه چهارم از علل مرگ و میر را به خود اختصاص داده است. بررسی وضعیت بدن و شناخت زودهنگام این بیماری می‌تواند در کنترل و درمان آن مؤثر باشد. بررسی خواص مکانیکی بافت کبد و مطالعه مدول یانگ آن موجب شناسایی وضعیت سلامت بافت و بیمار خواهد شد. در این پژوهش با استفاده از مدل‌های اصطکاکی دال، انتگرال‌گیری بازنشانی و مدل‌های بلیمن و سورین، به محاسبه مدول یانگ به صورت تئوری پرداخته شده است. همچنین با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی این مدول به صورت تجربی استخراج شده است. مقایسه مدول‌های تئوری و تجربی به دست آمده، نتایجی نزدیک به هم خواهد داشت. با توجه به بررسی بافت و روابط در سطح نانو، مدل دوم بیلمن و سورین به دلیل کمتر بودن دامنه تغییرات و معادلات پیچیده‌تر، از دقت بالاتری برخوردار است. بنابراین استفاده از مدل دوم بیلمن و سورین در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.*

واژه‌های کلیدی بافت سرطانی کبد، مدل اصطکاکی دال، انتگرال‌گیری بازنشانی، مدل‌های اصطکاکی بلیمن و سورین، میکروسکوپ نیروی اتمی.

مقدمه

رشد بی‌رویه سلول‌های کبدی منجر به ایجاد توده‌ای در قسمت فوقانی و راست شکم شده و موجب پیدایش سرطان کبد خواهد شد. امروزه با افزایش میزان ابتلا به این بیماری، از این سرطان به‌عنوان ششمین سرطان شایع و چهارمین علت مرگ براثر سرطان نام برده می‌شود. با توجه به آغاز سرطان اولیه کبد در سلول‌ها و بافت‌های کبد، بررسی و مطالعه خواص این نواحی موجب شناسایی وضعیت بافت خواهد شد. استفاده از ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic force microscopy(AFM)) با رویکرد جابه‌جایی نانوذرات (Nanomanipulation)، در استخراج خواص مکانیکی بافت‌ها و نانوذرات، نقش مهمی دارد. انتخاب مدل‌های اصطکاکی مناسب به جهت محاسبه نیرو و عمق نفوذ هنگام روبش با میکروسکوپ نیروی اتمی، موجب افزایش صحت و دقت آزمایش‌ها خواهد شد.

بنابراین در سراسر دنیا بررسی‌های مختلفی با هدف بررسی خواص مکانیکی بافت‌های مختلف و استفاده از مدل اصطکاکی انجام شده است. همچنین برخی پژوهش‌ها در جهت بررسی مدل مورد استفاده و مقایسه مدل‌های اصطکاکی صورت گرفته‌اند.

انجام آزمایش با میکروسکوپ نیروی اتمی بر روی نمونه‌های بیولوژیکی به جهت مشخص کردن اثر بیوفیزیکی پیشرفت سرطان در جستجوی نشانگرهای زیستی بدون برچسب بیماری جایگاه چشم‌گیری پیدا کرده است. زملا و همکاران در این بررسی، تأکید ویژه‌ای بر این خواص مشتق‌شده از میکروسکوپ نیروی اتمی سلول‌های مرجع و سرطانی را با استفاده از همه

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۹/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱/۱۴ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

Email: m-taheri@araku.ac.ir

(۲) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

عملکردها از اندازه‌گیری تغییرشکل‌پذیری سلولی تا کمی‌سازی نیروهای برهم‌کنش در سطوح تک‌مولکولی و تک‌سلولی مقایسه کرده‌اند. تا به امروز، میکروسکوپ نیروی اتمی می‌تواند برای دستیابی به درک بهتر فرایندها و مکانیسم‌های مرتبط با سرطان استفاده شود که می‌تواند بیشتر برای طراحی سنجش‌های بالینی با وضوح بالا به روش کمی مورد استفاده قرار گیرد [1].

میکروسکوپ نیروی اتمی به طور گسترده‌ای برای مطالعه نمونه‌های بیولوژیکی از جمله تصویربرداری، می‌تواند تغییرات مورفولوژیکی سلول‌های ناشی از داروها را بررسی کند. پیلت و همکاران به تمرکز بر روی مجموعه‌ای از نتایج با هدف ارزیابی اثرات داروها در مقیاس نانو، توسط AFM پرداخته‌اند. مطالعات روی مخمر، باکتری‌ها و سلول‌های پستانداران انجام شده است. در نتیجه این پژوهش می‌توان درک بهتر مکانیسم اثر دارو به کمک AFM را مشاهده کرد. اهمیت این بررسی علاقه فناوری‌های AFM را برای فارماکولوژی افزایش می‌دهد. کاربردهای بررسی‌شده از میکروبیولوژی تا سرطان‌شناسی را شامل می‌شود [2].

کیم و همکاران به بررسی سلول‌های طبیعی THLE-2 و سلول‌های سرطانی HepG2 کبد انسان با استفاده از آزمایش‌های فرورفتگی میکروسکوپ نیروی اتمی و مدل هرتز پرداخته‌اند. خصوصیات مکانیکی سلول‌ها به‌عنوان یک ابزار تشخیصی کمی معرفی شده است. نتایج نشان داده است که سلول‌های THLE مدول الاستیک بالاتری نسبت به سلول‌های HepG2 دارند و این تفاوت زمانی که از نوک مخروطی استفاده شد معنی‌دارتر بوده است [3].

ویژگی‌های نانومکانیکی بافت‌های سرطان کبد و ارتباط آن‌ها با توسعه سلول‌های سرطان کبد توسط تیان و همکاران بررسی‌شده است. همچنین با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی نوع فرورفتگی (indentation-type atomic force microscopy (IT-AFM))، کم‌ترین پیک الاستیسیته (lowest elasticity peak (LEP)) در توزیع مدول یانگ بافت‌های سرطان کبد، نشان داده شده است. نتایج نشان داده است که پروفایل‌های مکانیکی بافت‌های سرطان کبد به طور مستقیم با پیشرفت تومور متفاوت است، و یک پلتفرم اضافی برای تشخیص آینده اچ. سی. سی. فراهم خواهد کرد [4].

بررسی بافت و مطالعه خواص مکانیکی آن، بستری برای تشخیص زودهنگام سرطان و به دنبال آن شناسایی روش‌های درمان می‌باشد. به همین جهت طاهری و همکاران در این پژوهش با استفاده از سه نوع تیرک با هندسه‌های مستطیلی، وی-شکل و خنجری میکروسکوپ نیروی اتمی، مدول یانگ بافت سرطانی کبد در محدوده ۸۰۰ تا۱۵۰۰ پاسکال به دست آورده‌اند. همچنین محدوده مدول یانگ برای هر سه نوع تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل تماسی هرتز، شبیه‌سازی شده است. مقدار مدول یانگ به دست آمده ناشی از مقایسه نتایج کار تجربی و شبیه‌سازی‌های تئوری با هم مقایسه بوده‌اند [5].

هووارت و همکاران ببا الاستوگرافی رزونانس غیر مغناطیسی بر روی کبد، میانگین کشش ۲/۲۴±۰/۲۳ کیلو پاسکال در ۱۱ بیمار بدون فیبروز و ۲/۵۶±۰/۲۴ کیلو پاسکال در چهار بیمار با فیبروز قابل توجه (F2-F3) به دست آورده‌اند [6].

برنال و همکاران نیز با بررسی کبد انسان و خواص مکانیکی آن، مقادیر مدول برشی آن را ۳۷۰۰ پاسکال به دست آورده‌اند [7].

زارعی و همکاران جابه‌جایی و سرعت نانوذرات در فضای دوبعدی با استفاده از سه مدل اصطکاک اصلی کولمب، اچ.کا. و لاگره را در فاز دوم دست‌کاری نانوذرات مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر سرعت و جابه‌جایی با استفاده از مدل اصطکاک لاگره و حداقل مقادیر در مدل کولمب به دست آمده است. همچنین با افزایش شعاع ذرات، جابه‌جایی و سرعت کاهش یافته است. این اثر حتی بدون در نظر گرفتن ضریب اصطکاک ایجاد می‌شود. به همین ترتیب با توجه به صحت و اعتبار، مدل کولمب، کمترین دقت و لاگره دقیق‌ترین و مدل اچ.کا. بین این دو مدل قرار گرفته است [8].

چن و همکاران فرمول نظری فوق روانکاری را مورد بررسی قرار داده‌اند و ضریب اصطکاک را بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه‌گیری کرده‌اند. در این بررسی طول، عرض و ضخامت تیرک به ترتیب ۵۰، ۳۵ و ۰/۶ میکرومتر است. ارتفاع نوک ۲۳ میکرومتر است. وضوح اندازه‌گیری می‌تواند تحت حداکثر نیروی طبیعی به ۷/۱ ×۱۰−۶ برسد. علاوه بر این، کاوشگر AFM برای اندازه‌گیری سوپر روانکاری بین لایه‌های گرافن استفاده شد. ضریب اصطکاک ۰/۰۰۱۳۹ زیر۸۵۳/۰۸ nN به دست آمده است [9].

کومار به مطالعه سرطان، یکی از مهم‌ترین علل مرگ‌ومیر در سراسر جهان پرداخته است. هنگامی که این وضعیت ظاهر می‌شود، سلول‌های سرطانی رشد می‌کنند خواص غیر طبیعی، مانند توانایی تکثیر مداوم و ایجاد متاستاز، پدیدار خواهد شد. بررسی ویژگی‌های فیزیکی مانند سختی و مدول یانگ، می‌توانند احتمال بدخیم بودن سلول‌ها را مشخص کنند. در نتیجه چندین رویکرد برای بررسی بافت و سلول وجود دارد که میکروسکوپ نیروی اتمی به‌عنوان یک ابزار با وضوح بسیار بالا برای تجزیه و تحلیل مورفولوژی یک نمونه استفاده شده و به‌طور کمی ویژگی‌های مکانیکی آن را تا سطح اتمی ارزیابی کرده است [10].

طاهری با بررسی منیپولیشن ذرات بیولوژیکی و شبیه‌سازی و مدل‌سازی آن‌ها، نیرو و زمان بحرانی را با استفاده از مدل تماسی جی.کا.آر در ذرات پلاکت و دی.ان.ای. محاسبه کرده است. وی مدول یانگ سلول سرطانی معده را با استفاده از فرایند منیپولیشن مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی استخراج کرده است. بررسی نتایج حاکی از شروع حرکت غلتشی در راستای محور x نسبت به محورهای y و z بوده است. بیشتر بودن مقادیر نیروی بحرانی برای ذرات دی.ان.ای. نسبت به پلاکت از دیگر نتایج این پژوهش بوده است. با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی‌های انجام شده، مقدار تقریبی۳۲۵ کیلو پاسکال به‌عنوان مدول یانگ سلول سرطانی معده محاسبه شده است. با توجه به تأثیر اصطکاک بر نیرو و زمان بحرانی در این پژوهش مدل‌های اصطکاکی متفاوت ازجمله کولمب، لاگره و اچ.کا. در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند [11].

تان و همکاران یک روش محاسباتی برای مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل سیستم مکانیکی صلب مسطح با اصطکاک لغزش چسبنده را ارائه کرده‌اند. در این کار، مدل اصطکاک لاگره، که اثر Stribeck و ویژگی‌های فنر مانند را برای چسبندگی نشان می‌دهد، برای تخمین اصطکاک استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مکانیسم مبتنی بر مدل اصطکاک LuGre ویژگی‌های اتلاف انرژی بهتری دارد، در حالی که در بسیاری از موارد پدیده‌های چسبندگی سطوح در تماس وجود دارد. هنگامی که سرعت نسبی صفر یا نزدیک به صفر است، نیروی تماس مکانیسم بر اساس مدل اصطکاک LuGre به‌طور قابل توجهی کمتر از آن بر اساس مدل اصطکاک کولن اصلاح شده است. اندازه فاصله و ضریب اصطکاک به وضوح بر رفتار دینامیکی مکانیسم تأثیر می‌گذارد [12].

میرزالو و همکارانش بیان نموده‌اند که مطالعه خواص مکانیکی بافت‌ها می‌تواند به عنوان نشانگرهای زیستی برای تشخیص زودهنگام سرطان و کمک به درمان‌های جدید در نظر گرفته شود. در این مطالعه، مدول یانگ بافت سرطان سینه MCF-7 با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) با اندازه‌گیری نیروی برهم‌کنش نمونه و انجام شبیه‌سازی استخراج شده است. نمودار نیرو- فرورفتگی با میانگین‌گیری نتایج تجربی رسم شده است. در این مقاله مدول الاستیسیته بافت سرطان سینه با مدل‌های پیچیده‌ای مانند DMT، MD، BCP و SUN استخراج شده است. با مقایسه نتایج تجربی و نظری و با تغییر مقدار مدول یانگ فرضی در مدل‌های تماس کروی، مدول یانگ بافت سرطانی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ پاسکال در نظر گرفته شده است. هندسه سلول نیز کروی در نظر گرفته شده است [13].

خواص بیومکانیکی سلولی بینش‌های اساسی را در مورد عملکردهای بیولوژیکی در مورد سلامت و بیماری ارائه می‌دهد. اندازه‌گیری‌های فعلی خواص بیومکانیکی سلول‌ها نیاز به تماس فیزیکی با سلول‌ها یا بارگذاری اولیه روی سلول‌ها دارد. یانگ و همکاران میکرو ویسکوالاستوگرافی فوتوآکوستیک (PAMVE) را توسعه داده که از ویژگی‌های فاز پاسخ فوتوآکوستیک (PA) برای نقشه‌برداری خواص مکانیکی سلولی به روشی بدون بار استفاده می‌کند. PAMVE اندازه‌گیری ویسکوالاستیسیته موضعی را روی ماکروفاژها و گلبول‌های قرمز با مقیاس میکرومتری انجام می‌دهد. علاوه بر این، PAMVE می‌تواند با موفقیت سلول چربی و سلول ماهیچه اسکلتی را به دلیل تفاوت در خواص بیومکانیکی مرتبط با ترکیب آن‌ها شناسایی کند. PAMVE یک گزینه غیر قابل جایگزین برای بررسی خواص مکانیکی سلولی مشخص است که امکان مطالعه مکانوبیولوژی سلولی و پاتوفیزیولوژی را بازخواهد کرد [14].

طاهری به منظور یافتن مطلوب‌ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی در نانومنیپولیشن بافت سرطانی، با هدف کاوش سطح و به دست آمده آوردن اطلاعات مربوط به بافت سرطانی معده با کمترین آسیب، شبیه‌سازی دوبعدی نانومنیپولیشن انجام شده است. نمودارهای نیرو- زمان با توسعه مدل‌های اصطکاکی ساده و در نظر گرفتن مدل‌های اصطکاکی کارلسون- باتیستا، لمایتره- کارلسون و اف‌کاتی، ترسیم شده و مقادیر نیرو و زمان بحرانی محاسبه شده است. با استفاده از شبیه‌سازی با مدل اصطکاکی

اف.کا.تی، کمترین مقدار نیرو و زمان بحرانی به ترتیب برابر با ۰,۴۵۳ نانو نیوتن و ۴۵ میلی‌ثانیه به دست آمده است. همچنین مقایسه این مقادیر با پژوهش‌های گذشته، نشان‌دهنده کاهش نیرو و زمان بحرانی نسبت به مدل اصطکاکی لاگره بوده است [15].

لپوراتی و همکاران برای بررسی خواص مورفولوژیکی و مکانیکی دو سلول 7 سرطان سینه انسان و HeLa (ii) کارسینوم دهانه رحم انسان از میکروسکوپ نیروی روبشی (scanning force microscopy) در ترکیب با میکروسکوپ کانفوکال دو رده سلولی نئوپلاستیک استفاده کرده‌اند. سلول‌های در محلول بافر فسفات ((phosphate buffer solution (PBS) یا در هوا مورد مطالعه قرارگرفته‌اند و ویژگی‌های ویسکوالاستیک (شامل مدول یانگ) آن‌ها محاسبه شده است. این مدول تحت تأثیر رفتار چسبندگی و رشد بر روی سطوح زیر لایه خاص، مقدار متفاوتی داشته است [16].

طاهری و فرجی بیان نموده‌اند که مطالعه کاربردی بر روی بافت‌های سرطانی به منظور درمان تنها با شناخت کامل سلول‌های سرطانی و سالم از نظر ساختار مکانیکی، شیمیایی و هندسی امکان‌پذیر است. حساسیت بالا در جابه‌جایی بافت‌های سلولی و آسیب‌پذیری آن‌ها در هنگام اعمال نیروهای بزرگ منجر به مدل‌سازی بهینه فرایند شده است. در مرحله اول دستکاری، نیروی وارد شده به تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی باید بر نیروهای مقاومتی مانند اصطکاک غلبه کند. بررسی‌ها در فاز اول دستکاری نانو و در سه بعد انجام شده است. نیروی بحرانی و زمان برای هر سه مدل اصطکاک پرسون با مقایسه نیروهای اعمال شده در هر سه جهت حرکت و نیروی حاصل محاسبه شد و برای اطمینان از نتایج این شبیه‌سازی، بررسی‌های لازم انجام شده است. در نهایت نتایج نشان داده است که کمترین مقدار مربوط به مدل سوم اصطکاک پرسون با مقادیر ۹۳ نانو نیوتن برای نیروی بحرانی و ۷۸ میلی ثانیه برای زمان بحرانی است [17].

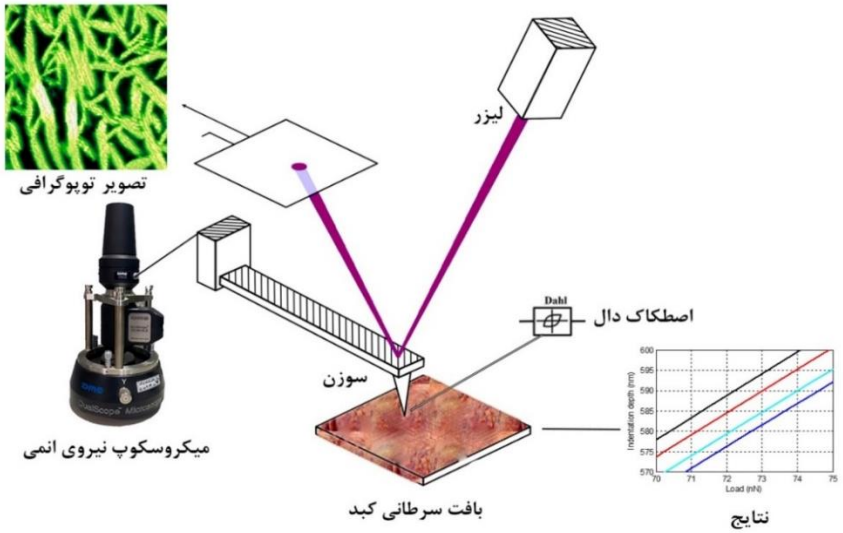
ذاکری و فرجی با استفاده از مدل تماس چندنقطه‌ای رفتار دینامیکی یک ذره نانو بر روی سطح ناهموار در فشار بر اساس میکرو سکوپ نیروی اتمی را مدل سازی و شبیه سازی کرده‌اند. همچنین به شبیه سازی دینامیک ذرات با شعاع‌های ۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ نانومتر در حرکت بر روی لایه های ناهموار مختلف، با فرض تماس‌های چندنقطه‌ای، نقطه‌ای منفرد و تماس‌های سطح صاف پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که مدل تماس چندنقطه‌ای، به‌ویژه در شعاع‌های کوچک زبری، تأثیر اساسی در تعیین نیروی بحرانی دارد. علاوه بر این، فرض مسطح بودن یا نقطه تماس منفرد منجر به خطای قابل توجهی برای تخمین نیروی بحرانی می شود. نتایج نشان داده که پروفیل‌های سطح ناهموار و توزیع زبری عوامل بسیار مهمی در تعیین تعداد نقاط تماس بوده و میزان تخمینی نیروی بحرانی را تغییر داده‌اند. به طور کلی نیروی بحرانی به دست آمده بر اساس مدل تماس چندنقطه‌ای جدید در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر سطح صاف و مدل تماس نقطه منفرد به ترتیب کاهش و افزایش داشته است [18].

کورایم و همکاران با توجه به کاربرد نانو دست‌کاری با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، دو مرحله تماس در نانودستکاری ذرات میکرو/نانو استوانه‌ای طلا مورد بررسی قرار داده‌اند. مرحله اول تماس میکرو/نانو ذرات بستر با استفاده از پنج مدل هرتز، لوندبرگ، داوسون، نیکپور و هیوپریچ و مرحله دوم تماس نوک تیرک با میکرو/نانو ذرات با مدل‌های تماس هرتز و JKR انجام شده است. نتایج نشان داده است که افزایش زاویه رأس نوک در امتداد محور z منجر به کاهش عمق نفوذ و میزان تغییر شکل بین ذرات و بستر می‌شده که مدل لوندبرگ کمترین میزان و مدل نیکپور بیشترین میزان کاهش را نشان داده است [19].

این پژوهش با هدف مطالعه و بررسی بر روی بافت سرطانی کبد به جهت شناسایی خواص مکانیکی و مدول یانگ آن می‌باشد. در این بررسی منحصرا از مدل‌های اصطکاکی دال، انتگرال‌گیری بازنشانی و مدل‌های بلیمن و سورین استفاده شده است. استخراج مدول یانگ ابتدا به صورت تجربی و با استفاده از نانوابزار میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شده است. در انتها نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های تئوری با نمودارهای تجربی مقایسه شده است. در نتیجه مقایسه و تطبیق این دو دسته نمودار موجب تعیین مدول یانگ بافت سرطانی کبد شده است. نوآوری این پژوهش، استفاده از مدل‌های اصطکاکی مختلف برای اولین بار در بررسی خواص مکانیکی بافت سرطانی کبد و استخراج مدول یانگ آن می‌باشد.

مدل‌سازی

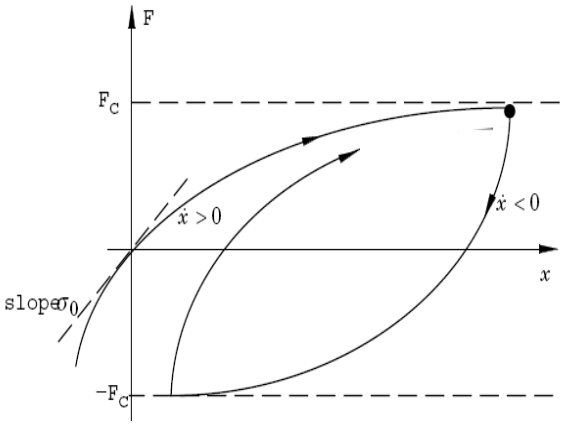
در این بخش به بررسی و تشریح معادلات حاکم بر برخی از مدل‌های مختلف ا صطکاکی موجود در مقالات پرداخته شده و روابط و موارد کاربرد آن‌ها ت شریح شده ا ست. فرایند کلی این پژوهش در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱ چکیده گرافیکی پژوهش

مدل دال (Dahl)

مدل دال برای هدف شبیه‌سازی‌های سیستم‌های کنترلی با اصطکاک توسعه یافته است. نقطه شروع مدل دال چندین آزمایش روی اصطکاک در سروو سیستم‌ها با بلبرینگ بود. یکی از این یافته‌ها این بود که اصطکاک بلبرینگ خیلی شبیه اصطکاک جامد عمل می‌کند. این آزمایش‌ها نشان می‌داد که مواد ثابتی بین سطوح وجود دارد، دال یک مدل نسبتا ساده را که برای سیستم‌های شبیه‌سازی با اصطکاک بلبرینگی به کار می‌رفت، توسعه داد [20].



شکل ۲ نیروی اصطکاکی به‌عنوان تابعی از جابه‌جایی در مدل دال [20]

نقطه شروع برای مدل دال منحنی تنش- کرنش در مکانیک جامد کلاسیک است (شکل ۲). وقتی در معرض تنش قرار گیرد، نیروی اصطکاک به تدریج افزایش یافته تا شکست رخ دهد. دال منحنی تنش- کرنش را با معادلات مختلف مدل کرد. اگر x جابه‌جایی، F نیروی اصطکاک و F_c نیروی اصطکاک کولمب با شد، آنگاه مدل دال به صورت معادله (۱) خواهد بود [21].

$$\frac{dF}{dx} = \sigma\left(1 - \frac{F}{F_c}\,\mathrm{sgn}\,v\right)^{\alpha} \qquad (۱)$$

که σ ضریب سختی و α پارامتری است که شکل منحنی تنش- کرنش را تعیین می‌کند. مقدار α معمولا برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر بیشتر یک منحنی تنش- کرنش با خمیدگی بیشتر خواهد داد. اصطکاک $|F|$ هیچ‌گاه بیشتر از F_c نخواهد شد اگر مقادیر اولیه آن به‌صورت $|F(0)| < F_c$ باشد [22].

توجه شود که در این مدل نیروی اصطکاک تنها یک تابع از جابه‌جایی و نشانی از سرعت است، این دلالت بر این دارد که نیروی اصطکاک تنها وابسته به موقعیت است. این به اصطلاح عدم وابستگی سرعت یک خاصیت مهم این مدل است و امکان اینکه این تئوری عملگر هیسترزیس را به کار گیرد فراهم می‌کند [20-23].

برای به د ست آوردن یک مدل وابسته به زمان دال پیشنهاد کرد که:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{dF}{dx}\frac{dx}{dt} = \frac{dF}{dx}v = \sigma\left(1 - \frac{F}{F_c}\,\mathrm{sgn}\,v\right)^{\alpha} v \qquad (۲)$$

این مدل یک حالت عمومی از اصطکاک معمولی کولمب است. مدل دال نه اثر استریبک را که یک پدیده وابسته به‌سرعت

است، در برمی‌گیرد و نه اثر استیکشن (Stiction) را و این موارد انگیزه‌های اصلی برای گسترش مدل است. برای $\alpha =$۱ مدل دال می‌شود:

$$\frac{dF}{dt} = \sigma v - \frac{F}{F_c}|v| \quad (۳)$$

با در نظر گرفتن $F = \sigma z$ مدل می‌تواند بدین صورت نوشته شود:

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma v}{F_c} \quad (۴)$$

مدل انتگرال‌گیری بازنشانی (Reset Integrator)

هازیگ و فریدلند همچنین مدل انتگرال‌گیری بازنشانی، را در مقاله مشابهی ارائه داده‌اند. این مدل می‌تواند به‌عنوان تلاشی برای امکان محاسباتی شدن مدل زبری در نظر گرفته شود. به جای گسیختن یک زبری پیوند با جلوگیری از افزایش کرنش در نقطه شکست، ثابت نگه داشته می‌شود. این مدل یک حالت اضافی برای تعیین کرنش در پیوند به کار می‌برد، که بدین‌صورت مدل شده است.

$$\frac{dz}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{if } (v > 0 \text{ and } z \geq z_0) \text{or } (v < 0 \text{ and } z \leq -z_0) \\ v & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۵)$$

نیروی اصطکاک بدین‌صورت داده شده است.

$$F = \big(1 + a(z)\big)\sigma_0(v)\, z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} \quad (۶)$$

که $\sigma_1 \frac{dz}{dt}$ ترم میرایی است که تنها در هنگام لغزش فعال است. ضریب میرایی می‌تواند انتخاب شود تا یک میرایی نسبی مطلوب در نتیجه سیستم فنر- جرم- دمپر بدهد. استیکشن با تابع $a(z)$ به دست می‌آید، که بدین صورت است.

$$a(z) = \begin{cases} a, & \text{if } |z| < z_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۷)$$

اگر $|z| < z_0$ مدل لغزش را هنگامی که نیروی اصطکاک تابعی از z است، شرح می‌دهد. هنگامی که تغییر شکل به ماکزیمم مقدار z_0 می‌رسد، متغیر z ثابت می‌ماند و نیروی اصطکاک تا هنگامی که $a(z)$ صفر شود، افت پیدا می‌کند. نیروی اصطکاک وقتی که لغزش تابع دلخواهی از سرعت است با $\sigma_0(v)$ داده شده است. مدل انتگرال‌گیری بازنشانی در شبیه‌سازی خیلی کاراتر از مدل زبری است، ولی نسبت به z غیر پیوسته است و بررسی $|z| < z_0$ ضروری است [24].

مدل‌های بلیمن و سورین (Bliman and Sorine)

بلیمن و سورین [27-25]، یک گروه مدل‌های دینامیکی را در سری مقالاتشان توسعه داده‌اند. پایه این مدل بر بررسی‌های تجربی است. نرخ تنش بلیمن و سورین غیر مستقل است. بزرگی اصطکاک تنها به $\operatorname{sgn} v$ و متغیر فاصله‌ای s است که بدین صورت تعریف می‌شود.

$$s = \int_0^t |v(\tau)| d\tau \quad (۸)$$

لذا در مدل‌های بلیمن و سورین، اصطکاک تنها تابعی از مسیر است و بستگی به اینکه سیستم با چه سرعتی در طی مسیر حرکت می‌کند، ندارد. این به‌کارگیری تئوری الگانت (Elegant theory) در عملگرهای هیسترزیس را امکان‌پذیر می‌سازد. مدل‌ها به‌عنوان سیستم‌های خطی از متغیر فاصله‌ای s ارائه شده‌اند.

$$\frac{dx_s}{ds} = A x_s + B v_s \quad (۹)$$

$$F = C x_s \quad (۱۰)$$

متغیر $v_s = \operatorname{sgn}(v)$ نیاز به یافتن علامت صحیح دارد. بلیمن و سورین مدل‌هایی با پیچیدگی مختلف دارند. اولین مرتبه این مدل بدین صورت است.

$$A = {}^{-1}/_{\varepsilon_f}\ , B = {}^{f_1}/_{\varepsilon_f} \text{ and } C = 1. \quad (۱۱)$$

این مدل می‌تواند بدین صورت نوشته شود.

$$\frac{dF}{dt} = \frac{dF}{ds}\frac{ds}{dt} = |v|\frac{dF}{ds} = {}^{f_1}/_{\varepsilon_f}\left(v - |v|\frac{F}{f_1}\right) \quad (۱۲)$$

که معادل مدل دال است با $F_c = f_1$ ، $\sigma = {}^{f_1}/_{\varepsilon_f}$ و $\alpha = 1$. این مدل نخست استیکشن و قله‌های اصطکاکی را نمی‌دهد. این مدل می‌تواند با مدل نوع دوم دست یافته شود.

$$A = \begin{pmatrix} -1/(\eta\varepsilon_f) & 0 \\ 0 & -1/(\varepsilon_f) \end{pmatrix} \quad (۱۳)$$

$$B = \begin{pmatrix} f_1/(\eta\varepsilon_f) \\ f_2/(\varepsilon_f) \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad C = (1\ 1), \quad (۱۴)$$

که $f_1 - f_2$ مربوط به اصطکاک جنبشی است. مدل می‌تواند به‌صورت موازی مرتبط با مدل سریع و آهسته دال نشان داده شود. مدل سریع حالت پایدارتری از مدل آهسته دارد. نیروی مدل آهسته از نیروی سریع کم شده که منجر به استیکشن می‌گردد. نشان داده می‌شود که دو مدل نخست و دوم اتلافی می‌باشند. بلیمن و سورن همچنین نشان داده‌اند که هنگامی که ε_f به سمت صفر می‌رود، مدل نوع اول مانند مدل کلاسیک اصطکاکی کولمب و مدل نوع دوم به عنوان مدل کلاسیک با اصطکاک کولمب و استیکشن رفتار می‌کند. اثر برابری با مدل دوم تنها در فاصله‌های معین بعد از شروع حرکت آشکار می‌شود. این بدین معناست که این هنگامی که سرعت کاهش می‌یابد، پدیدار نخواهد شد، همان گونه که اثر استریبک وجود دارد. قله‌های اصطکاکی معادل با استیکشن برای مدل دینامیکی است.

بررسی‌های تجربی

به‌منظور دستیابی به خواص مکانیکی بافت سرطانی کبد، بررسی‌ها به‌وسیله روبش با میکروسکوپ نیروی انجام شده است. به طور معمول بررسی بافت با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، نیازمند آماده‌سازی بافت سرطانی و یا کشت آن می‌باشد. بافت جدا شده از بدن پس از قرارگیری و برش به ابعاد مد نظر، در محلول‌های نگه‌دارنده پارافین قرار داده شده است. به دنبال آن بافت مراحل خشک شدن و قرارگیری بر روی لام را پشت سر گذاشته است. در نتیجه قرارگیری لام در زیر میکروسکوپ، تصاویر توپوگرافی از بافت‌ها به وسیله نرم‌افزار مرتبط با دستگاه استخراج شده است. این تصاویر به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی بیانگر ارتفاع نقاط مختلف در سطح بافت می‌باشد. این اختلاف ارتفاع با تغییر رنگ و در بازه‌ای مشخص قابل مشاهده می‌باشد. شکل (۳) بیانگر تصویر توپوگرافی از بافت مورد مطالعه می‌باشد.

از دیگر کاربردهای میکروسکوپ نیروی اتمی می‌توان به نمودار نیرو- عمق نفوذ مستخرج از نرم‌افزار اشاره کرد. این نمودارها با بررسی بارگذاری مطلوب، از آسیب رساندن به بافت سلولی، ممانعت می‌کنند. همچنین استخراج این نمودار در دستیابی به هندسه سلول نیز مؤثر می‌باشد. شکل (۴) میانگین ارتفاع سطحی سلول را به‌صورت دوبعدی نمایش داده است.

استخراج و بررسی مدول یانگ به‌صورت تجربی

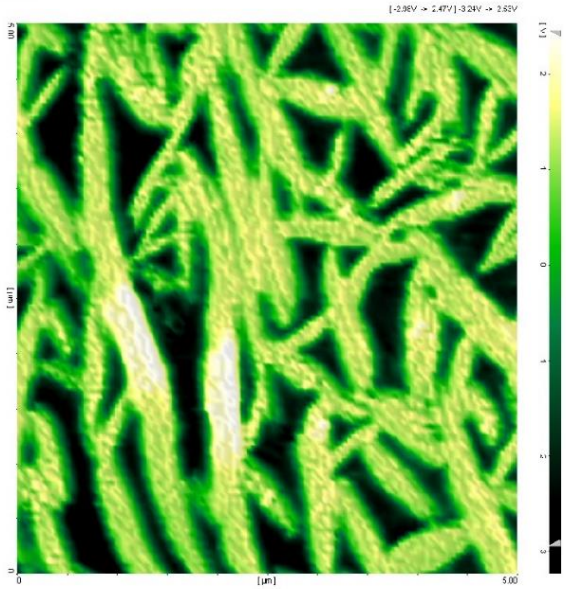
در ابتدا با آزمایش بر روی ۵ نقطه و در هر نقطه ۵ بار، با استفاده از میکرو سکوپ نیروی اتمی به نمودارهای نیرو برحسب عمق نفوذ تجربی دست‌یافته شده است. سپس با استفاده از این داده‌ها به استخراج محدوده مدول الاستیسیته بافت مورد نظر پرداخته شده است. در شکل (۵) میانگین بارگذاری‌ها و نتایج تجربی نیرو بر حسب عمق نفوذ نشان داده شده است.

شبیه‌سازی و استخراج مدول یانگ

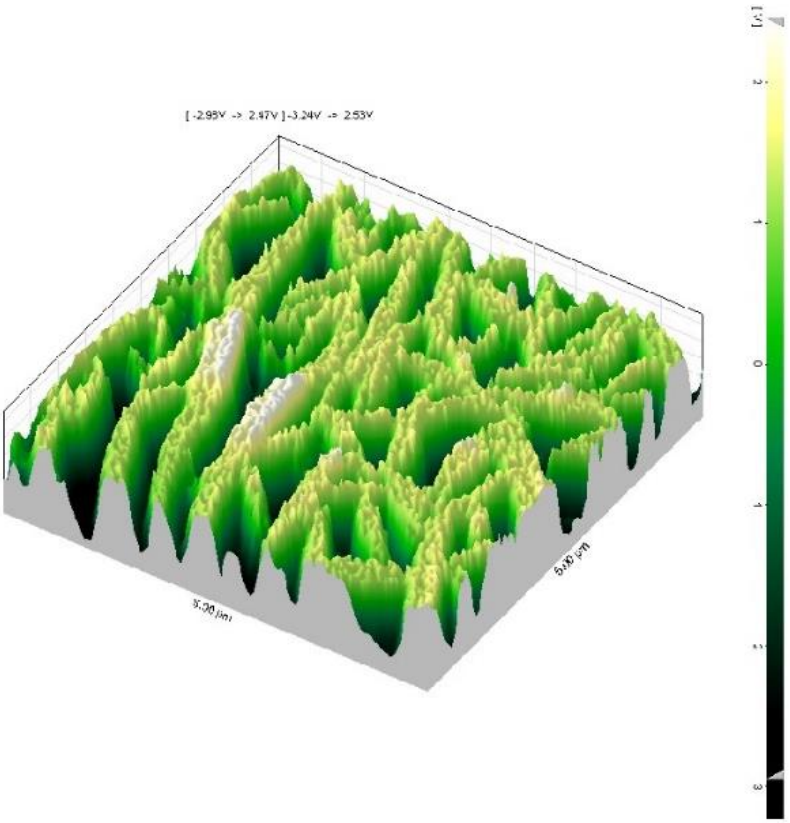
در این پژوهش به شبیه سازی فرایند جابه‌جایی در سطح بافت سرطانی کبد، از مدل‌های اصطکاکی دال، انتگرال‌گیری بازنشانی و مدل‌های بلیمن و سورین بهره گرفته شده است. این نظریه‌ها بر اساس پارامترهای ماده و روابط نیرو- عمق نفوذ در راستای بررسی خواص ماده یا بافت به کار برده شده است.

نتایج مدل دال

پیش از استخراج مدول یانگ با استفاده از مدل دال، با بررسی پژوهش‌های پیشین، محدوده انتخابی فرضی برای مدول یانگ پیدا شده است. سپس با در نظر داشتن این محدوده و همچنین میانگین مدول یانگ تجربی، بازه‌ای متناسب برای بافت و در نرم‌افزار متلب تعریف می‌شود. با توجه به شکل (۶)، مدول یانگ در محدوده ۰٫۸ تا ۱٫۷ کیلو پاسکال برای بافت سرطانی کبد به دست آمده است. همچنین این شکل به تطابق مدول یانگ در تعدادی از نقاط هر دو نمودار تجربی و تئوری اشاره دارد.

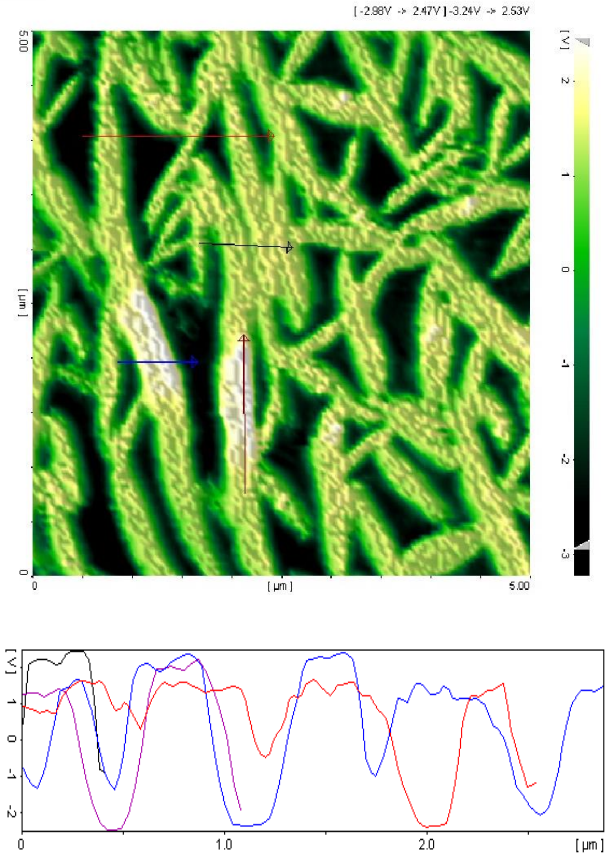


تصویر دوبعدی

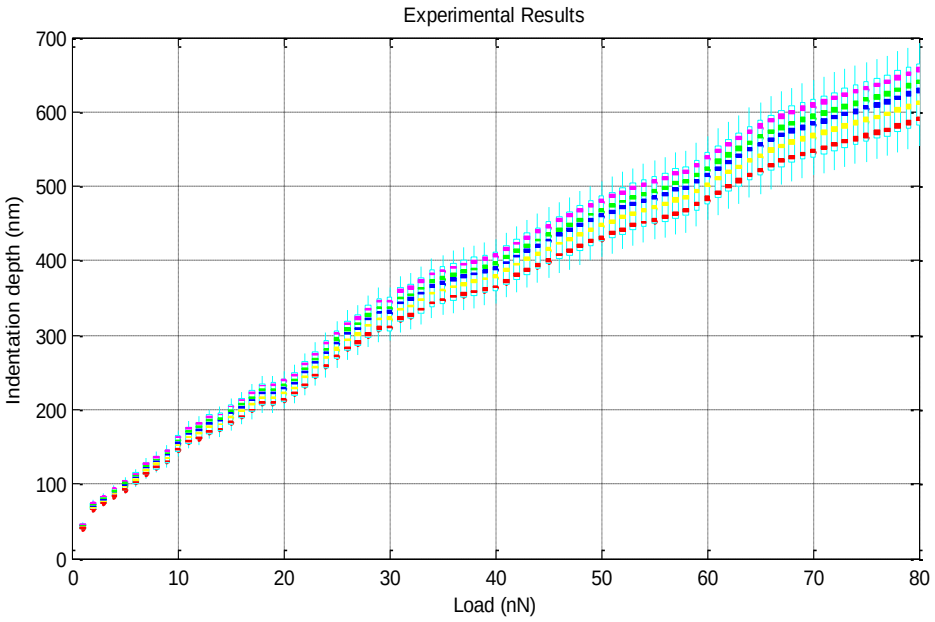


تصویر سه بعدی

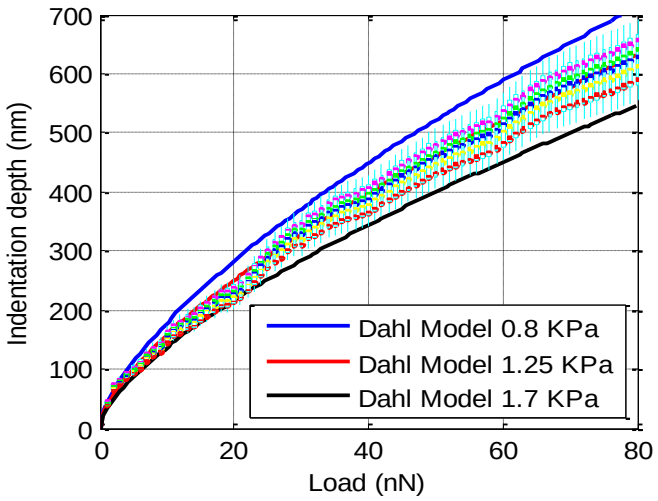
شکل ۳ توپوگرافی ثبت‌شده به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی



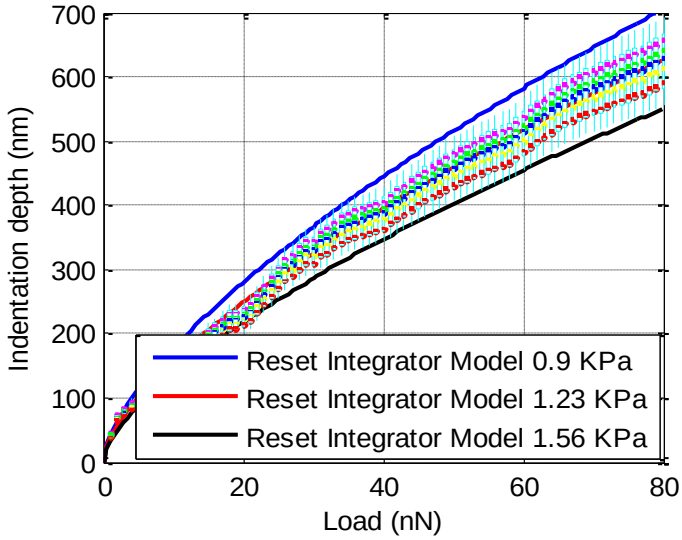
شکل ۴ میانگین ارتفاع بافت سلولی



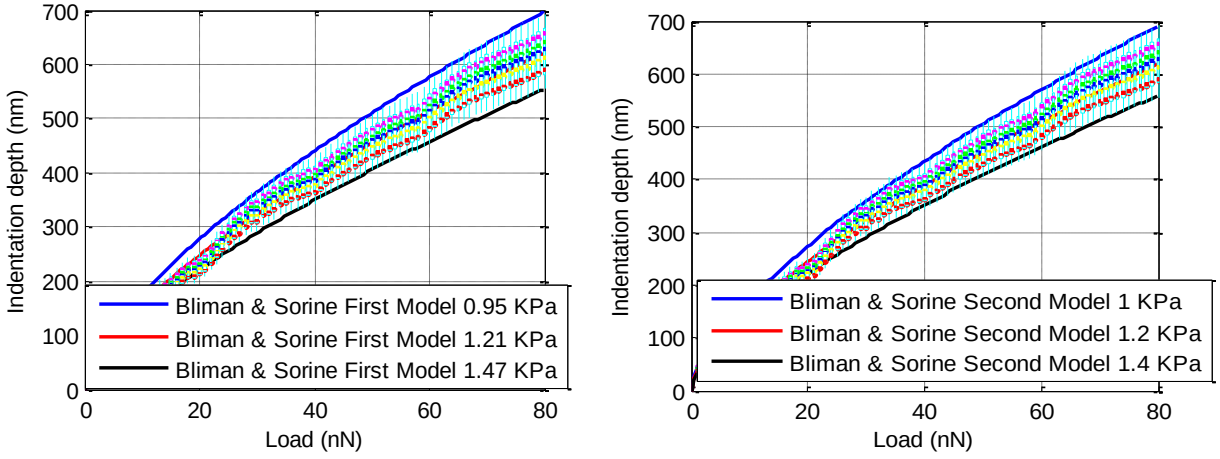
شکل ۵ نمودار تجربی نیرو- عمق نفوذ



شکل ۶ نمودار نیرو عمق نفوذ حاصل از مدل اصطکاکی دال



شکل ۷ نمودار نیرو عمق نفوذ حاصل از مدل انتگرال‌گیری بازنشانی



(ب) مدل دوم بلیمن و سورین (الف) مدل اول بلیمن و سورین

شکل ۸ نمودار نیرو عمق نفوذ حاصل از مدل بلیمن و سورین

نتایج مدل انتگرال‌گیری بازنشانی

نمودارهای شبیه‌سازی به صورت تئوری و تجربی با استفاده از مدل بلیمن و سورین در شکل (۷) نشان داده شده است. مشابه حالت قبل، میانگین مدول یانگ با به‌کارگیری از این مدل ۱,۲۳±۰,۳۳ کیلو پاسکال محاسبه شده است. با توجه به شکل، نمودار حاصل از کار تجربی مابین این بازه قرار گرفته است.

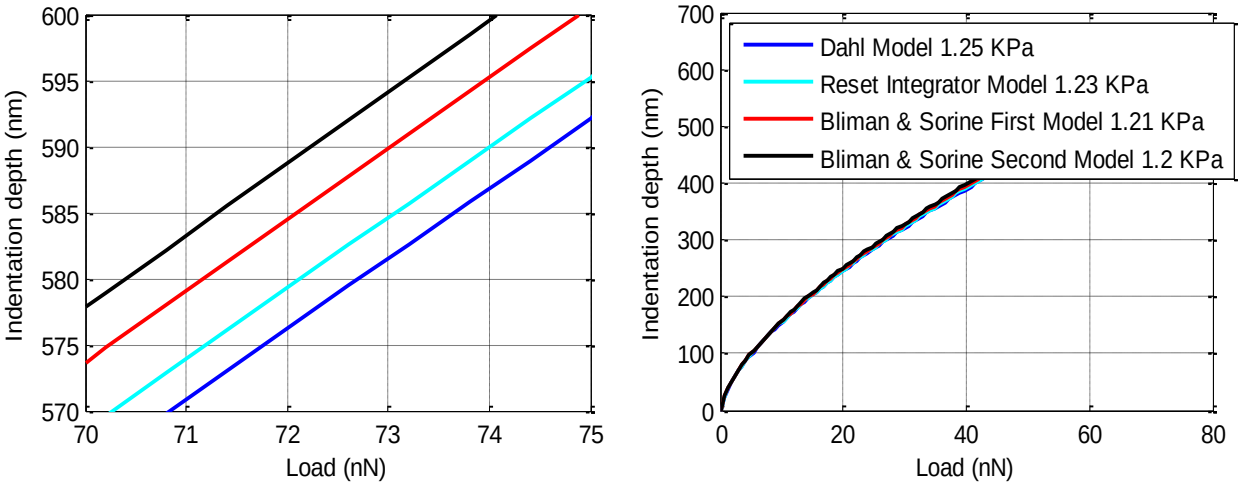
مدل‌های بلیمن و سورین

به‌کارگیری مدل‌های بلیمن و سورین در دو روش اول و دوم انجام شده است. در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) به ترتیب نمودار مدول یانگ حاصل از مدل‌های بلیمن و سورین اول و دوم نشان داده شده است. محدوده مدول یانگ بافت سرطانی کبد با تشابه بسیار زیادی برای حالت اول بلیمن و سورین در بازه ۰/۹۵ تا ۱/۴۷ و برای حالت دوم ۱ تا ۱/۴ کیلو پاسکال استخراج شده است. در هر دوی این شکل‌ها، نمودار تجربی در مکانی تقریبا مطابق با میانگین مدول تئوری قرار گرفته است.

در نهایت مطابق شکل هر (۴) حالت از مدل‌های اصطکاکی مورد استفاده در این پژوهش، نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان به تشابه زیاد هر ۴ نمودار با یکدیگر اشاره کرد. به جهت مقایسه بهتر این نمودارها، در شکل (۹-ب) بازه بسته‌تری از این نمودار در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده تغییرات نیرو برحسب عمق نفوذ می‌باشد.

صحت‌سنجی نتایج

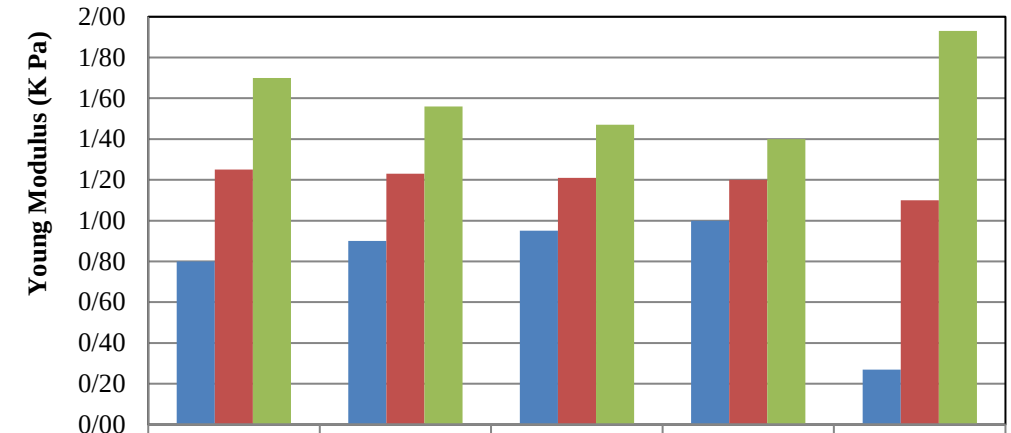
در این مقاله به بررسی محدوده مدول یانگ بافت سرطانی کبد با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی با به‌کارگیری از چهار مدل اصطکاکی دال، انتگرال‌گیری بازنشانی و مدل‌های بلیمن و سورین پرداخته شده است. در این پژوهش مدول به دست آمده از روش تجربی و روش‌های تئوری مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقایسه مقدار مدول یانگ تجربی و با استفاده از مدل دوم بلیمن و سورین محدوده نزدیک‌تری به یکدیگر دارند. بنابراین مقایسه، میزان متوسط مدول یانگ ۱/۲ کیلو پاسکال پیش‌بینی می‌شود. در شکل (۱۰) با بهره‌گیری از مرجع [28]، صحت پژوهش صورت گرفته قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این نمودار میزان مدول یانگ به دست آمده به پژوهش‌های گذشته نزدیک می‌باشد.



(الف) نمودار عمق نفوذ بر حسب نیرو

(ب) مقایسه جزئی نمودارها

شکل ۹ مقایسه نمودارهای تئوری نیرو- عمق نقوذ



	Dahl Model	Reset Integrator Model	Bliman & Sorine First Model	Bliman & Sorine Second Model	Refrence [28]
Minimum	0/8	0/9	0/95	1	0/27
Mean	1/25	1/23	1/21	1/2	1/1
Maximum	1/7	1/56	1/47	1/4	1/93

شکل ۱۰ نمودارهای صحت‌سنجی

نتیجه‌گیری

شناخت خواص مکانیکی بافت‌های سرطانی می‌تواند در پیشگیری از روند تکثیر و کنترل آن مؤثر باشد. استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و به‌کارگیری از مدل‌های اصطکاکی گوناگون، مدول یانگ بافت را با نزدیک‌ترین و کمترین آسیب محاسبه می‌کند. در این پژوهش بافت سرطانی کبد با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و مدل‌های اصطکاکی دال، انتگرال‌گیری بازنشانی و مدل‌های بلیمن و سورین، مورد بررسی قرار گرفته شده است.

هدف اصلی از این تحقیق بررسی میزان اثرگذاری مدل‌های اصطکاکی به کار رفته در میزان نیرو و عمق نفوذ بافت سرطانی کبد می‌باشد. در این پژوهش با توجه به اندازه‌گیری میزان مدول یانگ با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، و در مقیاس نانو به محاسبه مدول یانگ به صورت تئوری پرداخته شد. در میان روش‌های مورد استفاده، مدل به دست آمده با استفاده از مدل بیلمن و سورین دارای دقت بیشتری می‌باشد. با توجه به شکل (۱۰)، اختلاف مینیمم و ماکزیمم در مدل بیلمن و سورین دارای مقدار کمتری بوده و تلرانس بسته‌تری داشته است. همچنین با مقایسه نمودارهای حاکم بر هر ۴ مدل و توجه به معادله (۱۴) می‌توان مشاهده کرد که این معادله پیچیدگی بیشتری داشته است. مطالعات در مقیاس نانو به دلیل اهمیت سطح به حجم، یازمند پیچیدگی بیشتری می‌باشد. بنابراین استفاده از مدلی با پیچیدگی روابط و به دنبال آن دقت بالاتر، مدول مطلوب‌تری را استخراج خواهد کرد.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

نیروی اصطکاک	F
نیروی اصطکاک کولمب	F_c
اصطکاک جنبشی	$f_1 - f_2$
جابه‌جایی	x

علائم یونانی

تعیین‌کننده شکل منحنی تنش- کرنش	α
ضریب سختی	σ
ترم میرایی	$\sigma_1 \frac{dz}{dt}$

واژه‌نامه

میکروسکوپ نیروی اتمی	Atomic force microscopy

Bliman & Sorine First Model	مدل بلیمن و سورین اول
Bliman & Sorine second Model	مدل دوم بلیمن و سورین
Dahl model	مدل اصطکاکی دال
Force microscopy Atomic	میکروسکوپ نیروی اتمی
Hysteresis	هیسترزیس
Indentation-type atomic force microscopy (IT-AFM)	میکروسکوپ نیروی اتمی نوع فرورفتگی
Lowest elasticity peak (LEP)	کم‌ترین پیک الاستیسیته
Nanomanipulation	جابه‌جایی نانوذرات
Phosphate buffer solution (PBS)	محلول بافر فسفات
Reset integragor model	مدل انتگرال‌گیری بازنشانی

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] J. Zemła, J. Danilkiewicz, B. Orzechowska, J. Pabijan, S. Seweryn, M. Lekka, "Atomic force microscopy as a tool for assessing the cellular elasticity and adhesiveness to identify cancer cells and tissues," *Seminars in cell & Developmental Biology*, vol. 73, pp. 115-124, January (2018)

[2] F. Pillet, L. Chopinet, C. Formosa, É. Dague, "Atomic force microscopy and pharmacology: from microbiology to cancerology," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, vol. 1840, no. 3, pp. 1028-1050, (2014).

[3] Y. Kim, J. W. Hong, J. Kim, J. H. Shin, "Comparative study on the differential mechanical properties of human liver cancer and normal cells," *Animal Cells and Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 170-178, (2013).

[4] M. Tian, Y. Li, W. Liu, L. Jin, X. Jiang, X. Wang, Y.Shi, Z. Ding, Y. Peng, J. Zhou, J. Fan, Y. Cao, W. Wang, "The nanomechanical signature of liver cancer tissues and its molecular origin," *Nanoscale*, vol. 7, no. 30, pp. 12998-13010, (2015).

[5] M. Taheri, A. Jabbari, Z. Eghdami, H. Faraji, T. Mollaei, "Experimental and theoretical investigation of Young's modulus of liver cancer tissue using rectangular, V-shaped and dagger cantilevers of an atomic force microscope," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 13, no. 5, pp. 121-135, (2023).

[6] L. Huwart ,F. Peeters , R. Sinkus, L. Annet, N. Salameh, L.C. Beek, Y. Horsmans, B.E Van Beers, "Liver fibrosis: non-invasive assessment with MR elastography," *NMR in Biomedicine*, vol. 19, vo. 2, pp. 173-179, (2006).

[7] M. Bernal, F. Chamming, M. Couade, J. Bercoff, M. Tanter, J. Gennisson, "In vivo quantification of the nonlinear shear modulus in breast lesions: *Feasibility study," IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 63, no. 1, pp. 101-109, (2016).

[8] B. Zarei, S. Bathaee, M. Taheri, M. Momeni, "Second phase of nanomanipulation of particles by atomic force microscopy using Coulomb, HK, and LuGre Friction Models," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 181-190, (2019).

[9] Y. Chen, L. Jiang, L. Qian, "AFM probe for measuring~ 10^{-5} ultra-low friction coefficient: Design and application," *Friction*, vol. 12, no. 1, pp. 64-73, (2024).

[10] B. S. Kumar, "Recent advances and biophysical applications of atomic force microscopy in cancer research: An

overview,"*ChemRxiv*, (2024)

[11] M. Taheri, "Application of atomic force microscopy in critical force and critical time extraction of 2D manipulation for gastric cancer tissue with different friction models," *NANOSCALE*, vol. 9, no. 1, pp. 136-145, (2022).

[12] X. Tan, G. Chen, D. Sun, Y. Chen, "Dynamic Analysis of Planar Mechanical Systems With Clearance Joint Based on LuGre Friction Model," *Journal of. Computattional. Nonlinear Dynamics*, vol. 13, no. 6, pp. , (2018)

[13] M. Mirzaluo, F. Fereiduni, M. Taheri, M. Modabberifar, "Experimental extraction of Young's modulus of MCF-7 tissue using atomic force microscopy and the spherical contact models," *European Biophysics Journal*, vol. 52, no. 1, pp. 81-90, (2023).

[14] F. Yang, W. Chen, Z. Chen, "Photoacoustic micro-viscoelastography for mapping mechanocellular properties," *Journal of Biophotonics*, vol. 17, no. 1, (2024).

[15] M. Taheri, "Investigation of new friction models in two-dimensional manipulation of gastric cancer tissue," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 1-16, (2023).

[16] S. Leporatti, D. Vergara, A. Zacheo, V. Vergaro, G. Maruccio, R. Cingolani, R. Rinaldi, "Cytomechanical and topological investigation of MCF-7 cells by scanning force microscopy," *Nanotechnology*, vol. 20, no. 5, (2009).

[17] M. Taheri, H. Faraji, "Extraction of force and critical time of three-dimensional manipulation of colon cancer tissue with different models of Persson friction," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 12, no. 6, pp. 113-123, (2023).

[18] M. Zakeri, J. Faraji, "Dynamic modeling of nano/microparticles displacement in multi-point contact based on the Rumpf model," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 8, pp. 120-130, (2016).

[19] M. Korayem, M. Taheri, H. Khaksar, S.H. Bathaee, "Using Micro/Nano Scale Contact Models in 3D Manipulation of Deformation of Au Particles Under Angular Effect," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 33-43, (2020).

[20] P. R. Dahl, "A solid friction model," *The Aerospace Corporation*, vol. 18, no. 1, pp. 1-24, (1968).

[21] P. Dahl, "Solid friction damping of spacecraft oscillations", *InGuidance and Control Conference*, pp. 1104, (1975).

[22] P. Dahl, R. Wilder, "Math model of hysteresis in piezo-electric actuators for precision pointing systems." Guidance and control, pp. 61-88, (1985)

[23] P. Dahl, "Solid friction damping of mechanical vibrations," *AIAA Journal*, vol. 14, pp. 1675–82, (1976).

[24] D. A. Haessig, B. Friedland, "On the modeling and simulation of friction," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement, and Control*, vol. 113, no. 3, pp. 354-362, (1991).

[25] P. A. Bliman M. Sorine, "Friction modeling by hysteresis operators application to dahl, stiction and stribeck effects," *Proc. of the Conference Models of Hysteresis*, pp. 10-19, (1991).

[26] P. A. Bliman M. Sorine, "A system-theoretic approach of systems with hysteresis Application to friction modeling and compensation," *Proceeding of the second European Control Conference*, pp. 1844–1849, (1993).

[27] P. A. Bliman M. Sorine, "Easy-to-use realistic dry friction models for automatic control," *Proceedings of the Third European Control Conference*, pp. 3788–3794, (1995).

[28] Y. Sun, H. Li, Q. Chen, Q. Luo, G. Song, "The distribution of liver cancer stem cells correlates with the mechanical heterogeneity of liver cancer tissue", *Histochemistry and Cell Biology*, vol. 156, no. 1, pp. 47–58, (2021).

CONTENTS

Numerical Simulation of a Micropump Based on Piezoelectric Actuator	Ali Nabifar Khafri, Morteza Bayareh	1
Numerical Simulation of Turbulent Heat Transfer in Boiler with Supercritical Fluid and Asymmetric Thermal Conditions	Saied Moghaddam	15
Analyzing the Mechanical Properties of Aluminum-Graphene Nanocomposite with Vacancy and Pin-Holed Defects by Molecular Dynamics Method	Ali Ebrahimi, Masoud Ajri	33
Reducing Stress Shield in the Femur Using Hip Prostheses Made of Functionally Graded Materials	Hastyar Jalilzadeh, Akbar Allahverdizadeh, Behnam Dadashzadeh	49
Numerical Study of the Effect of Non-Uniform Magnetic Field on Ferrofluid Heat Transfer in a Channel with Double Forward-Facing Steps	Hamid-Reza Bahrami, Mahziyar Ghaedi	69
Effect of Using Vortex Generator in the Flow Path of Combustion Product in the Chimney of a Natural Gas Wall-Mounted Water Heater on Flow Hydrodynamics and Improving Heat Transfer	Seyed Hadi Pourhoseini, Mojtaba Baghban	93
Using New Friction Models to Investigate the Mechanical Properties of Liver Cancer Tissue Atomic Force	Moein Taheri, Zahra Sadat Eghdami	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 Moeenfard	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 Nasseri	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

Numerical Simulation of a Micropump Based on Piezoelectric Actuator 1
Ali Nabifar Khafri, Morteza Bayareh

Numerical Simulation of Turbulent Heat Transfer in Boiler with Supercritical Fluid and Asymmetric Thermal Conditions 15
Saied Moghaddam

Analyzing the Mechanical Properties of Aluminum-Graphene Nanocomposite with Vacancy and Pin-Holed Defects by Molecular Dynamics Method 33
Ali Ebrahimi, Masoud Ajri

Reducing Stress Shield in the Femur Using Hip Prostheses Made of Functionally Graded Materials 49
Hastyar Jalilzadeh, Akbar Allahverdizadeh, Behnam Dadashzadeh

Numerical Study of the Effect of Non-Uniform Magnetic Field on Ferrofluid Heat Transfer in a Channel with Double Forward-Facing Steps 69
Hamid-Reza Bahrami, Mahziyar Ghaedi

Effect of Using Vortex Generator in the Flow Path of Combustion Product in the Chimney of a Natural Gas Wall-Mounted Water Heater on Flow Hydrodynamics and Improving Heat Transfer 93
Seyed Hadi Pourhoseini, Mojtaba Baghban

Using New Friction Models to Investigate the Mechanical Properties of Liver Cancer Tissue Atomic Force 107
Moein Taheri, Zahra Sadat Eghdami

Ferdowsi University of Mashhad

نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

شماره پیاپی ۳۷

سال ۳۶، شماره ۳، ۱۴۰۳

Serial No. 37

Vol. 36, No.3
Autumn 2024