ISSN 2008 - 918X

بررسی مدل‌های اصطکاکی جدید در منیپولیشن دوبعدی بافت سرطانی معده ۱
معین طاهری

مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای یک برج خورشیدی با آشوبگرهای مختلف تحت شار حرارتی غیریکنواخت ۱۷
سیاوش زینل پور - زهرا مهردوست

تخمین میزان تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از روش‌های هیبریدی یادگیری ماشین ۳۷
نبی جهانتیغ - جمشید پیری

مقایسهٔ عددی مشخصه‌های ترمو هیدرولیک سمت پوستهٔ مبدلهای حرارتی پوسته-لوله با بفل تری‌فویل و بفل قطاعی به وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک ۵۵
هادی اسکندری- ایمان هاشمی

بررسی تأثیر ناهمگنی استخوان تیبیا بر فرکانس طبیعی به کمک تست مودال و مدل‌سازی اجزای محدود ۷۷
حمید دهقان طرزجانی - محمد علی نظری - محمد محجوب

بهینه‌سازی دقت ابعادی فولادِ قالب در فرایند وایرکات مبتنی بر روش سطح پاسخ ۹۷
مسعود صیدی - فرشاد ربیعی - زهرا صیدی

سال ۳۵، شماره ۲
تابستان ۱۴۰۲

دانشگاه فردوسی مشهد

نشریه علوم کاربردی و محاسباتی

در مکانیک

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۳۲

نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
شماره پیاپی ۳۲
سال ۳۵، شماره ۲، ۱۴۰۲

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 کنسا مریتا، آمریکا
دکتر حمید نیازمند	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

ویراستار: الهام دهقان

کارشناس نشریه: تکتم هوشمند **ویرایش و صفحه‌آرایی:** سیده عاطفه نوعی

نشانی: مشهد- دانشگاه فردوسی مشهد- دانشکده مهندسی- دفتر نشریه - صندوق پستی: ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵

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

فهرست مطالب

بررسی مدل‌های اصطکاکی جدید در منیپولیشن دوبعدی بافت سرطانی معده	معین طاهری	۱
مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای یک برج خورشیدی با آشوبگرهای مختلف تحت شار حرارتی غیریکنواخت	سیاوش زینل پور – زهرا مهردوست	۱۷
تخمین میزان تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از روش‌های هیبریدی یادگیری ماشین	نبی جهانتیغ – جمشید پیری	۳۷
مقایسهٔ عددی مشخصه‌های ترمو هیدرولیک سمت پوستهٔ مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله با بفل تری‌فویل و بفل قطاعی به وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک	هادی اسکندری- ایمان هاشمی	۵۵
بررسی تأثیر ناهمگنی استخوان تیبیا بر فرکانس طبیعی به کمک تست مودال و مدل‌سازی اجزای محدود	حمید دهقان طرزجانی – محمد علی نظری محمد محجوب	۷۷
بهینه‌سازی دقت ابعادی فولاد قالب در فرایند وایرکات مبتنی بر روش سطح پاسخ	مسعود صیدی – فرشاد ربیعی زهرا صیدی	۹۷

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

Investigating New Friction Models in Two-Dimensional Manipulation of Gastric Cancer Tissue

Research Article

Moein Taheri[1]

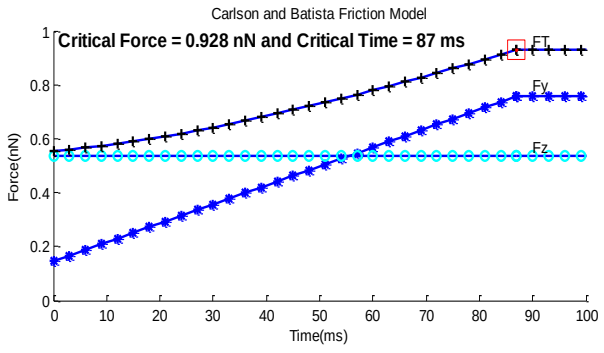
DOI: 10.22067/jacsm.2022.79529.1146

1. Introduction

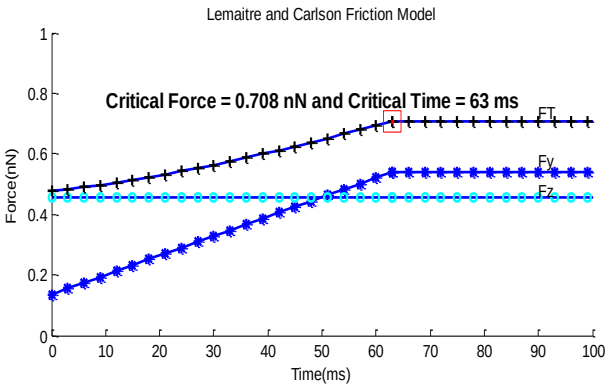
The commercialization and application of nanoscience in the field of medicine and cancer are among the significant goals of researchers of this field. The increasing need for obtaining information about cancer tissues to create a new method for the treatment of this disease cannot be ignored. Taking into account the equations of Carlson-Batista, Lemaître-Carlson, and FKT friction models, and the results obtained from the exploration of gastric cancer tissue by atomic force microscope, this study simulated two-dimensional manipulation of gastric tissue. The critical force and critical time are calculated and the most optimal value is considered. Moreover, the results are compared with the results of other studies.

2. Results

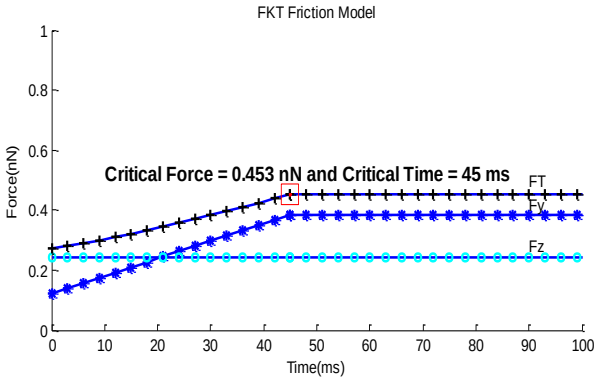
Figure 1 shows that the forces are applied in x and z directions and are shown as F_x and F_y. Due to the constant vertical force of the surface in the z direction, the force in this direction remains constant. By summarizing the two forces, a black graph or resultant force graph was obtained. By fixing all the forces in different directions as well as the resulting force, the critical force and time were recorded in the diagrams considering different friction models.



a) Carlson and Batista Friction model



b) Lemaitre and Carlson Friction model



c) FKT Friction model

Figure 1. Results of the first phase of nanomanipulation with different friction models

3. Verification

The results of this study were compared with the results of other studies like [4] to check the accuracy of the results. In [4] the Coulomb friction model has the biggest amount of force and time due to the simplicity of the modeling. Moreover, the lowest value belongs to the LuGre friction model due to considering the actual contact surface. This

*Manuscript received: November 10, 2022. Revised, November 21, 2022, Accepted, December 17, 2022.

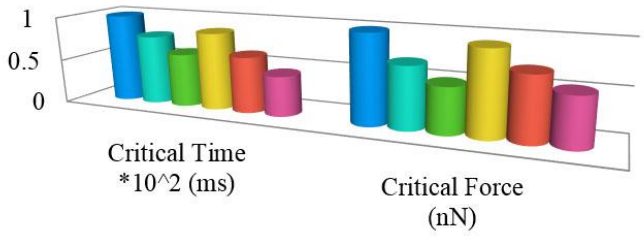
[1]. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
Email: m-taheri@araku.ac.ir

study showed that the FKT contact model is the most favorable friction model due to the development of other models, being more accurate in modeling, and providing the lowest amount of force and critical time to prevent damage to tissues.

Figure 2 shows that the force value in the FKT model is 0.543 nN, which is very close to the force value in the LuGre friction model that is 0.51 nN. Moreover, the amount of critical time was reduced from 0.6 ms in the LuGre model to 0.45 ms in the FKT model.

4. Conclusion

The application of nanomanipulation technology for examining cancer tissues with the aim of identifying and treating this disease will be possible when detailed data on the first and second phases of manipulation and the parameters affecting them are provided. Therefore, the desired cancerous tissue should be explored by atomic force microscope and the required diagrams and images should be prepared. This study investigated the impact of different friction models on the force and critical time of gastric cancer tissue manipulation. The investigated models include Carlson and Bautista, Lemaitre and Carlson and FKT models. In this way, the geometry of gastric cancer tissue is assumed to be spherical by the topographical image provided by the atomic force microscope. The force-time diagrams are drawn considering the resultant force and force parameters in the x and z direction. The critical force and time are recorded at the moment when all the diagrams are fixed, and the critical force and time are recorded for each of the models. The values 0.453 nN and 45 ms were calculated as the lowest values of force and critical time, respectively, by considering the FKT friction model. Therefore, in order to find the optimal amount of force and critical time, all of the models are examined, and then other environmental and geometrical parameters and forces resisting motion are examined, and an optimal model is presented considering values close to reality. The second phase is also considered and the comprehensive model is used in practical applications.



	Critical Time *10^2 (ms)	Critical Force (nN)
Coulomb [4]	1.02	1.16
HK [4]	0.78	0.69
LuGre [4]	0.6	0.51
Carlson and Batista	0.87	0.928
Lemaitre and Carlson	0.63	0.708
FKT	0.45	0.543

Figure 2. Validation of force values and critical time obtained with other sources

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ،۳۵، ۱۴۰۲. (۱-۱۶)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

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

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

بررسی مدل‌های اصطکاکی جدید در منیپولیشن دوبعدی بافت سرطانی معده

معین طاهری [۱]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.79529.1146

چکیده *اهدافی همچون عدم آسیب رساندن به بافت‌های سالم و سایر ارگان‌ها در هنگام استفاده از دارو و شناسایی هرچه زودتر بافت‌های سرطانی، سبب ورود علم نانو در حوزه‌ی پزشکی شده است. در این راستا، تحقیقاتی با درنظر گرفتن ابزار و روش‌های گوناگون صورت گرفته که مطلوب‌ترین این روش‌ها با توجه به کاربردهای فراوان در هنگام مطالعه‌ی بافت‌های سلولی، در محیط‌های مختلف، روش نانومنیپولیشن مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی بوده است. لذا در این مقاله به‌منظور یافتن مطلوب‌ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی در نانومنیپولیشن بافت سرطانی، با هدف کاوش سطح و به‌دست آوردن اطلاعات مربوط به بافت سرطانی معده با کمترین آسیب، شبیه‌سازی دوبعدی نانومنیپولیشن انجام شده است. فاکتور مهم مورد بررسی در این تحقیق اصطکاک می‌باشد که از جمله عوامل مقاوم در برابر حرکت و دارای اثر مستقیم بر نیرو و زمان بحرانی است. لذا با توسعه‌ی مدل‌های اصطکاکی ساده، با در نظر گرفتن مدل‌های اصطکاکی کارلسون-باتیستا، لمایتره-کارلسون و اف‌کاتی، نمودارهای نیرو- زمان ترسیم شده و مقادیر نیرو و زمان بحرانی محاسبه شده است. کمترین مقدار نیرو برابر با ۰,۴۵۳ نانونیوتن و کمترین مقدار زمان بحرانی برابر با ۴۵ میلی‌ثانیه بوده است، که از شبیه‌سازی با مدل اصطکاکی اف‌کاتی حاصل شده است. همچنین مقایسه‌ی این مقادیر با پژوهش‌های گذشته، نشان‌دهنده‌ی کاهش نیرو و زمان بحرانی نسبت به مدل اصطکاکی لاگره بوده است.*

واژه‌های کلیدی بافت سرطانی معده، مدل اصطکاکی، نانومنیپولیشن، نیروی و زمان بحرانی، میکروسکوپ نیروی اتمی.

Investigation of New Friction Models in Two-Dimensional Manipulation of Gastric Cancer Tissue

Moein Taheri

Abstract *Goals such as not harming healthy tissues and other organs when using medicine and identifying cancerous tissues as soon as possible have led to the entry of nanoscience into the field of medicine. In this regard, a research was conducted considering various tools and methods, and the most desirable of these methods was the nanomanipulation method based on the atomic force microscope due to its many applications in the study of cell tissues in different environments. Therefore, in this article, in order to find the optimal amount of force and critical time in nanomanipulation of cancer tissue, with the aim of exploring the surface and obtaining information about gastric cancer tissue with the least damage, 2D simulation of nanomanipulation has been carried out. The important factor investigated in this research is friction, which is one of the factors that resist movement and has a direct effect on force and critical time. Therefore, with the development of simple friction models, considering Carlson-Batista, Lemaitre-Carlson and FKT friction models, force-time diagrams have been drawn and critical force and time values have been calculated. The lowest value of the force was equal to 0.453 nN and the lowest value of the critical time was equal to 45 ms, which was obtained from the simulation with the FKT friction model. Also, by comparing these values with past researches, a decrease in force and critical time compared to the LuGre friction model has been seen.*

Key Words Gastric cancer tissue, friction model, nanomanipulation, critical force and time, atomic force microscopy.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۹و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۲۶می‌باشد.

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

Email: m-taheri@araku.ac.ir

مقدمه

تجاری‌سازی و کاربردی شدن علم نانو در حوزه‌ی پزشکی و بیماری سرطان از اهداف قابل‌توجه محققان در این زمینه می‌باشد. نیاز روزافزون به کسب اطلاعات از بافت‌های سرطانی برای ایجاد روشی نوین در درمان این بیماری، غیرقابل چشم‌پوشی است. لذا در فرآیند منیپولیشن و کارهای صورت گرفته در این حوزه، ابتدا سعی بر آن شده است، که پارامترهای اثرگذار بر ابزار مورد استفاده در تحقیق مورد بررسی قرار گرفته و مطلوب‌ترین ابزار مورد استفاده قرار گیرد. سپس پارامترهای محیطی، هندسی و غیره در دو فاز نانومنیپولیشن شناسایی شده و در طی تحقیقات مختلف، تمامی آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد و مطلوب‌ترین نتایج به‌عنوان مدلی جامع برای مطالعه‌ی بافت‌های سرطانی ارائه گردد.

کارلسون و باتیستا [1] با مقایسه‌ی نتایج عددی و نتایج حاصل از آزمایش، مدلی برای توصیف اصطکاک بین دو سطح که توسط یک لایه‌ی نازک اتمی از مولکول‌های روان‌کننده جدا شده‌اند، ارائه داده‌اند. این مدل به مدل اصطکاکی کارلسون و باتیستا معروف می‌باشد. لمایتره و کارلسون [2] با مطالعه‌ی یک جامد بی‌شکل در آزمایش تنش-کرنش، و یک روان کننده در آزمون تریبولوژی و بررسی پارامترهای مختلف، به ارائه‌ی مدل اصطکاکی لمایتره و کارلسون پرداخته‌اند.

لمایتره و کارلسون [3] با تعمیم تئوری ناحیه تبدیل برشی، مدل اصطکاکی اف‌کاتی را برای بررسی مواد متراکم و نامنظم در زمینه‌ی آزمایش‌های لغزش چسبنده در روان‌کاری مرزی ارائه داده‌اند. طاهری [4] به منظور بررسی سرطان معده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، به مدل‌سازی این فرآیند به صورت دوبعدی و با استفاده از مدل‌های اصطکاکی مختلف پرداخته است. مدل‌های کولمب، لاگره و اچ‌کا از جمله موارد مورد بررسی بوده‌اند. در نهایت نیز با بررسی نتایج حاصل نیرو و زمان بحرانی برای سرطان معده محاسبه شده است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با در نظرگرفتن مدل‌های اصطکاکی مختلف انجام شده است. نمودارهای نیرویی در منیپولیشن دوبعدی ترسیم شده است و از نمودار نیروی برآیند برای مقایسه استفاده شده است. بعد از ثابت شدن مقدار نیرو در مدل‌های اصطکاکی مختلف، مقدار نیرو و زمان بحرانی به دست آمده است. کم‌ترین میزان نیرو و زمان بحرانی بافت سرطانی معده در مدل اصطکاکی لاگره به‌ترتیب با مقادیر ۰/۵۱ نانونیوتن و ۶۴ میلی‌ثانیه ثبت شده است.

طاهری [5] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به بررسی تجربی بافت سرطانی روده پرداخته است. سپس با استفاده از مدل‌های اصطکاکی لاگره، کولمب و اچ‌کا، روند نانومنیپولیشن سه‌بعدی را شبیه‌سازی کرده است. در نهایت با مقایسه‌ی نتایج حاصل، نیرو و زمان بحرانی با توجه به هر سه مدل اصطکاکی محاسبه شده است. با مقایسه‌ی نمودار برآیند نیروها و با در نظر گرفتن مدل‌های اصطکاکی مختلف، در منیپولیشن سه‌بعدی، بیش‌ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی برای مدل اصطکاکی کولمب و کم‌ترین مقدار برای مدل اصطکاکی لاگره ثبت شده است. با توجه به در نظر گرفتن سطح تماس ظاهری در ابعاد نانو، در مدل کولمب و سطح واقعی تماس در مدل اصطکاکی لاگره، این نتایج قابل توجیه می‌باشند.

کورایم و همکارانش [6] به تعیین تجربی زبری سطح بافت سرطانی HT29 با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به‌منظور کاربرد در نانومنیپولیشن پرداخته‌اند. در این مقاله زبری سطح سلول سرطانی HT29 با استفاده از تحلیل تصاویر توپوگرافی به دست آمده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی تعیین شده است. بر مبنای نتایج آنالیز زبری انجام شده و معادلات تئوری زبری رابینوویچ، شعاع متوسط برجستگی‌های سطح نمونه و سطح مبنا تعیین شده است. این مقادیر در روابط مدل دینامیک منیپولیشن ذرات زبر وارد شده و مقادیر نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن سلول‌ها شبیه‌سازی شده است. بر مبنای نتایج, مد غلتشی، مد غالب در شروع به حرکت سلول است و تحلیل برمبنای مدل رابینوویچ نسبت به مدل رامپ مقادیر نیرو و زمان بحرانی کمتری را پیش‌بینی می‌کند.

بو و همکارانش [7] با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، خواص مکانیکی همچون خزش و تنش را برای بافت‌های سرطانی کبد و معده در رده‌های مختلف محاسبه کرده‌اند. همچنین آن‌ها به بررسی رفتار این بافت‌ها و مطابقت آن‌ها با تئوری ویسکوالاستیک خطی پرداخته‌اند. هو و همکارانش [8] به ارائه‌ی پیشرفت‌های اخیر نانومنیپولیشن در حوزه‌ی پزشکی پرداخته‌اند. این پیشرفت‌ها شامل بررسی خواص مکانیکی، انتقال ساختاری، بررسی برهم‌کنش‌های بین مولکولی اجسام زیستی و سایر موارد بوده است. در نهایت نیز رویکردهای آینده‌ی نانوپزشکی مورد بحث قرار گرفته است.

لو و همکارانش [9] به بررسی برهم‌کنش نوعی دارو با

بافت‌های سرطانی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. این فرآیند با هدف بررسی اثربخشی دارو و همچنین یافتن راه‌های جدید برای توسعه‌ی دارو انجام شده است. طاهری و بطحایی [10] بافت سرطانی معده را با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مورد کاوش قرار داده‌اند. در این پژوهش به استخراج مدول یانگ بافت سرطانی معده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به‌منظور شناسایی بافت پرداخته‌شده است. برای این منظور دو مدل تماسی هرتز و جی‌کاآر جهت استخراج مدول یانگ توسعه داده شده‌اند. در یک آزمایش تجربی پس از جداسازی سلول‌ها از بافت سرطانی معده با استفاده از تیرک مستطیلی شکل و سوزن‌های هرمی و کروی میکروسکوپ نیروی اتمی نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و نمودارهای نیرو- عمق نفوذ به‌دست‌آمده است؛ سپس با استفاده از روش نصف کردن و نرم‌افزار متلب به تحلیل داده‌ها پرداخته شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از نمودار نیرو- عمق نفوذ می‌توان ضریب فنری ظاهری برای سلول مدل‌سازی کرد، زیرا شیب این نمودار خطی است. حدود مدول یانگ بافت مورد نظر، با توجه به نمودارهای به‌دست‌آمده از مقایسه نتایج تجربی مستخرج از میکروسکوپ نیروی اتمی و نتایج تئوری تماسی هرتز و جی‌کاآر ۳۲۵±۲۵ کیلو پاسکال به‌دست‌آمده است.

طاهری و میرزالو [11] مدول یانگ بافت سرطانی سینه را به صورت تجربی و تئوری استخراج کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از میکرو سکوپ نیروی اتمی، به تصویربرداری از بافت سرطانی پرداخته‌اند. همچنین شبیه سازی‌هایی با در نظر گرفتن مدل‌های تماسی مختلف انجام داده و نتایج تجربی و تئوری را با هم مقایسه کرده‌اند. با توجه به مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام شده، مدول یانگ سلول سرطانی سینه ام سی‌اف-۷ در محدوده‌ی ۸۰۰ پاسکال به دست آمده است. همچنین مدل تماسی سی‌اُاِس تطابق بیشتری با نتایج تجربی داشته است.

ها و همکارانش [12] با توجه به اندازه‌گیری جداگانه طولی و عرضی خواص مکانیکی در روش‌های سنتی، به ارائه‌ی روشی چندبعدی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. در نهایت نتایج تجربی نشان داده است که ویژگی‌های مکانیکی طولی اندازه‌گیری‌شده با ویژگی های دامنه و فاز عرضی سازگاری داشته و مدل ارائه شده مفید بوده است. کورایم و همکارانش [13] به بررسی فرآیند نانومنیپولیشن با درنظر گرفتن تئوری های تماسی جی کاآر، دی‌ام‌تی و جماری و همچنین هندسه های بیضوی و کروی پرداخته‌اند. عمق فرورفتگی، بیشترین نیروی زبری و بیشترین سطح تماس از جمله پارامترهای مورد تحلیل بوده‌اند. این آزمایش به صورت تجربی نیز انجام شده و پس از استخراج نمودارنیرو-جابه‌جایی، نتایج تئوری و تجربی با هم مقایسه شده‌اند.

دی ارلاندو و همکارانش [14] با توجه به اهمیت نانو در صنعت الکترونیک، به بررسی تغییرات رزونانس و گسترش انتقال الکترونیکی بر روی نانولوله‌های کربنی تک‌جداره پرداخته‌اند. در این تحقیق بررسی‌های لازم به صورت تجربی بر روی دو نانولوله‌ی نیمه‌رسانا و رسانا توسط میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شده است. ماکولاویسیو و همکارانش [15] با توجه به اهمیت دست‌یابی به موقعیت دقیق نانوذرات و توانایی کار با آن‌ها به مقایسه‌ی ابزارهای مورد استفاده در نانومنیپولیشن پرداخته‌اند. نحوه‌ی کار، محیط مورد استفاده و سایر موارد، برای ابزارهایی همچون میکروگریپرها و میکروربات‌ها برای نانومنیپولیشن و محرک های پیزوالکتریک برای منیپولیشن نانوذرات با نظارت بصری با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

ژانگ و همکارانش [16] روشی جدید برای نانومنیپولیشن با میکرولنز را توسعه داده‌اند، که قادر به تصویربرداری با وضوح فوق‌العاده در زمان واقعی است. در این روش با استفاده از مکانیزم میکروسکوپ نیروی اتمی، تصویربرداری نوری با حداقل اندازه‌ی مشخصه‌ی ۸۰ نانومتر انجام شده است. نانومنیپولیشن، تحت هدایت بصری در زمان واقعی برای نانوذرات فلوئور سنت با قطر ۱۰۰ نانومتر و نانو سیم‌های نقره با قطر ۸۰ نانومتر به دست آمده است. آن‌ها در نهایت بیان کرده‌اند که این روش امکان مشاهده و منیپولیشن هم‌زمان را فراهم کرده است، که می‌توان از آن، برای نمونه‌های بیولوژیکی استفاده کرد.

خاکسار [17] معادله‌ی تماس بهینه برای اعمال در نانومنیپولیشن و همچنین یافتن مسیر بهینه حرکت با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک ترکیبی را مورد بررسی قرار داده است. در نهایت نیز نتایجی با بیشترین مساحت تماس در تئوری تماسی جماری نسبت به دو مدل هرتز و جی‌کاآر ارائه داده است. همچنین مسیر بهینه را برای سطحی پر از نانوذرات نقره مشخص کرده است.

طاهری [18] با استفاده از آنالیز حساسیت سوبل به بررسی اثرات پارامترهای ابعادی مختلف از جمله طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع نوک، سرعت در جهت محورهای xو y، شعاع ذره، شعاع نوک سوزن و طول ذره بر روی نیرو و زمان بحرانی در دو مد حرکتی لغزشی و غلتشی و در دو راستای x و y پرداخته است. نتایج نشان‌دهنده‌ی اثر قابل‌ملاحظه‌ی ضخامت تیرک و طول آن بر نیروی بحرانی و ارتفاع نوک سوزن و ضخامت تیرک بر زمان بحرانی بوده است.

طاهری و همکارانش [19] به محاسبه‌ی مدول یانگ بافت سرطانی سر و گردن در طی فرآیند نانومنیپولیشن مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. در این پژوهش جهت درمان و تشخیص سرطان سر و گردن، به تخمین مدول یانگ بافت سرطانی سر و گردن با استفاده از فرآیند نانومنیپولیشن پرداخته شده است. تصاویر توپوگرافی و نمودارهای تجربی مورد استفاده از طریق کاوش بافت سرطانی سر و گردن توسط میکروسکوپ نیروی اتمی استخراج شده است. نوآوری اصلی این تحقیق در استفاده از مدل‌های تماسی جی‌کاآر، امدی و تاتارا بوده است. هدف اصلی آن‌ها، رسم نمودارهای عمق نفوذ برحسب نیروی اعمالی، جهت تخمین مدول یانگ بافت سر و گردن بوده است. با مقایسه‌ی نتایج تئوری و تجربی، مقدار ۱۲ کیلو پاسکال با درنظرگرفتن مدل تماسی جی‌کاآر و مقدار ۱۱ کیلو پاسکال با مدل تماسی تاتارا به‌عنوان مقادیر مدول یانگ بافت سرطانی سر و گردن تخمین زده شده‌اند.

خلیلی و همکارانش [20] منیپولیشن نانوذره‌ی دی‌اِن‌اِی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی را به روش المان محدود با کمک تئوری‌های مکانیک تماس بررسی نموده‌اند. در این مطالعه با استفاده از تئوری‌های مکانیک تماس هرتز، جی‌کی‌آر، دی‌اِم‌تی و بی‌سی‌پی و همچنین استفاده از ساختار سلول زیستی دی‌اِن‌اِی با بهره‌گیری از روش اِلمان محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس به مطالعه میزان جابه‌جایی، شتاب، نیرو، تنش و سرعت برحسب زمان و جابه‌جایی مولکول دی‌اِن‌اِی بر روی یک صفحه‌ی مبنا و عوامل مؤثر بر آن‌ها پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که در تغییر شکل صورت گرفته بین ذرات هدف و نوک کروی سوزن، مدل هرتز کمترین و مدل جی‌کاآر بیشترین تغییر شکل و عمق نفوذ را نشان داده‌اند. با افزایش زاویه‌ی نوک سوزن با محور z، میزان عمق نفوذ و تغییر شکل ایجاد شده بین ذره و صفحه‌ی مبنا کاهش یافته است. همچنین نمودار تغییرات هر یک از پارامترهای مورد مطالعه عوامل مؤثر به ازای ۲۰ میکرومتر جابه‌جایی و ۲۰ میلی‌ثانیه زمان برای فرآیند منیپولیشن دی‌اِن‌اِی محاسبه شده است.

فریدونی و همکارانش [21] میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی را مطالعه نموده‌اند. در این پژوهش به بررسی اثرات هشت پارامتر شامل شعاع ذره، شعاع سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، عرض تیرک، طول ذره، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته بر نیرو، در فاز دوم منیپولیشن پرداخته شده است. برای این منظور در این مقاله از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست استفاده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع بوده است که ارتفاع سوزن با ۴۸ درصد، عرض تیرک با ۱۹ درصد، مدول الاستیسیته با ۱۴ درصد و طول تیرک با ۸ درصد، بیشترین اثر را بر تغییرات نیرو در فاز دوم منیپولیشن خواهند داشت. در حالی‌که مطابق نتایج به دست آمده، می‌توان از اثرات ناچیز ناشی از تغییرات شعاع ذره، شعاع سوزن، ضریب پواسون سوزن و طول استوانه‌ای میکرو/نانوذرات هدف چشم‌پوشی نمود.

مشیرپناهی و همکارانش [22] مدل سازی فرآیند سه‌بعدی نانومنیپولیشن نانوذره‌ی استوانه‌ای را بررسی نموده‌اند. در مدل آن‌ها، نیروی اصطکاک به عنوان نیروی توزیع شده در نظر گرفته شده است، که بر طول متغیر تأثیر می‌گذارد. مدل پیشنهادی آن‌ها، علاوه بر ارائه‌ی زمان و نیروی بحرانی، اطلاعات مفیدی در مورد نحوه‌ی حرکت نانوذرات از شروع حرکت تا رسیدن به نقطه‌ی نهایی ارائه داده است.

مدبری‌فر و همکارانش [23] به مطالعه‌ی مشکلات مربوط به کنترل مدل داخلی تطبیقی موتور جریان مستقیم در هر دو حالت معمولی و عصبی پرداخته‌اند. آن‌ها بیان نموده‌اند که مهم‌ترین جنبه‌های طراحی بلوک‌های کنترل مدل داخلی تطبیقی، انتخاب معماری، الگوریتم‌های یادگیری و نمونه‌هایی از یادگیری است.

کورایم و همکارانش [24] فرآیند هل دادن میکرو/نانوذرات استوانه‌ای ناهموار بر روی سطح با سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها برای این منظور ابتدا مکانیک تماس شامل چسبندگی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. سپس، روشی برای تخمین سطح تماس واقعی بین یک ذره استوانه‌ای ناهموار (که زبری سطح آن توسط مدل‌های رامپ و

رابینوویچ توصیف شده است) و یک سطح صاف ارائه شده است. سپس یک مدل دینامیکی برای هل دادن ذرات استوانه‌ای ناهموار بر روی یک سطح با یک سوزن میکرو سکوپ نیروی اتمی به دست آمده است. پس از آن، فرآیند برای اندازه‌های مختلف ذرات و ابعاد مختلف زبری شبیه سازی شده است. در نهایت، با کاهش طول ذره‌ی استوانه‌ای، شرایط شبیه سازی به شرایط منیپولیشن یک ذره کروی صاف بر روی یک بستر ناهموار نزدیک‌تر شده و نتایج شبیه‌سازی این دو مورد با هم مقایسه شده‌اند.

کورایم و همکارانش [25] به بررسی منیپولیشن میکرو/نانوذرات دی‌ان‌ای و مخمر در محیط های بیولوژیکی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. آن‌ها بیان نموده‌اند که با منیپولیشن میکرو/نانوذرات از مواد و اشکال مختلف، به عنوان ذرات هدف، در محیط‌های مختلف بیولوژیکی، نیروهای برهم‌کنش موجود بین این میکرو/نانوذرات و محیط زیستی با محیط هوا متفاوت خواهد بود. بنابراین آن‌ها در پژوهش خود ابتدا به مرور کلی و شبیه‌سازی نیروهای مهم فعال در محیط زیستی پرداخته و نیروهایی مانند نیروی چسبندگی، نیروی آب‌پوشی و نیروی دو لایه الکترواستاتیک در محیط‌های مختلف را مدل سازی و شبیه سازی نموده‌اند. پس از کاوش و مدل‌سازی محیط‌های بیولوژیکی مختلف (در مقایسه با محیط هوا)، عملیات منیپولیشن با میکروسکوپ نیروی اتمی برای میکرو/نانوذرات مختلف مانند طلا، دی‌ان‌ای و مخمر با در نظر گرفتن نیروهای موجود در محیط های مختلف بیولوژیکی شبیه سازی شده است. نتایج منیپولیشن در این مقاله نشان داده است که در محیط هوا و مایع، ذرات بیولوژیکی (دی‌ان‌ای و مخمر) پس از مدت‌زمان طولانی‌تر و با نیروی بزرگ‌تری نسبت به ذرات طلا شروع به حرکت خواهند کرد. این نتیجه با توجه به خواص و چسبندگی ذرات بیولوژیکی قابل پیش‌بینی بوده است. همچنین با مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شده است که نیروی بحرانی و زمان بحرانی منیپولیشن با میکروسکوپ نیروی اتمی برای میکرو/نانوذرات طلا در آب نسبت به هوا کمی افزایش یافته که می‌تواند به دلیل خواص آب و نیروهای موجود در آب بوده باشد.

کورایم و همکارانش [26] نظریه های تماس الاستیک-پلاستیک را برای نانوباکتری‌های کروی نرم شبیه‌سازی و مدل‌سازی نموده‌اند تا در منیپولیشن میکرو/نانوذرات مختلف زیستی بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شود. آن‌ها ابتدا تماس الاستیک را برای سه نوع نانو باکتری مختلف با استفاده از مدل تماس هرتز و المان محدود شبیه‌سازی نموده‌اند. مقایسه‌ی نتایج شبیه سازی تماس الاستیک با داده‌های تجربی نشان داده است که در نظر گرفتن تماس الاستیک برای شبیه‌سازی تماس نانوذرات زیستی مناسب نیست و نتایج نادرستی به همراه خواهد داشت. بنابراین، در این پژوهش سعی بر آن شده است تا نظریه‌ی تماس الاستیک- پلاستیک چانگ توسعه داده و شبیه‌سازی گردد تا در مکانیک تماس برای کاربرد در شبیه سازی منیپولیشن استفاده شود. مقایسه‌ی شبیه سازی تئوری تماس چانگ با داده‌های تجربی موجود و نتایج شبیه سازی تماس چن و همکاران نشان داده است که نظریه‌ی کامل الاستیک-پلاستیک چانگ نتایج مطلوبی را به همراه داشته است. مقایسه‌ی نمودار شعاع تماس نسبت به عمق فرورفتگی در تئوری‌های هرتز و چانگ نشان داده است که شعاع تماس ایجاد شده در حالت الاستیک - پلاستیک بزرگ‌تر از شعاع تماس در حالت کشسان بوده است.

همان‌طور که در پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود، اهمیت نانو در حوزه‌ی پزشکی و به‌خصوص حوزه‌ی بافت‌های سرطانی غیر قابل چشم‌پوشی می‌باشد. همچنین می‌توان به اهمیت محاسبه‌ی نیرو و زمان بحرانی برای شروع تحقیقات کاربردی در این حوزه اشاره نمود. لذا با توجه به بررسی پارامترهایی همچون مدل‌های تماسی و مدل‌های اصطکاکی‌های ساده، در این مقاله مدل‌های اصطکاکی دقیق‌تری برای رسیدن به مقادیر مطلوب‌تر برای بافت سرطانی معده استفاده شده است.

در این مقاله با در نظر گرفتن معادلات مدل‌های اصطکاکی کارلسون-باتیستا، لمایتره-کارلسون و اف‌کاتی و همچنین نتایج حاصل از کاوش بافت سرطانی معده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، منیپولیشن دوبعدی بافت معده، شبیه سازی شده است. نیرو و زمان بحرانی محاسبه شده و مطلوب‌ترین مقدار درنظر گرفته شده است. همچنین نتایج با سایر نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین مقایسه شده است.

مدل‌سازی

در این بخش به تشریح معادلات حاکم در مدل‌سازی با استفاده

از مدل‌های اصطکاکی مختلف پرداخته شده است. مشخصات هندسی میکروسکوپ نیروی اتمی نیز در جدول (۱) ذکر گردیده است.

جدول ۱ مشخصات هندسی میکروسکوپ نیروی اتمی

نوع تیرک	مستطیلی
طول تیرک	۲۲۵ میکرومتر
عرض تیرک	۱ میکرومتر
ضخامت تیرک	۴۸ میکرومتر
ارتفاع سوزن	۱۲ میکرومتر
شعاع سوزن	۲۰ نانومتر

مدل‌سازی با استفاده از مدل‌های اصطکاکی مختلف

مدل کارلسون و باتیستا

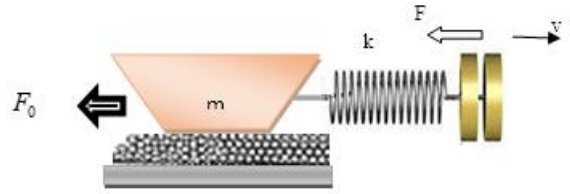
مدل کارلسون و باتیستا مدل کشسی/ فشاری اصطکاک نانو می‌باشد، که پارامترهای آن به صورت معادلات (۱) تا (۳) تعریف شده‌اند.

$$\ddot{x} + x = V t - f_1 \qquad (۱)$$

$$f_1 = \begin{cases} (-\infty, \theta) & \text{for } \dot{x} = 0 \\ \theta + \beta\dot{x} & \text{for } \dot{x} > 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\theta\,(1-\theta)}{\tau} - \alpha\,\theta\,\dot{x} \qquad (۳)$$

در شکل (۱)، شبیه سازی مکانیکی تجهیزات آزمایشگاهی SFA با بلوک جرم m که با یک فنر الاستیک با ثابت k که از یک طرف با سرعت v کشیده می‌شود، نشان داده شده است.



شکل ۱ شبیه‌سازی مکانیکی تجهیزات آزمایشگاهی SFA با بلوک جرم m که با یک فنر الاستیک با ثابت k که از یک طرف با سرعت v کشیده می‌شود. بلوک با یک سطح روغن‌کاری شده در تماس است

در معادله‌ی (۱) پارامترهای موقعیت و شتاب شیء تحت فشار/کشش، به ترتیب با x و $\ddot{x}$ ، سرعت مطلوب فشاری/کششی با V و زمان با t، مشخص شده‌اند. تابع f_1 نیز به صورت معادله‌ی (۲) تعریف شده است. α، β و τ پارامترهای ثابت و متغیر حالت، θ نیز در این مدل حالت روغن‌کاری در سطح تداخلی تماس می‌باشد. زمانی که $\theta = 1$ است، روغن‌کاری در حالت کاملاً جامد یا همان فاز غلتش و هنگامی که $\theta = 0$ است، روغن‌کاری در حالت کاملاً سیال یا همان فاز لغزش قرار دارد. این مدل تغییرات تابع تعریف شده‌ی f_1 را به کار می‌برد، تا به عاملیت لغزش- غلطش برسد. در این مدل عامل اتلافی اصطکاک، به روش مشابهی با مدل اصطکاکی کولمب، با افزودن متغیر حالت θ به دست آمده است [1].

مدل لمایتره و کارلسون

این مدل نیز همانند مدل کارلسون و باتیستا یک مدل کشسی/ فشاری اصطکاک نانو می‌باشد، که در آن داریم [2]:

$$\ddot{x} = -E_1 e^{-k/\dot{x}} + \alpha\,\sigma\,\dot{\gamma} \qquad (۴)$$

$$\dot{\sigma} = \mu\,(\dot{\epsilon} - \dot{\gamma}) \qquad (۵)$$

$$\dot{\epsilon} = V/2\,h \qquad (۶)$$

$$\dot{\gamma} = E_0 e^{-1/\dot{x}} \sinh\left(\frac{\sigma}{\mu}\right) \qquad (۷)$$

که $\dot{\sigma}$ نرخ تنش، $\dot{\gamma}$ نرخ چرخش، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش می‌باشند [2,3].

مدل اف‌کاتی

از اولین مدل‌های اصطکاکی به کار رفته در سطح اتمی می‌باشد. در مدل اصطکاکی پرانتل- تاملینسون بیان می‌شود، که انرژی به دلیل آزاد شدن بازگشت‌ناپذیر و ناگهانی انرژی الاستیک تلف شده، که موقتاً در تغییر شکل، کشش و یا تراکم پیوندهای اتمی ذخیره شده است.

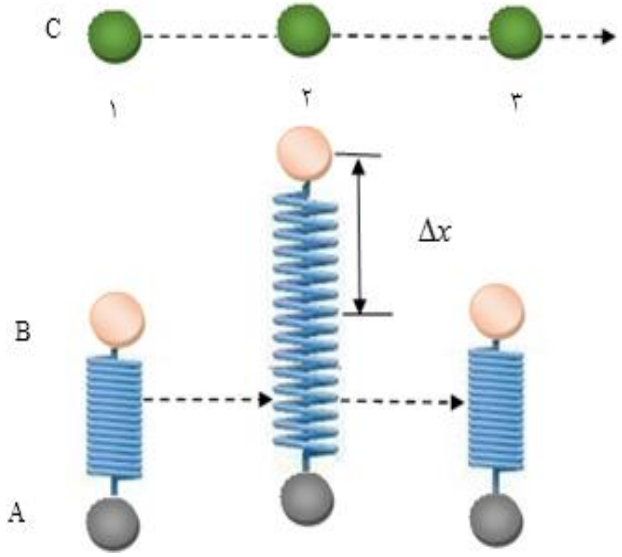
به بیان دیگر، زمانی که دو جسم نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند، سبب ایجاد یک تغییر پیوسته در جفت مولکول‌هایی که نیرو را تحمل می‌کنند، شده است. همچنین بیان می‌کند، که با تماس دو مولکول با هم، شاخه‌های دافعه سمت یکدیگر آمده و سپس جدا می‌شوند، در این صورت، یک اتلاف انرژی رخ می‌دهد که با عنوان اصطکاک شناخته می‌شود. با گسترش مدل پرانتل- تاملینسون، مدل FKT ارائه شده است [3].

اتم‌های A و B در موقعیت تعادلی در شکل (۱-۲) نمایش داده شده‌اند. در این حالت اتم C به اندازه‌ی کافی دور بوده و تأثیر آن بر اتم B قابل چشم‌پوشی است. زمانی که B در حالت

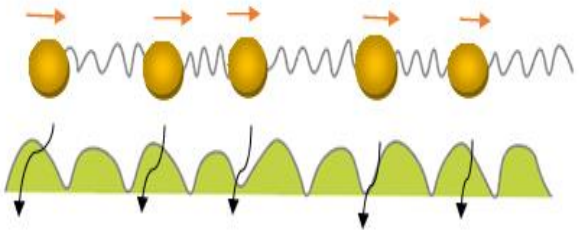
جاذبه با C اســـت و B پیوند خود را با A می‌کشـــد، اتم‌ها در وضعیت شکل (۲-۲) قرار دارند.

در انتها و در شـــکل (۲-۳ C) به اندازه‌ی کافی دور شـــده اســـت و B به حالت آرام برمی‌گردد. انرژی تلف شـــده در این شکل به آ سانی با رابطه‌ی $\frac{1}{2}k(\Delta x)^2$ به د ست می‌آید که همان انرژی الاستیک ذخیره شده است، هنگامی که پیوند شیمیایی بین A و B کشیده می‌شود.

با ترکیب مدل تاملینســـون و مدل هارمونیک زنجیره‌ی اتمی تو سط ویس و المر، مدل ا صطکاک اتمی اف‌کاتی تعریف شده ا ست. در مدل اف‌کاتی فرض می شود، که هیچ پیوند شیمیایی بین برجستگی‌ها و اتم‌های سطح وجود ندارد (شکل ۳).



شکل ۲ نظریه‌ی تاملینسون درباره‌ی اتلاف انرژی



شکل ۳ مدل اف‌کاتی

زنجیره با یک نیروی ثابت کشـــیده می‌شـــود، و حرکت‌ها با سرعت متناسب با میرایی، میرا می‌گردد. در این مدل:

$$m\ddot{x}_i + \gamma'\dot{x}_i = -\frac{\partial U(x_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial W(x_i - x_j)}{\partial x_i} + f' + \eta(t), \quad i = 1,2,\dots,N \qquad (۸)$$

که x_i جابه‌جایی ذره‌ی i ام، m جرم هر ذره، γ' ضـــریب ا صطکاک ا ست، که انرژی تغییر کرده بین یک ذره و صفحه‌ی مبنا را مشـخص می‌سـازد، f' نیروی خارجی به کار رفته، $\eta(t)$ نویز اجباری حرارتی، $U(x_i)$ پتانسیل به کار رفته برای صفحه‌ی مبنا، و $W(x_i - x_j)$ پتانســـیل برهم‌کنش ذرات اســـت. این پتانسیل‌ها از اصول مختلف فیزیکی از قبیل پتانسیل وان‌دروالس ناشی می‌شوند. فرض می‌گردد که پتانسیل صفحه‌ی مبنا متناوب فاصله‌ای بوده و به شکل معادله‌ی (۹) است:

$$U(x_i) = \frac{1}{2}\emptyset \sum_{i=1}^{N}\left(1 - \cos\frac{2\pi x_i}{a}\right) \qquad (۹)$$

که $\emptyset > 0$ ثابت انرژی و $a > 0$ دوره‌ی تناوب اســـت. پتانســـیل برهم‌کنش ذرات نیز به شـــکل معادله‌ی(۱۰) فرض می‌شود.

$$W(x_i - x_j) = \frac{1}{2}K \sum_{i=1}^{N-1}(x_{i+1} - x_i - b)^2 \qquad (۱۰)$$

که در آن $K > 0$ یک ثابت و b نشـــان‌دهنده‌ی فاصـــله‌ی تعادلی بین اتمی است.

مراحل آماده‌سازی بافت

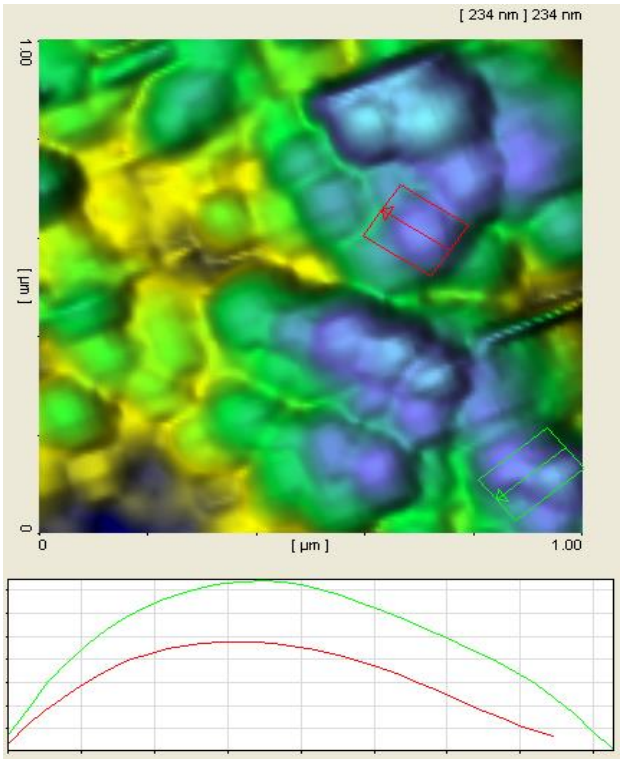
بافت مورد بررســـی در این پژوهش، بافت ســـرطانی معده با اندازه‌ی (T3) در نظر گرفته شـــده اســـت. پس از تهیه‌ی بافت مورد نظر، تعیین نوع و عامل سرطانی درکشت انجام‌شده و پس از تعیین نوع ســـرطان، قســـمتی از بافت جداشـــده و بر روی لام قرارگرفته ا ست. برای شروع آزمایش ابتدا ظرف حاوی بافت را بر روی صفحه‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی قرار داده و سپس با استفاده از صفحه‌ی نمایش آن، بررسی دقیق صورت گرفته است تا بافت‌های منا سب آزمایش انتخاب شود و معیار گزینش آن‌ها شکل ظاهری‌شان بوده است.

بحث و نتایج

در این بخش، به تشـــریح کامل نتایج حاصـــل از مدل‌ســـازی و کارهای تجربی انجام شده، پرداخته شده است.

نتایج حاصل از تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی

بافت سرطانی معده پس از آماده سازی‌های لازم در آزمایشگاه، بر روی لام قرار گرفته و سپس مورد کاوش توسط میکروسکوپ نیروی اتمی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (۴)، مشاهده می‌شود، تصویر توپوگرافی حاصل با رنگ‌های متفاوت ترسیم شده است، که نمایانگر ارتفاع‌های مختلف در هنگام کاوش توسط سوزن تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد.



شکل ۴ تصاویر بافت سرطانی روده

مکان بافت سرطانی با رنگ آبی مشخص شده است. لذا به‌منظور تعیین هندسه‌ی بافت سرطانی معده، خطوطی بر روی این بافت‌ها و در جهت‌های مختلف ترسیم شده است. تغییرات ارتفاع در طول این خطوط به صورت نمودارهای سبز و قرمز ترسیم شده و با دوران این نمودارها، هندسه‌ی بافت سرطانی به صورت تقریبی به شکل هندسی کره درنظر گرفته شده است.

نتایج فاز اول نانومنیپولیشن

در فاز نخست نانومنیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، محاسبه‌ی نیرو و زمان بحرانی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. لذا در این فاز به بافت سرطانی مورد نظر تا جایی نیرو وارد می‌شود که بر نیروهای مقاومی همچون اصطکاک و چسبندگی غلبه پیدا کند.

با غلبه بر این نیروها، نیروی اعمالی در این لحظه، به عنوان نیروی بحرانی و مدت زمان طی شده را به عنوان زمان بحرانی شناخته می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص می‌باشد، نیروهای اعمالی در دو راستای x و z اعمال شده است و به صورت F_x و F_z نمایش داده شده‌اند. به دلیل ثابت بودن نیروی عمودی سطح در راستای z نیرو در این راستا ثابت باقی مانده است.

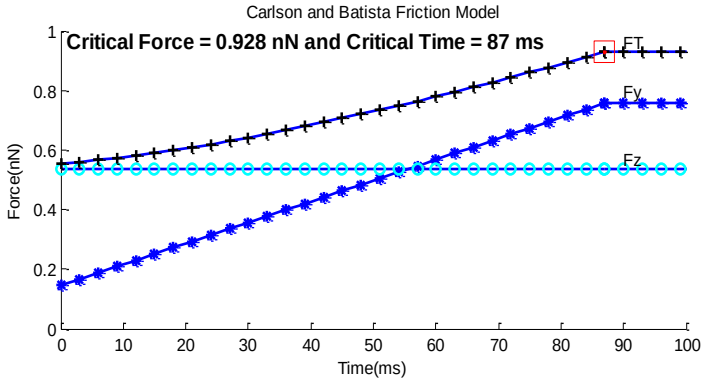
با برآیندگیری از این دو نیرو، نمودار مشکی رنگ یا همان نمودار نیروی برآیند حاصل شده است. با ثابت شدن تمامی نیروها در راستاهای مختلف و همچنین نیروی برآیند، نیرو و زمان بحرانی در نمودارها با درنظر گرفتن مدل‌های اصطکاکی مختلف ثبت شده‌اند.

در شکل (۵-الف)، نیروی بحرانی برابر با ۰,۹۲۸ نانو نیوتن و زمان بحرانی برابر با ۸۷ میلی ثانیه با توجه به مدل اصطکاکی کارلسون و باتیستا محاسبه شده است.

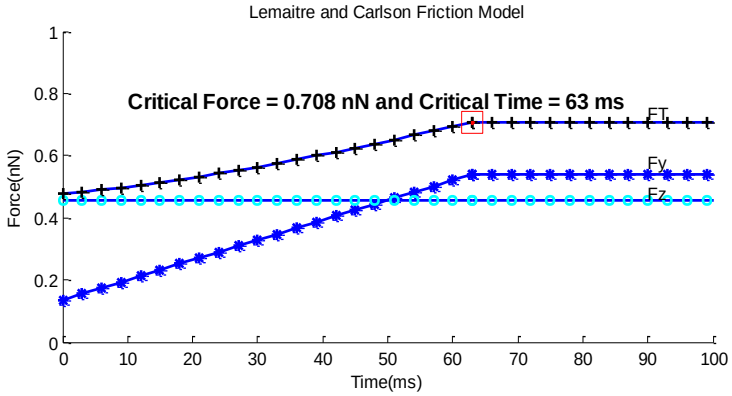
با درنظر گرفتن مدل اصطکاکی لمایتره و کارلسون در شکل (۵-ب)، نیرو به ۰,۷۰۸ نانونیوتن و زمان به ۶۳ میلی ثانیه کاهش یافته است.

در نهایت نیز با در نظر گرفتن مدل اف‌کاتی، کمترین مقدار نیرو با اندازه‌ی ۰,۴۵۳ نانونیوتن و زمان ۴۵ میلی ثانیه در شکل (۵-ج)، مشخص شده است.

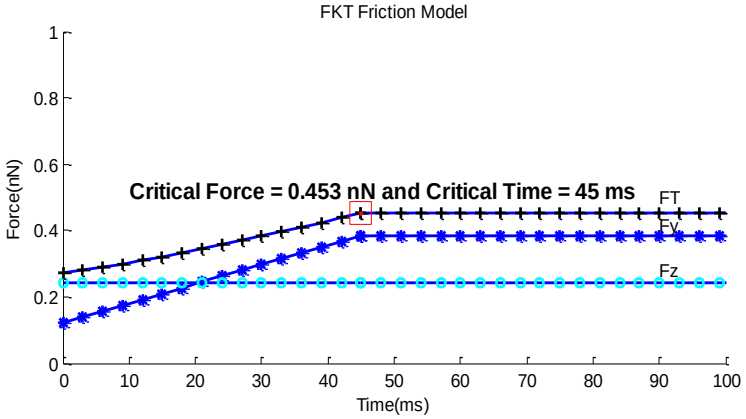
مدل اصطکاکی اف‌کاتی نیز توسعه یافته‌ی مدل‌های دیگر بوده است، لذا مقادیر دقیق‌تری را نمایش داده است. همچنین به علت عدم آسیب رساندن به بافت سرطانی، در نظر گرفتن نیرو و زمان بحرانی با مقادیر کمتر، مطلوب‌تر می‌باشد.



(الف) مدل اصطکاکی کارلسون و باتیستا



(ب) مدل اصطکاکی لمایتره و کارلسون

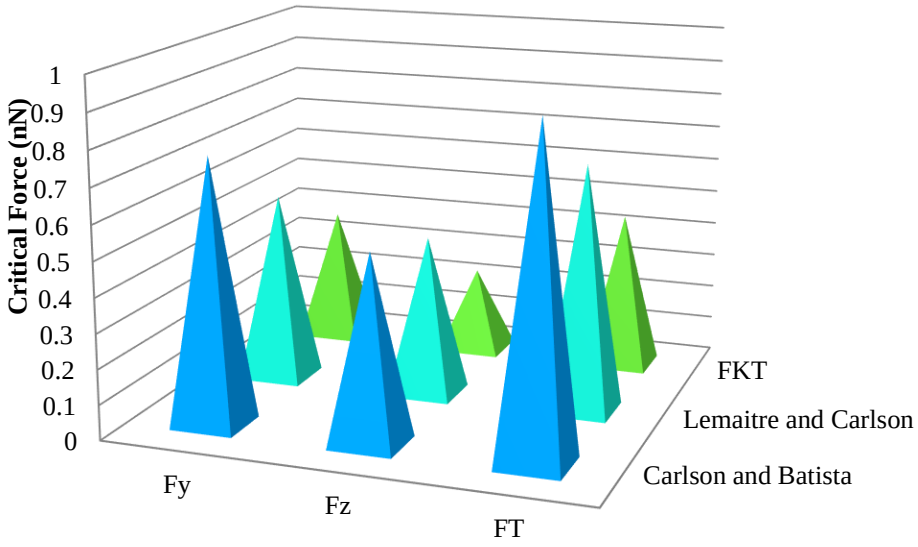


(ج) مدل اصطکاکی FKT

شکل ۵ نتایج فاز اول نانومنیپولیشن با مدل‌های اصطکاکی مختلف

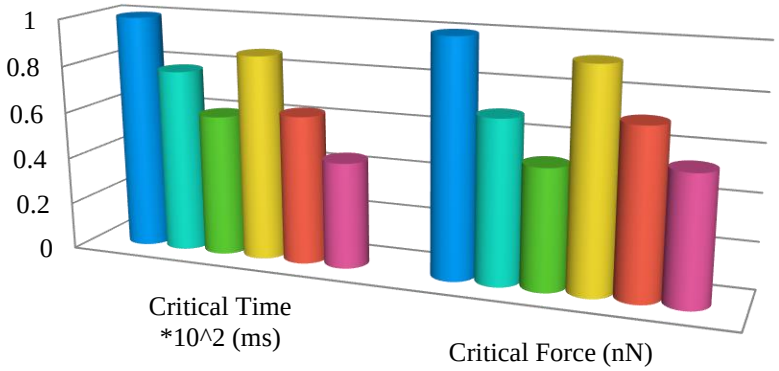
مقایسه‌ی مدل‌های اصطکاکی

در شکل (۶)، مقادیر نیرو در راستاهای x و z و همچنین نیروی برآیند، با درنظر گرفتن مدل‌های اصطکاکی کارلسون و باتیستا، لمایتره و کارلسون و اف‌کاتی، محاسبه و نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نیرو در راستاهای مختلف و همچنین در نیروی برآیند مربوط به مدل اصطکاکی کارلسون و باتیستا می‌باشد. لذا غلبه بر این نیروها، زمان و نیروی بیشتری را نیازمند است و نیرو و زمان بحرانی در طی فرآیند منیپولیشن بافت سرطانی معده برای این مدل اصطکاکی بیشتر خواهد بود.



	Fy	Fz	FT
Carlson and Batista	0.758	0.534	0.928
Lemaitre and Carlson	0.541	0.458	0.708
FKT	0.383	0.243	0.453

شکل ۶ مقایسه‌ی نیروی بحرانی در مدل‌های مختلف



	Critical Time *10^2 (ms)	Critical Force (nN)
Coulomb [4]	1.02	1.16
HK [4]	0.78	0.69
LuGre [4]	0.6	0.51
Carlson and Batista	0.87	0.928
Lemaitre and Carlson	0.63	0.708
FKT	0.45	0.543

شکل ۷ صحت‌سنجی مقادیر نیرو و زمان بحرانی حاصل با سایر منابع

صحت‌سنجی

در مرجع [4] بافت سرطانی معده با درنظر گرفتن سه مدل اصطکاکی کولمب، اچ‌کا و لاگره مورد بررسی قرار گرفته و نیرو و زمان بحرانی برای بافت سرطانی محاسبه شده است. لذا به‌منظور صحت سنجی نتایج حا صل در این مقاله، از مقایسه‌ی نتایج با این مرجع استفاده شده است.

در مرجع [4] مدل اصطکاکی کولمب بیشترین مقدار نیرو و زمان را به علت ساده بودن مدل‌سازی دارا می‌باشد. همچنین کمترین مقدار متعلق به مدل اصطکاکی لاگره به علت درنظر گرفتن سطح واقعی تماس می‌باشد.

در این مقاله مدل تماسی اف‌کاتی، به علت توسعه‌ی سایر مدل‌ها و دقیق‌تر بودن در مدل‌سازی و همچنین ارائه‌ی کمترین مقدار نیرو و زمان بحرانی برای جلوگیری از آسیب به بافت سرطانی به‌عنوان مطلوب‌ترین مدل اصطکاکی شناخته شده است.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می شود، مقدار نیرو در مدل اف‌کاتی برابر با ۰,۵۴۳ نانونیوتن می‌باشد، که بسیار به مقدار نیرو در مدل اصطکاکی لاگره با مقدار ۰,۵۱ نانونیوتن نزدیک است. همچنین میزان زمان بحرانی نیز از مقدار ۰,۶ میلی ثانیه در مدل لاگره به مقدار ۰,۴۵ میلی ثانیه در مدل اف‌کاتی، کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

کاربردی شدن فناوری نانومنیپولیشن در مطالعه‌ی بافت‌های سرطانی و با هدف شناسایی و درمان این بیماری زمانی امکان‌پذیر خواهد شد، که اطلاعات دقیقی از فازهای اول و دوم منیپولیشن و پارامترهای تأثیرگذار بر آن‌ها ارائه گردد. لذا باید بافت سرطانی موردنظر توسط میکروسکوپ نیروی اتمی کاوش شده و نمودارها و تصاویر مورد نیاز تهیه شوند.

در این مقاله اثر مدل‌های اصطکاکی مختلف بر روی نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن بافت سرطانی معده مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های مورد بررسی شامل مدل کارلسون و باتیستا، لمایتره و کارلسون و اف‌کاتی می‌باشند. در این مسیر هندسه‌ی بافت سرطانی معده توسط تصویر توپوگرافی ارائه شده‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی به صورت کروی فرض شده است. نمودارهای نیرو–زمان با درنظر گرفتن پارامترهای نیروی برآیند و نیرو در راستای x و z ترسیم شده‌اند. نیرو و زمان بحرانی در لحظه‌ای که هر سه این نمودارها ثابت می‌گردند، ثبت شده و برای هریک از مدل‌ها نیرو و زمان بحرانی ثبت شده است. مقادیر ۰,۴۵۳ نانونیوتن و ۴۵ میلی ثانیه به عنوان کمترین مقادیر نیرو و زمان بحرانی با درنظر گرفتن مدل اصطکاکی اف‌کاتی محاسبه شده است، که در مقایسه با مقادیر نیرو و زمان بحرانی ثبت شده در مرجع [4] و با درنظر گرفتن مدل اصطکاکی لاگره نیز کاهش یافته است. لذا به‌منظور یافتن بهینه‌ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی باید تمامی مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته و پس از آن سایر پارامترهای محیطی و هندسی و نیروهای مقاوم بر حرکت بررسی شده و مدلی مطلوب با درنظر گرفتن مقادیری نزدیک به واقعیت ارائه شده و سپس فاز دوم نیز مورد بررسی قرار گرفته و درنهایت مدل جامع در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه نامه

Atomic Force Microscope	میکروسکوپ نیروی اتمی
Carlson and Batista Friction Model	مدل اصطکاکی کارلسون و باتیستا
Critical Force	نیروی بحرانی
Critical Time	زمان بحرانی
FKT Friction model	مدل اصطکاکی اف‌کا تی
Friction Models	مدل‌های اصطکاکی
Gastric Cancer Tissue	بافت سرطانی معده
Lemaitre and Carlson Friction Model	مدل اصطکاکی لمایتره و کارلسون
Manipulation	جابه‌جایی

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] J. Carlson and A. Batista, "Constitutive relation for the friction between lubricated surfaces", *Physical Review E*, vol. 53, no. 4, pp. 4153-4165, (1996).

[2] A. Lemaître, "Rearrangements and dilatancy for sheared dense materials", *Physical Review Letters*, vol. 89, no. 19, pp. 195503:1-4, (2002).

[3] S. Leporatti, D. Vergara, A. Zacheo, V. Vergaro, G. Maruccio, R. Cingolani and R. Rinaldi, "Cytomechanical and topological investigation of MCF-7 cells by scanning force microscopy", *Nanotechnology*, vol. 20, no. 5, pp. 055103: 1-6, (2009).

[4] 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).

[5] M. Taheri, "Investigation of the effect of different friction models on experimental extraction of 3D nanomanipulation force and critical time of colon cancer tissue", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 54, no. 4, pp.4, (2022).

[6] M.H. Korayem, H.B. Hezaveh and M. Taheri, "Experimental Determination of HT29 Cancerous Cell Surface Roughness by Atomic Force Microscopy to be Applied in Nanomanipulation", *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 28, no. 1, pp. 111-122, (2017).

[7] Y. Bu, , L. Li, C. Yang, R. Li, and J. Wang, "Measuring viscoelastic properties of living cells", *Acta Mechanica Solida Sinica*, vol. 32, no. 5, pp. 599-610, (2019).

[8] C. Hou, D. Sun and L. Dong, "Nanomanipulation in Biomedical Applications", *Current Robotics Reports*, vol. 2, no. 2, pp. 133-145, (2021).

[9] Z. Lu, Z. Wang, D. Li, W. Zhu, R. Wang, K. Qu and J. Yan, "Effect of astragalus polysaccharides on cancer cells studied by AFM", *2021 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, (3M-NANO), IEEE*, pp. 51-54, (2021).

[10] M. Taheri and S.H. Bathaee, "Determination of the young modulus of gastric cancer tissue experimentally using atomic force microscopy", *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 12, pp. 2709-2720, (2020).

[11] M. Taheri and M. Mirzaluo, "Experimental Extraction of Young's Modulus of MCF-7 Breast Cancer Cell Using Spherical Contact Models", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no.12, pp. 5769-5784, (2022).

[12] C. Hao, S. Wang, S. Yuan, B. Wu, P. Yu, and J. Shi, "Extraction algorithm for longitudinal and transverse mechanical information of AFM", *Nanotechnology and Precision Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 023004, (2022).

[13] M.H. Korayem, H. Khaksar, and H. Sharahi, , "Modeling and simulation of contact parameters of elliptical and cubic nanoparticles to be used in nanomanipulation based on atomic force microscope', *Ultramicroscopy*, vol. 206, pp. 112808: 1-12, (2019).

[14] A. D'orlando, J.Y. Mevellec, G. Louarn and B. Humbert, "Atomic force microscopy nanomanipulation by confocal Raman multiwavelength spectroscopy: Application at the monitoring of resonance profile excitation changes of manipulated carbon nanotube", *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 124, no. 4, pp. 2705-2711, (2020).

[15] M. Makulavicius, O. Balitskyi, R. Urbonas, A. Dzedzickis, V. Bučinskas, A. Petronis, M. Kovalenko and I. Morkvenaite-Vilkonciene, "Recent Advances in Mechanical Micro-and Nanomanipulation", *Conference on Automation, Springer*, pp. 248-256, (2020).

[16] T. Zhang, H. Yu, P. Li, X. Wang, F. Wang, J. Shi, Z. Liu, P. Yu, W. Yang and Y. Wang, "Microsphere-based super-resolution imaging for visualized Nanomanipulation", *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 42, pp. 48093-48100, (2020).

[17] H. Khaksar, "Finding the optimal contact function and path in nanomanipulation process-based on AFM Nanorobot", *2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), IEEE*, pp. 588-592, (2019).

[18] M. Taheri, "Investigation and sensitivity analysis of dimensional parameters and velocity in the 3D nanomanipulation dynamics of carbon nanotubes using statistical Sobol method", *Modares Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 125-135, (2019).

[19] M. Taheri, P. Karimi, M. Mstali, and M. Nazemizadeh, "Calculating the Young's modulus of head and neck cancer cells during the nanomanipulation process using atomic force microscope", *The Iranian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 22-31, (2022).

[20] M. Khalili, M. Taheri, S.H. Bathaee and F. Shakeri, "Study of DNA nanoparticle manipulation using atomic force microscopy based on finite element method using theories of contact mechanics"; *Mechanic of Advanced and Smart Materials*, vol. 1, no. 2, pp. 155-174, (2022).

[21] F. Fereiduni, M. Taheri and M. Modabberifar, "Investigation of the effect of different parameters on force in the second phase of two-dimensional Nanomanipulation", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 23-31, (2021).

[22] A. Moshirpanahi, Sh. Etemadi Haghighi, and A. Imam, "Dynamic modeling of a cylindrical nanoparticle manipulation by AFM", *Engineering Science and Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 611-619, (2021).

[23] M. Modabberifar, Y. Hojjat, A. Abdullah and M. Dadkhah, "Analysis of the Dynamic Characteristics of a Three Phase Panel Type Electrostatic Actuator Using PEM System Identification", *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 151, no. 2, pp. 173–178, (2009).

[24] M.H. Korayem, H.B. Hezaveh, and M. Taheri, "Dynamic modeling and simulation of rough cylindrical micro/nanoparticle manipulation with atomic force microscopy", *Microscopy and Microanalysis*, vol. 20, no. 6, pp. 1692-1707, (2014).

[25] M.H. Korayem, M. Taheri and A.H. Korayem, "Manipulation with atomic force microscopy: DNA and yeast micro/nanoparticles in biological environments", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, vol. 228, no. 4, pp. 414-425, (2014).

[26] M.H. Korayem, H. Khaksar, R.N. Hefz Abad and M. Taheri, "Simulation of soft bacteria contact to be applied in nanomanipulation", *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 14, pp. 227-234, (2015).

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 2, 2023. (17-36)

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 Flow and Heat Transfer in Cavity Receiver Tube of a Solar Power Tower with Different Inserts under Non-Uniform Heat Flux

Research Article

Siavash Zeynalpour[1], Zahra Mehrdoost[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.76201.1111

1. Introduction

The solar central cavity receiver is widely used in solar thermal tower power plants. However, due to the concentrating sun rays reflected from heliostats mirrors, the solar flux in the central part of receiver tubes surfaces is much higher than the edges that cause the greatly non-uniform temperature distribution. Many researchers have tried to reduce the large heat flux gradient through changing the arrangement of heliostat mirrors, different working fluid, and different insert configurations.

This research studied the impacts of four types of insert configurations on heat transfer performance of solar cavity receiver tube. The HFCAL method was applied to calculate the actual non-uniform heat flux distribution on the receiver tubes. The impacts of insert configurations, pitch and thickness of inserts, and positions of inserts were investigated.

2. Governing equations

The fluid considered in the receiver tubes is molten nitrate salt, which has a high energy storage capacity. According to the previous studies, the standard high-*Rek*-ε model with the standard wall functions can predict the heat transfer and friction of the molten salts in turbulent tube flow suitably. The governing equations can be expressed as follows:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij})\right] \tag{2}$$

$$\rho \frac{\partial (u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[C_p\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right] \tag{3}$$

$$\frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i} + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho\varepsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + \frac{\varepsilon c_1}{k}\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - c_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

The temperature-dependent thermophysical properties of the molten nitrate salt, including viscosity, density, conductivity, and specific heat capacity are defined as piecewise functions:

$$\mu = 0.23816 - 1.2768\text{E}-3T + 2.6275\text{E}-6T^2 - 2.4331\text{E}-9T^3 + 8.507\text{E}-13T^4, \text{Pa s} \tag{6}$$

$$\rho = 2280.22 - 0.733T, \text{kg m}^{-3} \tag{7}$$

$$K = 0.7663 - 6.47\text{E}-4T, \text{W(mK)}^{-1} \tag{8}$$

$$c_p = 1560, \text{J(kgK)}^{-1} \tag{9}$$

3. Model description

Four types of inserts configurations are considered to improve the performance of receiver tubes: 1) twisted tape; 2) wavy tape; 3) helical screw tape; and 4) louvered strip. Figure 1 shows the geometrical dimensions of the inserts.

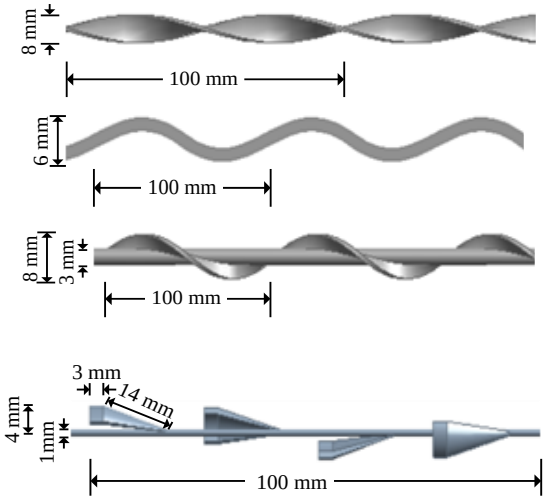


Figure 1. The Geometric dimensions of the inserts

*Manuscript received: April 13, 2022. Revised, September 28, 2022, Accepted, December 18, 2022.

[1] MSc, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Ahvaz, Iran.

[2] Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.Email:z.mehrdoost@iauahvaz.ac.ir

4. Boundary conditions

The constant velocity and temperature are considered at the inlet of the tube and fully developed assumption is applied to the outlet. At the receiver tube outer surface, a non-uniform heat flux boundary condition is employed.Here, the non-uniform actual heat flux distribution is calculated by the HFCAL model of ten heliostats as Equation 10:

$$Flux\,(y,z)=\sum_{i=1}^{10}\frac{P_{h,i}}{2\pi\sigma_{HF,i}^{2}}e^{-\frac{(y^{2}+z^{2})}{2\sigma_{HF,i}^{2}}} \qquad (10)$$

where$y$ and z are the coordinates of heliostat, P_h and σ_{HF} are the total power and effective deviation in HFCAL, respectively.

5. Numerical results

In this section, the impacts of insert configurations, pitch and thickness of insert, position of insert, and the impact of non-uniform heat flux boundary condition were investigated.

The impact of inserts configurations

Figure 2 shows the variations of Nusselt numbers *Nu* with Reynolds numbers *Re* for four types of inserts. It can be observed that the wavy tape has the highest *Nu* and helical screw tape has the lowest *Nu*.

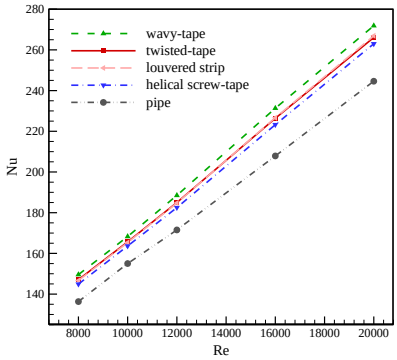


Figure 2. The Nusselt numbers versus Reynolds numbers for different inserts

The impact of insertpitch

In order to analysis the impact of insert pitch on the flow and heat transfer of receiver tubes, the wavy tape pitch is set to 40 mm, 80 mm, 60 mm and 160 mm. Figure 3 shows the Nusselt numbers *Nu* versus Reynolds numbers *Re* for different pitches of wavy tape. It can be seen that *Nu* increases when insert pitch decreases.

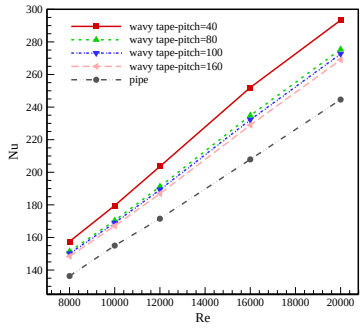


Figure 3. The Nusselt numbers versus Reynolds numbers for four differentpitches of wavy tape

The impact of insert thickness

The pitch of wavy tape is set as 100 mm in this section, and the impact of insert thickness is examined by considering three cross-section areas: 8×1 mm^2, 8×2 mm^2 and 8×3 mm^2. Figure 4 shows the variations of Nusselt numbers *Nu* with *Re* for different thickness of wavy tape. It can be seen that the thickness of wavy tape has almost no impact on *Nu*.

The impact ofposition of insert on receiver tube

To examine the impact of position of wavy tape on receiver tube, three different positions are considered: 1) placed in sunlight concentrated domain; 2) placed in the middle; and 3) placed in back-sunlight domain.

Figure 5 illustrates the variation of Nusselt numbers versus Reynolds numbers for different positions of wavy tape. It is clear that the Nusselt numbers of wavy tape placed in the back-sunlight domain are higher than those of placed in the sunlight concentrated domain because the hot fluid flow and cold fluid flow can be mixed entirely.

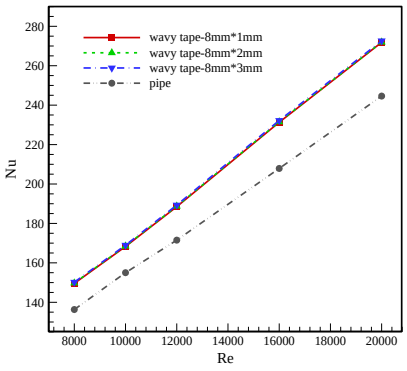


Figure 4. The Nusselt numbers versus Reynolds numbers for different thickness of wavy tape

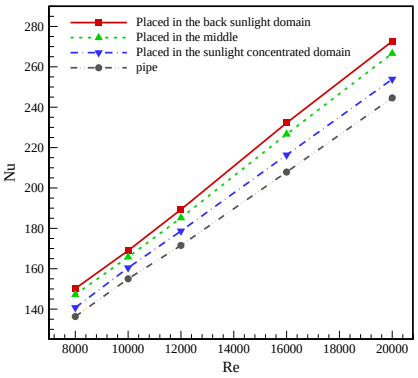


Figure 5. The Nusselt numbers versus Reynolds numbers for different positions of wavy tape

6. Conclusion

This study examined heat transfer capability of the molten nitrate salt in a receiver tube with non-uniform heat flux. Four types of inserts configurations were considered and the impacts of insert configurations, pitch and thickness of inserts and positions of inserts on heat transfer performance of receiver tube wereexamined. The following conclusions were obtained.

The wavy tape has the highest *Nu*,which is 150 when *Re* set as 8000. The Nusselt number increases when insert pitch decreases. Under the non-uniform heat flux, the best position for the insert inside receiver tube is the back-sunlight domain.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ،۳۵، ۱۴۰۲.(۳۶-۱۷)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

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

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای یک برج خورشیدی با آشوبگرهای مختلف تحت شار حرارتی غیریکنواخت *

مقاله پژوهشی

سیاوش زینل پور[۱] زهرا مهردوست[۲]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.76201.1111

چکیدهدر این مقاله، تأثیر استفاده از چهار نوع آشوبگر مختلف درون لوله گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی به منظور بهبود انتقال حرارت و کاهش توزیع دمای غیریکنواخت بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی به صورت سه بعدی انجام شده و تأثیر شکل آشوبگرها، موقعیت قرارگیری درون لوله گیرنده، گام و ضخامت آشوبگر و همچنین تأثیر شار حرارتی غیریکنواخت بر عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و دمای سطح لوله گیرنده بررسی شده است. جریان به صورت تراکم‌ناپذیر، پایا، آشفته و عدد رینولدز در محدوده ۸۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی برای چهار نوع آشوبگر نوار تابیده، نوار موج‌دار، نوار حلزونی و نوار پره‌دار نشان داد که آشوبگر نوار موج‌دار نسبت به سه نوع دیگر، دارای عدد ناسلت بالاتر و دمای متوسط کمتر روی سطح خارجی لوله گیرنده است. افزایش عدد ناسلت نوار موج‌دار نسبت به نوار پره‌دار، تابیده و حلزونی به ترتیب ۱/۸٪، ۲٪ و ۳/۲٪ و نسبت به لوله گیرنده بدون آشوبگر ۱۰٪ است. با افزایش ضخامت آشوبگر و کاهش گام، عدد ناسلت افزایش یافته و دمای متوسط سطح خارجی لوله گیرنده کاهش می‌یابد. بررسی موقعیت قرارگیری آشوبگر در سه حالت نزدیک به دیواره شار حرارتی غیریکنواخت، وسط لوله و نزدیک به دیواره عایق نشان داد که با افزایش فاصله آشوبگر از ناحیه اعمال شار حرارتی غیریکنواخت، اختلاط جریان سیال گرم و سیال سرد بهتر صورت می‌گیرد و توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود. بنابراین بهترین موقعیت برای قرار گرفتن آشوبگر، دورترین فاصله نسبت به دیواره شار حرارتی غیریکنواخت است.

واژه‌های کلیدیبرج خورشیدی، لوله گیرنده حفره‌ای، شار حرارتی غیر یکنواخت، آشوبگر، انتقال حرارت.

Numerical Study of Flow and Heat Transfer in Cavity Receiver Tube of a Solar Power Tower with Different Inserts under Non-uniform Heat Flux

Siavash Zeynalpour Zahra Mehrdoost

Abstract *In this paper, the effect of using four different types of inserts in cavity receiver tube of solar power tower to improve heat transfer and reduce non-uniform temperature distribution is investigated. Numerical simulation is performed in three dimensions and the effect of inserts configurations, position inside receiver tube, pitch and thickness of insert and the effect of non-uniform heat flux on the Nusselt number, friction factor and temperature of outer surface of receiver tube are investigated. The flow is incompressible, steady state, turbulent and the Reynolds number is in the range of 8000 to 20000. Numerical simulation results for four types of inserts: twisted-tape, wavy-tape, helical-tape and louvered-tape show that wavy-tape compared to the other three types, has the higher Nusselt number and the lower average temperature of receiver tube surface. The Nusselt number of the wavy-tape is increased by 1.8%, 2% and 3.2% relative to the louvered-tape, twisted-tape and helical-tape, respectively and 10% relative to the receiver tube without insert. By increasing the insert thickness and decreasing the insert pitch, the Nusselt number increases and average temperature of receiver tube surface decreases. Investigating the insert position in three cases: close to the non-uniform heat flux wall, the middle of the tube and close to the insulation wall show that by increasing the distance of insert from non-uniform heat flux wall, the mixing of hot and cold fluids flow is better and the temperature distribution is more uniform. Therefore, the best position to place insert is the farthest distance from the non-uniform heat flux wall.*

Key Words Solar power tower, Cavity receiver tube, Non-uniform heat flux, Insert, Heat transfer.

*تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱/۲۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۲۷ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. **Email:**z.mehrdoost@iauahvaz.ac.ir

مقدمه

نیروگاه برج خورشیدی، به عنوان یک فناوری انرژی خورشیدی متمرکز، از یک برج مرکزی به عنوان کانون برای دریافت نور خورشید استفاده می‌کند. در این نیروگاه از یک میدان بزرگ از آینه‌های ردیاب خورشید به نام هلیوستات برای منعکس کردن و تمرکز نور خورشید بر روی یک گیرنده که در بالای برج نسبتاً بلندی نصب شده است، استفاده می‌شود. در نتیجه در محل تمرکز پرتوها، انرژی گرمایی زیادی بدست می‌آید که این انرژی به وسیله سیال عامل که داخل گیرنده در حرکت است، جذب شده و برای تولید توان مورد استفاده قرار می‌گیرد. سه گیرنده اصلی برج خورشیدی شامل گیرنده‌های خارجی، گیرنده‌های حفره‌ای و گیرنده‌هایحجمیوجود دارند[1].در میان این سه نوع گیرنده، گیرنده حفره‌ای دارای مزایایی همچون بازدهی تبدیل خورشیدی–حرارتیبالاتر، اتلاف حرارت بازتابی کم‌تر، اتلاف حرارت همرفتیکم‌تر، مساحت سطح انتقال حرارت بالاتر و توانایی تحمل شار بالاتر در حفره است[2]. بنابراین، گیرنده حفره‌ای مرکزی خورشیدی به طور گسترده در نیروگاه‌های برج حرارتی خورشیدی استفاده می‌شود[3,4].با این حال، به دلیل تمرکز پرتوهای منعکس شده از آینه‌های هلیوستات بر روی گیرنده، شار خورشید در بخش مرکزی سطوح جاذب حرارت دریافت‌کننده حفره‌ای بسیار بیشتر و در نتیجه توزیع دماغیر یکنواخت خواهد بود [5,6]. بنابراین لوله‌های دریافت‌کننده حرارت که درون حفره قرار می‌گیرند، تحت تأثیر تنش حرارتی غیریکنواخت و نقاط داغ محلی قرار می‌گیرند که منجر به خمیدگی و آسیب لوله‌ها می‌شود و در نتیجه قابلیت اطمینان گیرنده کاهش می‌یابد.

یو و همکاران [7]، تو و همکاران [8]، شار حرارتی و توزیع دمای گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی را مطالعه کرده و دریافتند که شار حرارتی و توزیع دما بسیار ناهمگن هستند. بنابراین، بسیاری از محققین سعی در کاهش گرادیان شار حرارتی و اختلاف دمای محیطی لوله‌های گیرنده برای افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان گیرنده داشته‌اند، از جمله تغییر چیدمان آینه‌های هلیوستات، انتخاب انواع مختلف سیال عامل در لوله گیرنده و به‌کارگیری پیکربندی‌های مختلف برای لوله‌های گیرنده. به عنوان مثال، در مراجع [9-11]استراتژی نقطه هدف بهینه برای تغییر آرایش آینه‌های هلیوستات پیشنهاد شده است، که می‌تواند بهترین نقطه هدف را برای هر یک از آینه‌های هلیوستات به دست آورده و توزیع شار حرارتی لوله گیرنده را همگن نموده و در نهایت تنش حرارتی لوله گیرنده را کاهش دهد. وانگ و همکاران [12] یک روش جدید از ترکیب روش ردیابی اشعه مونت‌کارلو و روش گبهارت جهت شبیه‌سازی تابش خورشیدی برای یک گیرنده حفره‌ای ارائه کرده‌اند. نتایج نشان داد که تأثیر حفره در همگن کردن توزیع شار خورشیدی در جذب سطحی پایین‌تر بیشتر است. پاسیو و همکاران [13] مزایا و معایب استفاده از سه نمونه فلز مایع را در سیستم‌های دریافت کننده مرکزی بررسی کردند و نتیجه گرفتند استفاده از فلزات مایع منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت و بهبود عملکرد سیستم می‌شود. موراکو و همکاران [14] فلز مایع را به عنوان سیالانتقال حرارت به‌کار گرفتند و نتیجه گرفتند که فلز مایع مزایای قابل‌توجهی در گیرنده برج مرکزی دارد که برای توزیع یکنواخت شار حرارتی موثر است.از طرف دیگر، محققین سعی در بهبود عملکرد گیرنده از طریق تغییر ساختار گیرنده داشته‌اند. زو و همکاران [15] یک گیرنده حفره‌ای استوانه‌ای جدید با عایق‌بندی متشکل از یک کف محصور شده در قسمت عقب، یک دریچه در قسمت جلو و یک لوله مارپیچی در داخل را توسعه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ساختار پیشنهادی قابلیت رسیدن به دماهای عملیاتی و بازده حرارتیبالا دارد. یانگو همکاران[16] یک گیرنده لوله حرارتی تخت دو فازی با دمای بالا را پیشنهاد کردند که می‌تواند توزیع شار حرارتی را همگن و نقاط حرارتی بر روی گیرنده را حذف کند. کاناتانی و همکاران [17] گیرنده حفره‌ای خورشیدی جدیدی را معرفی کردند که از لوله‌های حلقوی مارپیچی به عنوان جاذب حرارت استفاده می‌کرد.

یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش گرادیان شارحرارتی و توزیع دمای غیریکنواخت، استفاده از المان‌هایی از قبیل بافل‌ها، کویل‌ها و نوارهای پیچ خورده درون لوله‌های گیرنده برای تغییر میدان جریان است. این المان‌ها باعث اختلاط بهتر جریان،کاهش ضخامت لایه مرزی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شوند [18-21]. با توجه به تحقیقات بررسی شده، مشاهده می‌شود که بیشتر مطالعات انجام شده برای بهینه‌سازی گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی، بر تغییر چیدمان آینه‌های هلیوستات، انتخاب انواع مختلف سیال عامل و تغییر ساختار گیرنده متمرکز بوده و در زمینه تغییر میدان جریان در لوله‌های گیرنده، تحقیقات محدودی صورت گرفته است. بنابراین، برای گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی، انجام تحقیقات بیشتر برای یافتن الگوهای مناسب جریان با استفاده از آشوبگرها تحت شرط مرزی شار حرارتی

غیریکنواخت ضروری است.

در این پژوهش، تأثیر استفاده از چهار نوع آشوبگر مختلف بر جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی تحت شار حرارتی غیر یکنواخت مطالعه شده است. به منظور شبیه‌سازی شار خورشیدی غیریکنواخت واقعی بر لوله‌های گیرنده، از روش HFLCAL (Heliostats Field Layout Calculations) استفاده شده است. تأثیر شکل آشوبگرها، موقعیت قرارگیری درون لوله گیرنده و همچنین تأثیر گام و ضخامت این نوع آشوبگرها با سیال عامل نمک مذاب به منظور بهبود عملکرد حرارتی گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی برای اولین بار در این پژوهش بررسی شده است.

معادلات حاکم

جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۹/۲ شبیه سازی شده است. سیال درنظر گرفته شده در لوله‌های گیرنده نمک نیترات مذاب (هایتک) است که قدرت ذخیره انرژی بالایی دارد [22]. بر اساس مطالعات گذشته، مدل آشفتگی k-ε با تابع دیواره استاندارد برای پیش‌بینی انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نمک‌های مذاب در جریان آشفته درون لوله‌ها مناسب است. معادلات حاکم بر جریان سیال درون لوله گیرنده شامل معادله بقای جرم، مومنتم، انرژی و همچنین مدل استاندارد k-ε به صورت زیر بیان می‌شوند [23]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

$$\rho\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_i}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}\right)\right] \qquad (۲)$$

$$\rho\frac{\partial(u_i h)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[C_p\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right] \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}+\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\rho\varepsilon \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}+\frac{\varepsilon c_1}{k}\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-c_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۵)$$

که μ_t ویسکوزیته آشفتگی است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_t=\frac{C_\mu\rho k^2}{\varepsilon} \qquad (۶)$$

در معادلات (۱) تا (۶)، ρ، u، T، P، c_p، μ، h، k، ε، به ترتیب چگالی، سرعت، دما، فشار، ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته سیال،آنتالپی، اتلاف آشفتگی و انرژی جنبشی آشفتگی هستند. در مدل آشفتگی، c_1،c_2،σ_k،σ_ε و c_μ مقادیر ثابت هستند، $c_1=1/44$، $c_2=1/92$، $\sigma_k=1/0$، $\sigma_\varepsilon=1/3$ و $c_\mu=0/09$.

خواص ترموفیزیکی نمک نیترات مذاب شامل لزجت، چگالی، ضریب هدایت و ظرفیت گرمایی ویژه، تابعی از دما و بر اساس معادلات (۷) تا (۱۰) و به صورت توابع چند جمله‌ای در نرم افزار تعرف شده‌اند [22].

$$\mu=0.23816-1.2768\mathrm{E}-3T+2.6275\mathrm{E}-6T^2-2.4331\mathrm{E}-9T^3+8.507\mathrm{E}-13T^4,\ \mathrm{Pa\,s} \qquad (۷)$$

$$\rho=2280.22-0.733T,\ \mathrm{kg\,m^{-3}} \qquad (۸)$$

$$K=0.7663-6.47\mathrm{E}-4T,\ \mathrm{W(mK)^{-1}} \qquad (۹)$$

$$c_p=1560,\ \mathrm{J(kgK)^{-1}} \qquad (۱۰)$$

به منظور بررسی جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای در حضور آشوبگرهای مختلف،پارامترهای عدد رینولدز، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با استفاده از معادلات (۱۱) تا (۱۳) تعریف شده‌اند.

$$Re=\frac{\rho U D_h}{\mu} \qquad (۱۱)$$

$$Nu=\frac{hD_h}{K} \qquad (۱۲)$$

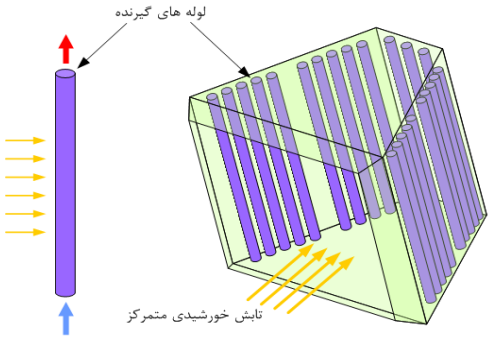
$$f=\frac{\Delta P D_h}{\frac{1}{2}\rho U^2 L} \qquad (۱۳)$$

در معادلات فوق،R_e عدد رینولدر،D_h قطر هیدرولیکی لوله گیرنده (D_h=۴۰mm)، Nu عدد ناسلت،h ضریب انتقال حرارت،f ضریب اصطکاک، ΔP افت فشار در طول لوله و L طول لوله

گیرنده (۸۰۰mm) است.

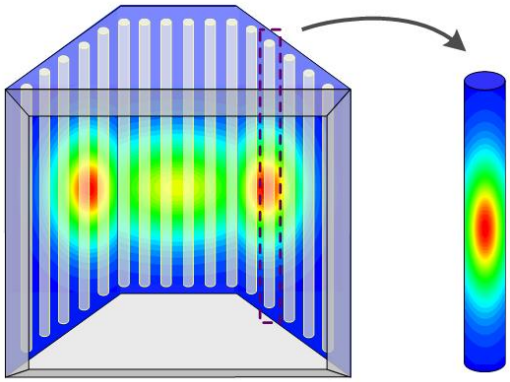
هندسه مسئله

در نیروگاه برج خورشیدی، آینه‌های هلیوستات تابش اشعه خورشیدی کم‌چگال را به سمت گیرنده حفره‌ای مستقر در بالای برج مرکزی منعکس می‌کنند. شکل(۱) شماتیک گیرنده حفره‌ای چندضلعی را نشان می‌دهد. آینه‌های هلیوستات از طریق دریچه شیشه‌ای کوارتز، تابش مستقیم نور خورشید را به سمت لوله‌های گیرنده منعکس کرده و بر روی آن‌ها متمرکز می‌کنند. لوله‌های گیرنده فولادی به دیوارهای داخلی جوش‌شده‌اند.

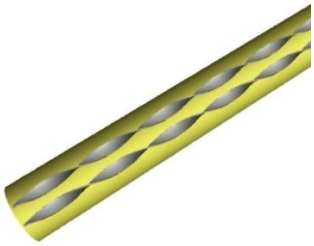


شکل ۱نمودار شماتیک گیرنده حفره‌ای

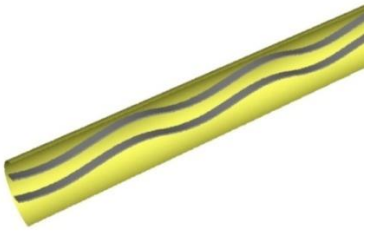
به دلیل خصوصیت متمرکزکننده آینه‌های هلیوستات، شار حرارتی دربخش مرکزی سطوح لوله‌های گیرنده حفره‌ای بسیار بیشتر و در نتیجه توزیع دما غیریکنواخت خواهد بود. شکل (۲) توزیع شار تشعشعی خورشیدی غیریکنواخت را در یک گیرنده حفره‌ای نشان می‌دهد. به منظور بهبود انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌های گیرنده و کاهش توزیع دمای غیر یکنواخت در سطح لوله‌ها، از آشوبگرها استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، تأثیر استفاده از چهار نوع آشوبگر مختلف در لوله گیرنده برای بهبود انتقال حرارت بررسی شده است: (۱) نوار تابیده، (۲) نوار موج‌دار، (۳) نوار حلزونی و (۴) نوار پره‌دار. هندسه مسئله در نرم‌افزار انسیس فلوئنت تولید و شبکه‌بندی شده است. انواع آشوبگر به کار برده شده در شکل (۳) و ابعاد هندسی آشوبگرها در شکل (۴) نمایش داده شده است.



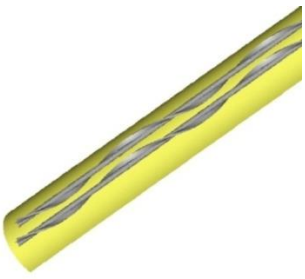
شکل۲ توزیع شار حرارتی غیریکنواخت در گیرنده حفره‌ای



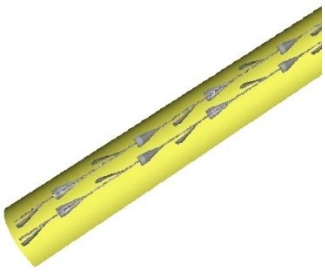
(۱) نوار تابیده



(۲) نوار موج‌دار

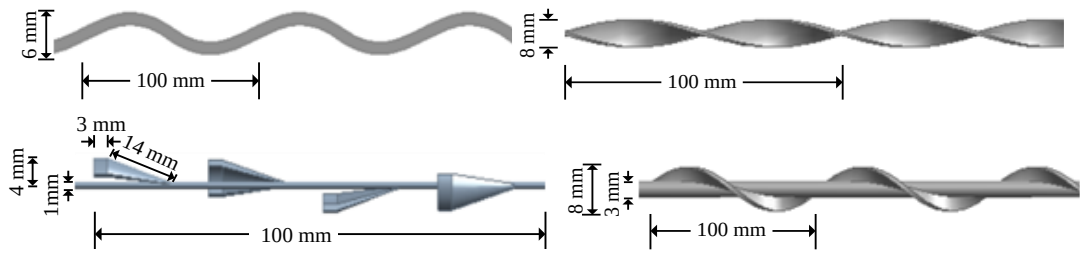


(۳) نوار حلزونی



(۴) نوار پره‌دار

شکل۳ انواع آشوبگرهای مورد بررسی در این پژوهش



شکل۴ ابعاد هندسی آشوبگرها

شرایط مرزی

در ورودی لوله سرعت و دما ثابت در نظر گرفته می‌شوند. دمای ورودی ۵۵۰ درجه کلوین و عدد رینولدز از ۸۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ تغییر می‌کند. شرایط مرزی ورودی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$u = v = 0,\ w = constant,\ T = T_{inlet} \qquad (۱۴)$$

فرض کاملاً توسعه‌یافته در خروجی لوله اعمال شده است:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial z} = 0,\ \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \qquad (۱۵)$$

در دیواره لوله از شرط عدم لغزش و شرط شار حرارتی غیریکنواخت استفاده شده است. بخشی از سطح لوله گیرنده حفره‌ای که در مقابل میدان هلیوستات قرار می‌گیرد نسبت به سطحی که پشت به میدان قرار می‌گیرد، شار حرارتی بیشتری دریافت می‌کند. بنابراین، به منظور شبیه‌سازی و بررسی دقیق‌تر انتقال حرارت در لوله گیرنده، شرط مرزی شار حرارتی غیر یکنواخت واقعی بر دیواره لوله اعمال می‌شود. در این پژوهش برای محاسبه شار حرارتی غیر یکنواخت واقعی از مدل HFLCAL برای تعداد ده هلیوستات استفاده شده است. توزیع شار حرارتی توسط معادله (۱۶) محاسبه می‌شود [24].

$$Flux(y,z) = \sum_{i=1}^{10} \frac{P_{h,i}}{2\pi\sigma_{HF,i}^2} e^{-\frac{(y^2+z^2)}{2\sigma_{HF,i}^2}} \qquad (۱۶)$$

که در آن y و z مختصات هلیوستات، P_h و σ_{HF} به ترتیب توان کلی و انحراف موثر در HFLCAL می‌باشند که با استفاده از معادلات زیر توصیف می‌شوند[24]:

$$P_h = I_D . A_m . \cos w . f_{at} . \tau \qquad (۱۷)$$

$$\sigma_{HF} = \sqrt{D^2(\sigma_{sun}^2 + \sigma_{bq}^2 + \sigma_{ast}^2 + \sigma_t^2)} / \sqrt{\cos rec} \qquad (۱۸)$$

که A_m در آن، I_D، $\cos w$، f_{at}، τ و D، به ترتیب دامنه کلی آینه‌های هلیوستات (۳۹/۹۱۲۶ مترمربع)، تابش مستقیم خورشیدی ($۱۰۰۰ Wm^{-2}$)، کسینوس زاویه تابش نور خورشید در زمان آزمایش، ضریب میرایی در نتیجه کدری اتمسفر، بازتاب‌پذیری موثر هلیوستات‌ها و فاصله تا نقطه هدف هستند.

در معادله (۱۸)، σ_t و به σ_{sun} ترتیب خطای sunshape با انحراف معیار (۰/۰۰۲۵۱ راد) و خطای رد یابی (۰ راد) است. σ_{bq} کیفیت پرتوی مربوط به σ_{ast} خطای شیب آینه است که توسط معادله (۱۹) و (۲۰) محاسبه می‌شوند [24].

$$\sigma_{bq}^2 = (2\sigma_{s-HF})^2 \qquad (۱۹)$$

$$\sigma_{ast} = \frac{\sqrt{0.5(H_t^2 + W_S^2)}}{4D} \qquad (۲۰)$$

که σ_{s-HF}، انحراف خطای شیب آینه است که در جدول (۱) آورده شده است. همچنین، H_t و W_s به ترتیب ابعاد تصویر در صفحات مماسی و طولی در فاصله D از آینه هستند که با استفاده از معادله (۲۱) محاسبه می‌شوند [24].

$$H_t = d\left|\frac{D}{f} - \cos w\right|,\quad w_s = d\left|\frac{D}{f}\cos w - 1\right| \qquad (۲۱)$$

در معادله فوق f فاصله کانونی و d ابعاد کلی آینه‌ها است، که برابر با جذر کل مساحت هلیوستات در نظر گرفته شده است. در معادله (۱۸)، $\cos rec$ کسینوس پرتوی مرکزی بازتاب‌شده از هلیوستات بر روی سطح گیرنده است که توسط معادله (۲۲) محاسبه می‌شود[24].

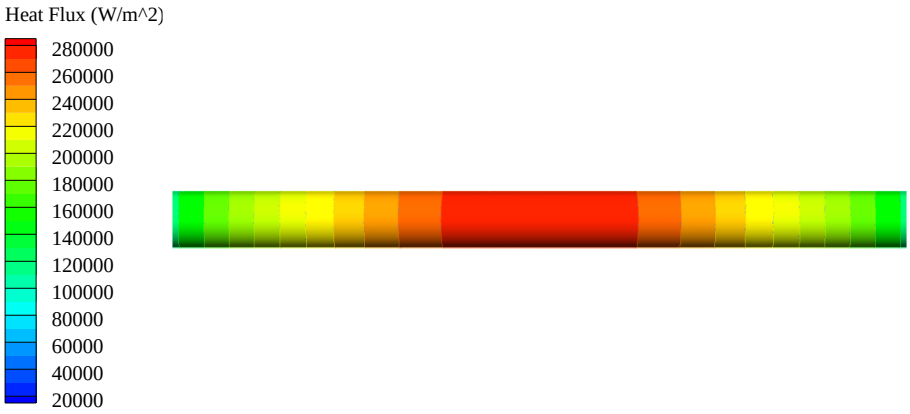
$$\cos rec = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D} \qquad (۲۲)$$

مختصات x،y و z هلیوستات، فاصله تا نقطه هدفِ D، فاصله کانونی f، زاویه تابش اشعه‌های خورشید بر روی هلیوستات، $\cos w$، و عملکرد نوری در جدول (۱) آورده شده است.

شار حرارتی غیر یکنواخت در مطالعه حاضر با نوشتن کد مخصوص به زبان سی پلاس پلاس به نرم‌افزار اضافه شده است. توزیع شار حرارتی غیر یکنواخت بر روی سطح لوله گیرنده در شکل (۵) نمایش داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای میدان هلیوستات [25]

ردیف	x/m	y/m	z/m	D/m	f/m	Time (UT)	cosw	UNIZARσ_{slope}/mrad	HFCALσ_{slope}/mrad
۱	-۵۰/۶۰	۱۵۵/۴۴	۶/۲۳	۱۶۵/۳۲	۱۶۶/۷	۱۲:۵۳:۳۵	۰/۸۱۸۸	۰/۸	۱/۰
۲	-۶۴/۰۲	۱۵۰/۲۶	۶/۰۶	۱۶۵/۲۳	۱۶۶/۶	۱۱:۴۳:۲۱	۰/۸۴۷۷	۱/۱۹	۱/۲۲
۳	-۴۸/۱۶	۱۲۸/۶۳	۵/۷۲	۱۳۹/۷۹	۱۴۱/۵	۱۲:۵۴:۰۰	۰/۸۲۵۳	۰/۶	۱/۰
۴	۰/۰۱	۱۳۷/۳۶	۶/۱۵	۱۳۹/۶۷	۱۴۱/۳	۱۱:۵۶:۰۶	۰/۸۵۱۰	۱/۱۴	۱/۲۴
۵	-۳۳/۵۳	۱۲۱/۳۱	۵/۶۵	۱۲۸/۵۸	۱۳۰/۴	۱۳:۰۲:۲۵	۰/۸۳۲۷	۰/۷۸	۱/۱۲
۶	۷۳/۷۷	۱۰۲/۲۶	۵/۸۳	۱۲۸/۸۷	۱۳۰/۸	۱۲:۰۸:۲۶	۰/۸۴۲۱	۰/۵۲	۰/۹۶
۷	-۶۲/۷۷	۷۲/۳۶	۴/۵۱	۱۰۰/۰۵	۱۰۲/۷	۱۱:۱۷:۴۷	۰/۸۹۲۲	۱/۳۸	۱/۴۴
۸	-۴۸/۹۱	۸۲/۳۰	۴/۷۹	۹۹/۸۳	۱۰۲/۴	۱۱:۵۵:۴۲	۰/۸۷۴	۰/۹۷	۱/۲۱
۹	-۱۸/۸۹	۳۷/۸	۴/۱	۵۱/۹	۵۷/۰	۱۱:۳۷:۲۲	۰/۹۴۸۴	۲/۱	۱/۶
۱۰	۹/۷۵	۴۱/۱۵	۴/۲۷	۵۱/۸	۵۷/۰	۱۲:۳۲:۲۵	۰/۹۵۱۳	۲/۱۵	۱/۶۸



شکل ۵ توزیع شار حرارتی غیر یکنواخت بر روی سطح لوله گیرنده

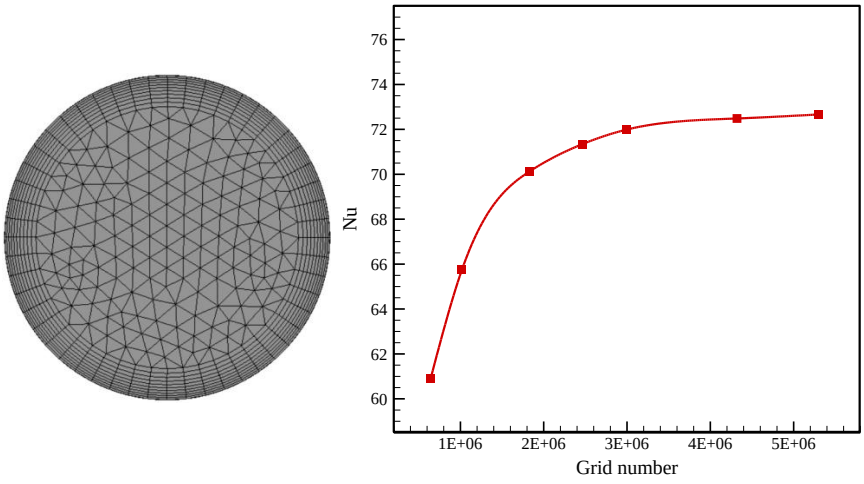
معادلات حاکم بر مسئله بر اساس روش حجم محدود حل‌شده‌اند. مدل استاندارد $\kappa-\varepsilon$ با تابع دیواره‌ی استاندارد، که می‌تواند انتقال حرارت و اصطکاک نمک‌های مذاب در لوله جریان آشفته را به خوبی پیش‌بینی کند، در مدل حاضر انتخاب شده است[22]. برای کوپل فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل و برای گسسته‌سازی جملات جابجایی در معادلات مومنتوم و انرژی از روش بالاست مرتبه دوم استفاده شده است.

مطالعه شبکه و اعتبارسنجی

در این بخش، استقلال حل عددی از اندازه شبکه محاسباتی و همچنین صحت سنجی آن بررسی شده است. به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، عدد ناسلت برای هفت شبکه مختلف محاسبه شده است. عدد ناسلت محاسبه شده مربوط به حالتلوله گیرنده بدون آشوبگر و سیال آب است که جهت اعتبارسنجی استفاده شده است[26]. عدد رینولدز در این حالت ۱۰۰۰۰، دمای ورودی ۳۰۰ درجه کلوین، قطر داخلی لوله ۱۶/۶، طول لوله ۲۰۰۰ میلی‌متر و شار حرارتی ثابت و برابر با ۸۷۵۷۱ وات بر مترمربع درنظر گرفته شده است. شکل (۶) تغییرات عدد ناسلت را بر حسب تعداد سلول‌های شبکه نشان می‌دهد.

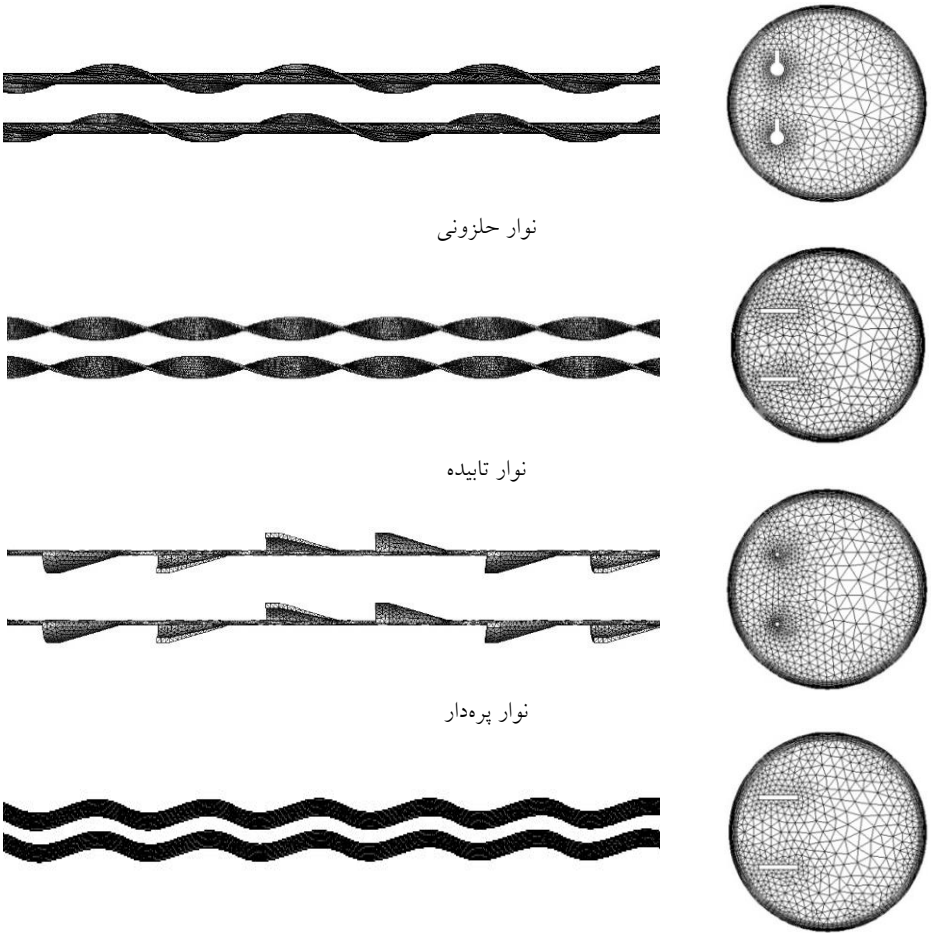
با توجه به شکل (۶-الف)، از شبکه ششم به بعد تغییر چندانی در عدد ناسلت مشاهده نمی‌شود. بنابراین شبکه ۵ با تعداد ۴۳۲۰۱۱۹ سلول انتخاب شده است. شکل (۶-ب) شبکه تولید شده در مقطع لوله را نشان می‌دهد.

برای سایر حالت‌های مورد مطالعه در این پژوهش، بررسی استقلال از شبکه به طریق مشابه انجام شده است. شبکه محاسباتی تولید شده برای چهار نوع آشوبگر در شکل (۷) نمایش داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۶(الف) عدد ناسلت در شبکه‌های محاسباتی مختلف، (ب) شبکه تولید شده در سطح مقطع لوله



نوار حلزونی

نوار تابیده

نوار پره‌دار

نوار موج‌دار

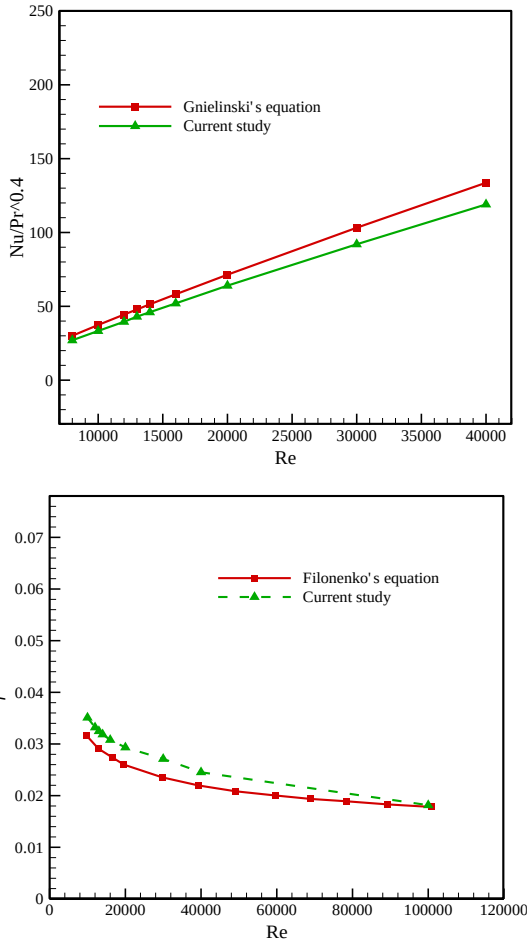
شکل ۷شبکه محاسباتی تولید شده برای چهار نوع آشوبگر

برای صحت سنجی عددی دو حالت در نظرگرفته شده است. در حالت اول لوله گیرنده بدون آشوبگر با سیال آب، و در حالت دوم لوله گیرنده با سیال نمک مذاب در نظر گرفته شده است. در حالت اول اعتبارسنجی عدد ناسلت با رابطه گنیلینسکیو و ضریب اصطکاک با رابطه فیلوننکو انجام شده است که به ترتیب توسط معادله (۲۳) و (۲۴) تعریف می‌شوند [26].

$$Nu = 0.012(\mathrm{Re}^{0.87} - 280)\,\mathrm{Pr}^{0.4}[1+(\frac{D}{l})^{\frac{2}{3}}] \quad (۲۳)$$

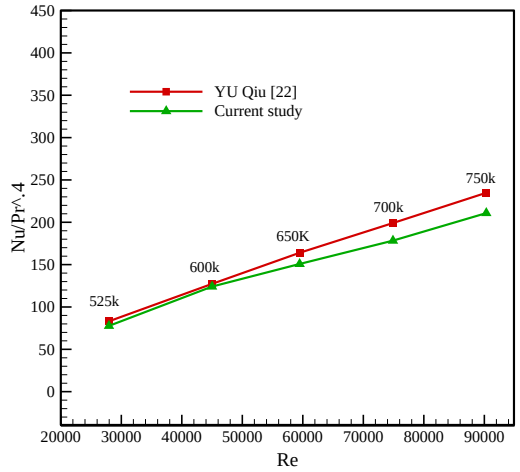
$$f = (1.821\times \log Re - 1.864)^{-2} \quad (۲۴)$$

در شکل (۸) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در اعداد رینولدز مختلف با مقادیر محاسبه شده از رابطه گنیلینسکی و رابطه فیلوننکو مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مطابقت خوبی با رابطه‌های فوق دارد. اختلاف بین عدد ناسلت حاصل از شبیه‌سازی و رابطه گنیلینسکی و همچنین اختلاف ضریب اصطکاک بدست آمده و رابطه فیلوننکو به طور میانگین ۶ درصد برای هر دو نمودار است.



شکل ۸مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با رابطه گنیلینسکی و فیلوننکو

اعتبارسنجی حالت دوم با در نظر گرفتن سیال نمک مذاب درون لوله با قطر ۱۶/۶میلی‌متر، طول ۲۰۰۰ میلی‌متر، شار حرارتی ثابت $۸۷۵۷۱\mathrm{W/m^2}$ و سرعت ورودی $۴\mathrm{m/s}$ است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج پژوهش کیو و همکاران [22] مقایسه شده است. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با کار عددی کیو و همکاران در شکل (۹) نمایش داده شده است. درصد اختلاف در نمودار اعتبار سنجی عدد ناسلت به طور میانگین ۷٪ است.



شکل ۹مقایسه نتایج پژوهش حاضر با کار عددی کیو و همکاران [22]

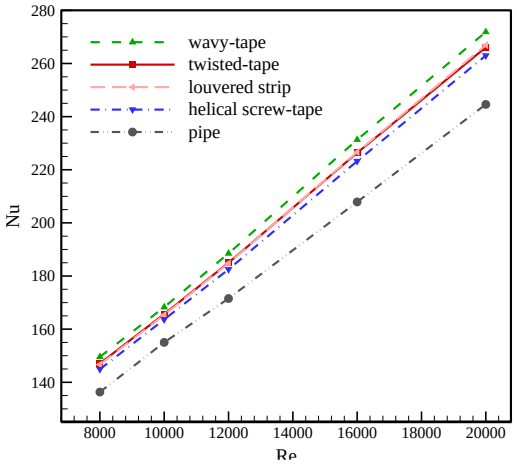
نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از حل عددی جریان سیال در لوله گیرنده تحت شار حرارتی غیر یکنواخت و در حضور آشوبگرهای مختلف ارائه شده است. اثر تغییر پارامترهای هندسی شامل گام و ضخامت آشوبگر، تغییر موقعیت قرارگیری آشوبگر درون لوله گیرنده و همچنین تأثیر شکل آشوبگر بر پارامترهای جریان بررسی شده است.

بررسی تأثیر شکل آشوبگر

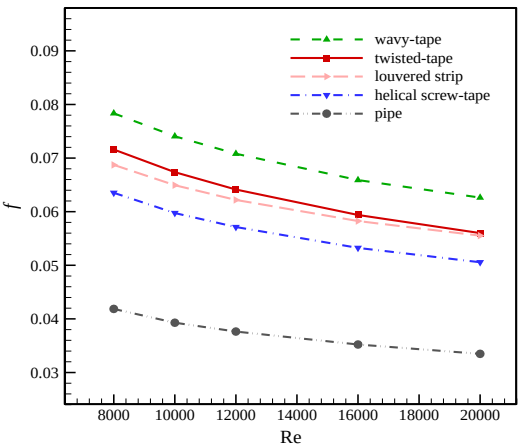
در این بخش تأثیر شکل آشوبگرها بر جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده بررسی شده است. شکل آشوبگر نقش مهمی در میزان نوسانات و آشفتگی جریان و کارایی انتقال حرارت لوله گیرنده خواهد داشت. شکل (۱۰) تغییراتNuرا در اعداد رینولدز مختلف برای چهار نوع آشوبگر نوار تابیده، نوار موج‌دار، نوار حلزونی و نوار پره‌دار نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، عدد ناسلت در عدد رینولدز ۸۰۰۰ برای چهار نوع آشوبگر نوار موج‌دار، نوار تابیده، نوار پره‌دار و نوار حلزونی به ترتیب دارای مقادیر ۱۵۰، ۱۴۷، ۱۴۶ و ۱۴۴ است. بنابراین نوار موج‌دار نسبت به سه نوع آشوبگر دیگر، عدد ناسلت بالاتری دارد. در مقابل، نوار حلزونی کمترین عدد ناسلت را نتیجه داده است. همچنین، آشوبگر نوار موج‌دار نسبت به لوله ساده عدد ناسلت را ۱۰ درصد افزایش داده است. تولید گردابه‌های مماسی در کناره‌های نوار موجدار باعث افزایش انتقال حرارت موضعی در سطح لوله در محل اعمال بیشترین شار حرارتی می‌شود که در نتیجه

آن، اختلاط جریان سیال گرم کنار دیواره با جریان سرد بهتر صورت گرفته و گرادیان دمای محیطی کاهش بیشتری خواهد داشت.



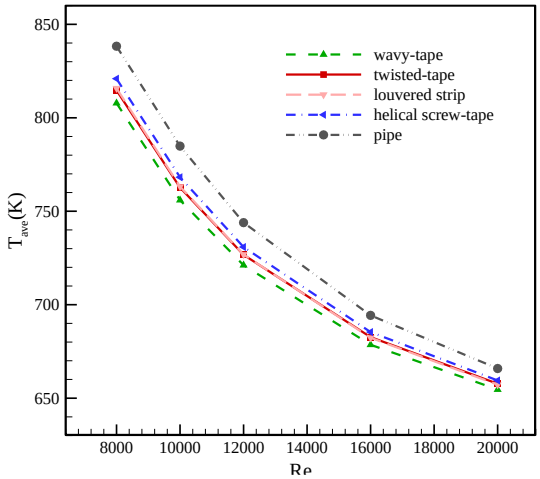
شکل ۱۰ نمودار تغییراتNu بر حسب عدد Re برای آشوبگرهای مختلف

تغییرات ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز مختلف برای چهار نوع آشوبگر و لوله ساده در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود استفاده از آشوبگرها به دلیل افزایش قابل توجه مقاومت در جریان، منجر به افزایش ضریب اصطکاک شده است. مقایسه ضریب اصطکاک برای چهار نوع آشوبگر نشان می‌دهد نوار موج‌دار بیشترین ضریب اصطکاک و نوار حلزونی کمترین ضریب اصطکاک را دارد که در عدد رینولدز ۸۰۰۰، به ترتیب دارای مقادیر ۰/۰۷۸ و ۰/۰۶۳ هستند.



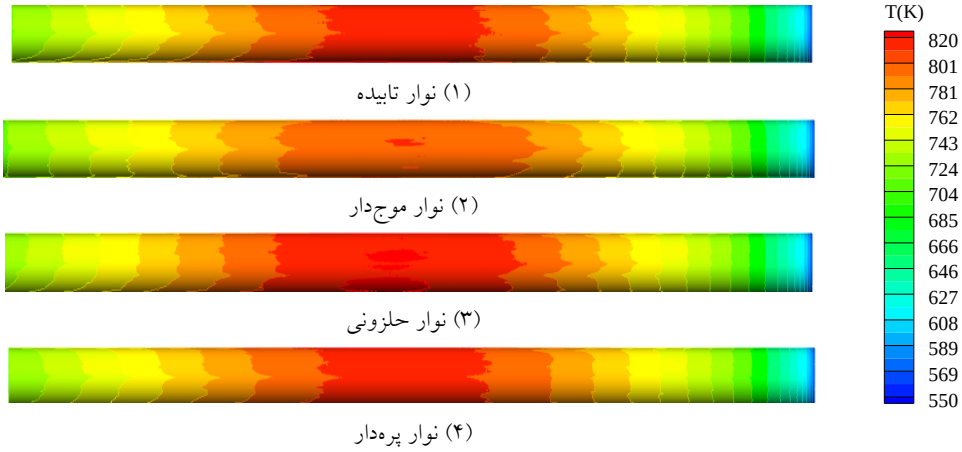
شکل ۱۱ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک f بر حسب Reبرای آشوبگرهای مختلف

در شکل (۱۲) تغییرات دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده بر حسب Re برای چهار نوع آشوبگر نشان داده شده و با لوله ساده بدون آشوبگر مقایسه شده است. همان‌طور که اشاره شد، افزایش گرادیان دمای محیطی باعث افزایش تنش حرارتی و کاهش عمر و قابلیت اطمینان لوله‌های گیرنده می‌شود. با توجه به نمودار شکل (۱۲)، نوار موج‌دار کمترین دمای میانگین T_{avg} (۸۰۷ درجه کلوین در عدد رینولدز ۸۰۰۰) را نسبت به سه نوع دیگر دارد. در مقابل، نوار حلزونی بیشترین دمای میانگین را در بین چهار نوع آشوبگر دارد که مقدار آن در عدد رینولدز ۸۰۰۰ برابر با ۸۲۱ درجه کلوین است. دمای میانگین لوله با نوار موج‌دار در عدد رینولدز ۸۰۰۰ نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر، چهار درصد کاهش یافته است.نوار موجدار با تولید گردابه‌های متمرکز در کناره‌های خود باعثافزایش انتقال حرارت در محل تمرکز شار خورشیدی و در نتیجه کاهش دمای میانگین سطح لوله می‌شود.



شکل۱۲ تغییرات دمای میانگین سطح بیرونی لوله برای آشوبگرهای مختلف

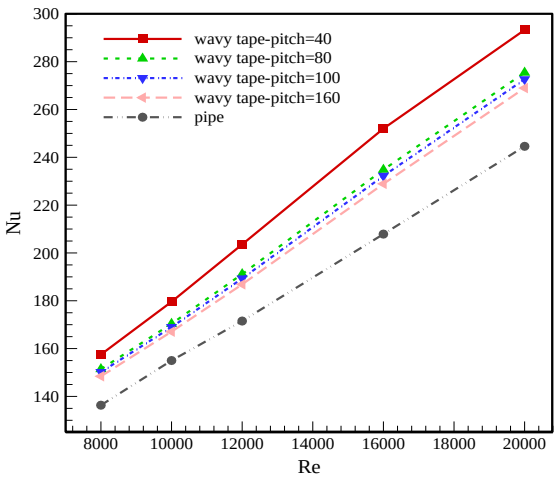
در شکل (۱۳) کانتور دما روی سطح لوله گیرنده برای شکل‌های مختلف آشوبگر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود، نوار موج‌دار دارای کمترین ناحیه ماکزیمم دما و سپس نوار تابیده و نوار پره‌دار تقریباً دارای توزیع دمای مشابه هستند. نوار حلزونی نیز ناحیه ماکزیمم دمای بزرگتری دارد. بنابراین شکل آشوبگرها تأثیر قابل توجهی بر توزیع دمای سطح لوله گیرنده تحت شار حرارتی غیر یکنواخت دارد.



شکل ۱۳ توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای آشوبگرهای مختلف

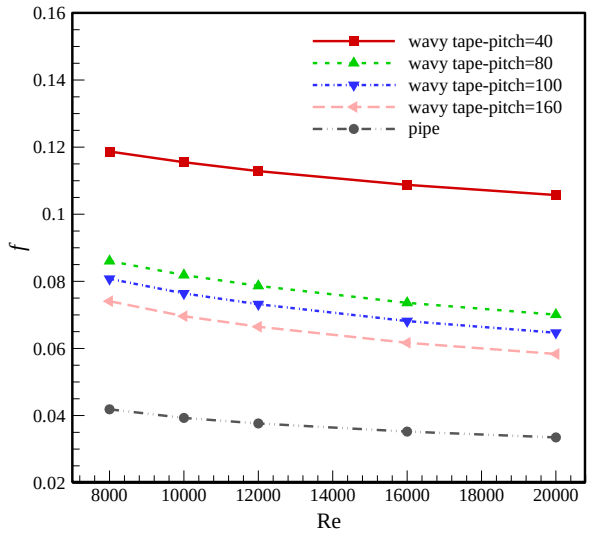
بررسی تأثیر گام آشوبگر

به منظور بررسی اثر تغییر گام آشوبگر بر جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده، چهار گام ۴۰،۸۰ ،۱۰۰و ۱۶۰ میلی‌متر برای نوار موج‌دار با سطح مقطع $8\times3mm^2$ در نظر گرفته شده است. شکل (۱۴) تغییرات عدد ناسلت Nu با عدد رینولدز Re را برای گام‌های مختلف آشوبگر نشان می‌دهد. با افزایش گام آشوبگر در یک عددرینولدز ثابت، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. با افزایش گام نوار موج‌دار و کاهش اغتشاش در جریان، ضخامت لایه مرزی کنار دیواره بزرگتر شده و گرادیان دما کاهش می‌یابد و همین امر باعث کاهش عدد ناسلت شده است.همان طور که مشاهده می‌شود با کاهش گام در یک عدد رینولدز ثابت از ۱۶۰ تا ۴۰ میلی‌متر، عدد ناسلت بیش از ۸ درصد افزایش می‌یابد و گام ۴۰ نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر، ۱۸ درصد افزایش عدد ناسلت دارد.



شکل ۱۴ نمودار تأثیر گام نوار موج‌دار بر عدد ناسلت

شکل (۱۵) تغییرات ضریب اصطکاکf را بر حسب گام آشوبگر در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. با کاهش گام در یک عدد رینولدز ثابت از ۱۶۰ تا ۴۰ میلی‌متر، ضریب اصطکاک به طور میانگین ۷۰ درصد افزایش می‌یابد و گام ۴۰ نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر در حدود ۱۹۰ درصد افزایش ضریب اصطکاک دارد.

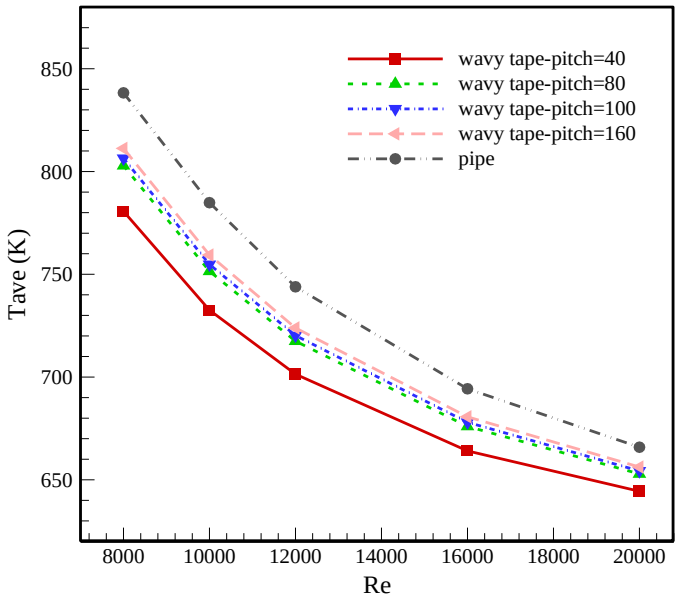


شکل۱۵ نمودار تأثیر گام نوار موج‌دار بر ضریب اصطکاک

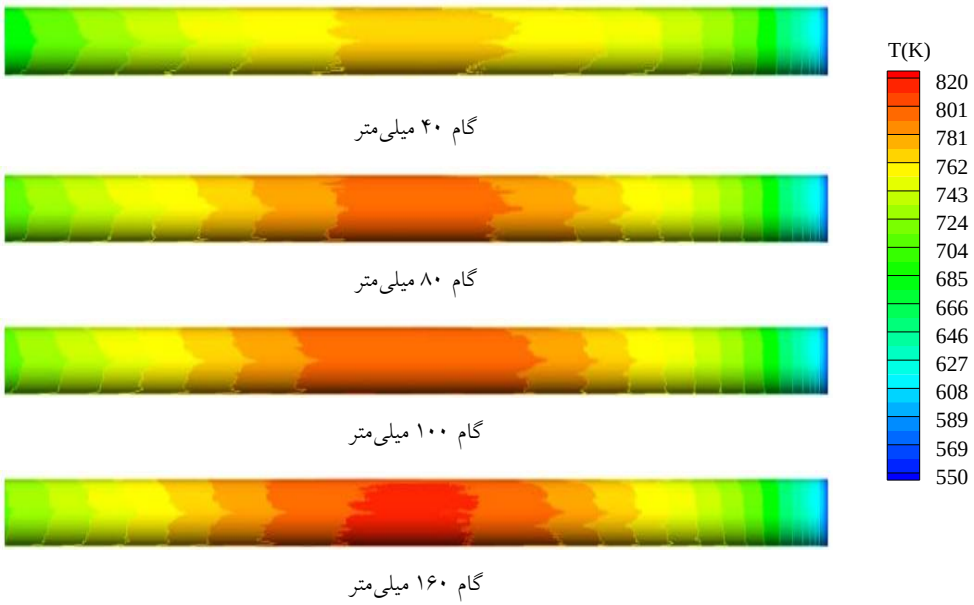
در شکل (۱۶)نمودار تأثیر گام نوار موج‌دار بر دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده به نمایش درآمده است.با کاهش گام، آشفتگی جریان و برخورد سیال با سطح بیشتر شده و دمای میانگین سطح کاهش می‌یابد. دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده در عدد رینولدز ۸۰۰۰ برای نوار موج‌دار با گام ۴۰

میلی‌متر ۷۸۰ درجه کلوین و در گام ۱۶۰ میلی‌متر دارای مقدار ۸۱۱ درجه کلوین است (۳۱ درجه کلوین کاهش دما). همچنین، دمای میانگین سطح برای نوار موج‌دار با گام ۴۰ میلی‌متر نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر ۸ درصد کاهش یافته است.

در شکل(۱۷) توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای گام‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به کانتورهای دما مشاهده می‌شـــود با افزایش گام‌ها از ۴۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر، میزان دمای ماکزیمم روی سطح لوله افزایش می‌یابد. با افزایش گام آشوبگر، میزان انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش یافته و دمای ماکزیمم بر روی سطح افزایش می‌یابد و در نتیجه تنش حرارتی نیز افزایش خواهد یافت.



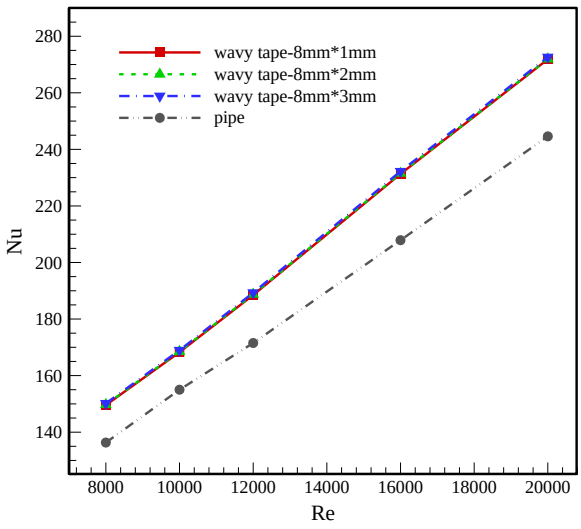
شکل ۱۶ نمودار تأثیر گامبر دمای میانگین سطح بیرونی لوله



شکل ۱۷ توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای گام‌های مختلف نوار موج‌دار

بررسی تأثیر ضخامت آشوبگر

در این بخش اثر ضخامت آشوبگر بر جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده بررسی شده است. در لوله گیرندهاز آشوبگر نوار موج‌دار با گام ۱۰۰ میلی‌متر و با سطح مقطع mm^2 ۸×۱، ۸×۲ و ۸×۳ استفاده شده است. شکل (۱۸) نمودار تأثیر افزایش ضخامت آشوبگر برعدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود عدد ناسلت با افزایش *Re* افزایش یافته و با افزایش ضخامت از ۱ تا ۳ میلی‌متر،افزایش عدد ناسلت برای این نوع آشوبگرنامحسوس است.

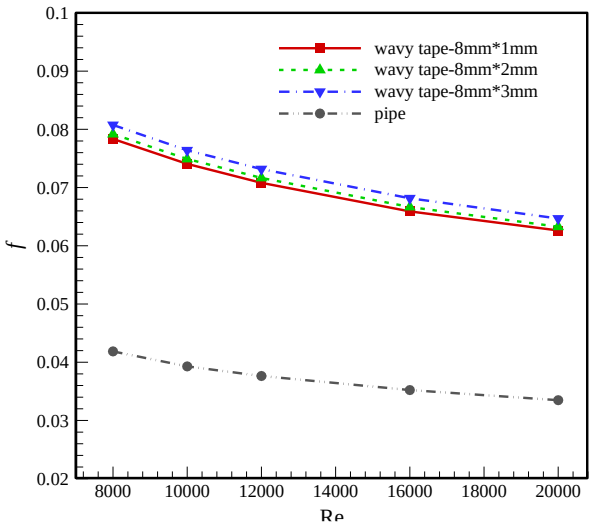


شکل ۱۸ نمودار تغییرات عدد Nu بر حسب عدد Re برای ضخامت‌های مختلف نوار موج‌دار

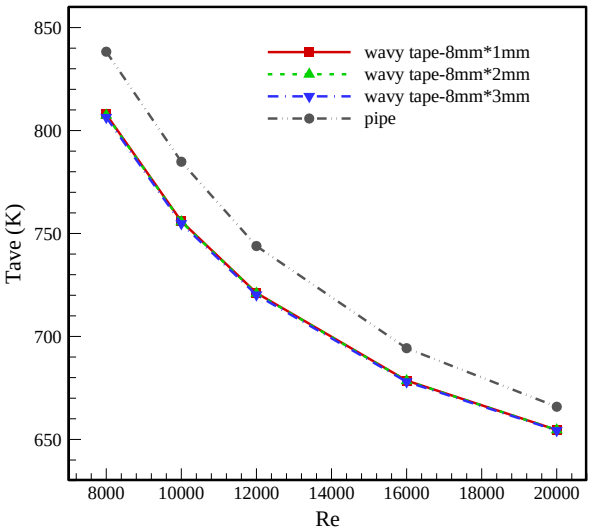
در شکل (۱۹) تأثیر ضخامت نوار موج‌دار بر ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت آشوبگر از ۱ تا ۳ میلی‌متر، ضریب اصطکاک حدود ۴ درصد افزایش یافته است و ضخامت ۳ میلی‌متر نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر منجر به ۹۰ درصد افزایش ضریب اصطکاک شده است.

شکل (۲۰) تغییرات دمای متوسط سطح بیرونی لوله گیرنده را با Re برای ضخامت‌های مختلف نوار موج‌دار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت نوار موج‌دار تأثیر محسوسی بر دمای میانگین سطح ندارد. دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده برای آشوبگر با ضخامت ۳ میلی‌متر نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر، حدود ۴ درصد کاهش یافته است.

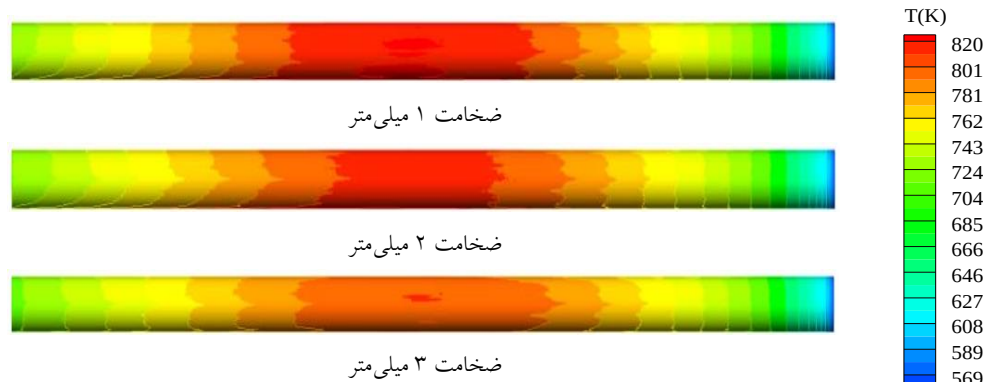
در شکل(۲۱) کانتور دما روی سطح لوله گیرنده برای ضخامت‌های مختلف آشوبگر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت نوار موج‌دار، نواحی دارای ماکزیمم دما کوچکتر خواهند شد. کاهش گرادیان دمای محیطی باعث کاهش تنش حرارتی و افزایش قابلیت اطمینان لوله‌های گیرنده می‌شود.



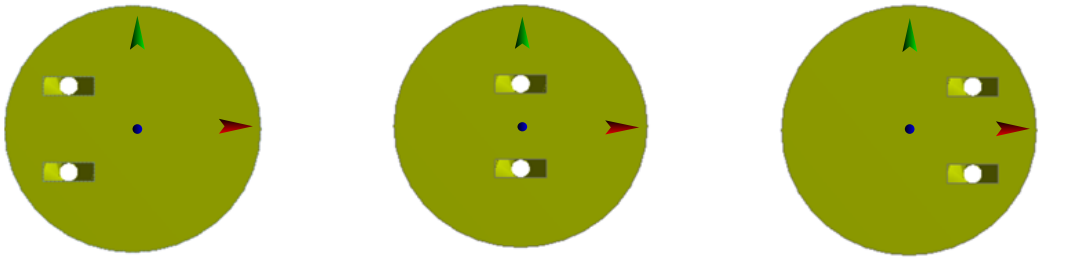
شکل ۱۹ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک f بر حسب عدد Re برای ضخامت‌های مختلف نوار موج‌دار



شکل ۲۰ نمودار تغییرات دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده در ضخامت‌های.مختلف نوار موج‌دار



شکل ۲۱ کانتور دما در سطح لوله گیرنده برای ضخامت‌های مختلف نوار موج‌دار

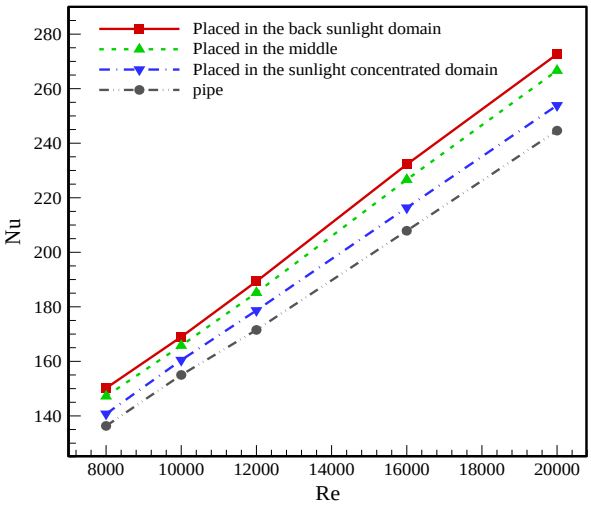


شکل ۲۲ موقعیت‌های مختلف قرارگیری آشوبگر در لوله گیرنده

بررسی موقعیت آشوبگر در لوله گیرنده

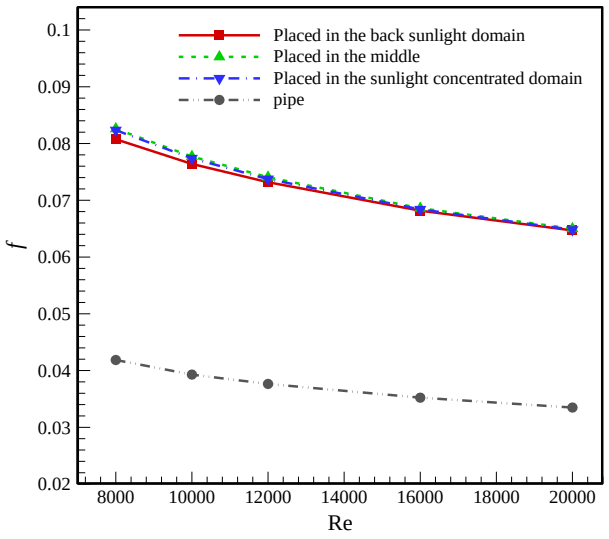
به منظور بررسی تأثیر موقعیت آشوبگر در لوله گیرنده بر جریان سیال و انتقال حرارت، ۳ حالت مختلف برای نوار موج‌دار با سطح مقطع ۸×۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه شار حرارتی غیریکنواخت بر بخشی از سطح لوله گیرنده که در مقابل میدان هلیوستات قرار می‌گیرد وارد می‌شود، سه حالت برای موقعیت قرارگیری آشوبگر در لوله گیرنده می‌توان در نظر گرفت: ۱. نزدیک به دیواره شار حرارتی غیریکنواخت، ۲. وسط لوله گیرنده، ۳. نزدیک به دیواره عایق. در شکل (۲۲) موقعیت‌های مختلف قرارگیری آشوبگر در ۳ حالت، به نمایش درآمده است.

شکل (۲۳) تأثیر موقعیت قرارگیری آشوبگر در لوله گیرنده را بر عدد ناسلت نشان می‌دهد.مشاهده می‌شود که عدد ناسلت Nu برای حالتی که آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق قرار گرفته است، بیشتر از موقعیت نزدیک به دیواره شار حرارتی غیریکنواخت است. وقتی آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق قرار می‌گیرد، جریان سیال گرم بیشتری از ناحیه نزدیک به دیواره با شار حرارتی غیریکنواخت به ناحیه نزدیک به دیواره عایق انتقال یافته و اختلاط جریان سیال سرد و گرم به طور کامل صورت می‌گیرد و در نتیجه انتقال حرارت بهتر انجام می‌شود.در عدد رینولدز ۸۰۰۰، عدد ناسلت برای موقعیت آشوبگر در مجاورت دیواره عایق ۱۵۰ و در موقعیت نزدیک به دیواره با شار حرارتی غیریکنواخت ۱۳۶ محاسبه شده است.



شکل ۲۳نمودار تغییرات عدد Nu بر حسب عدد Re برای موقعیت‌های مختلف آشوبگر

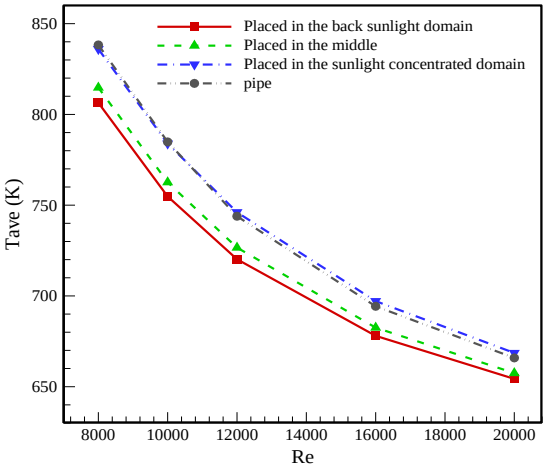
تغییرات ضریب اصطکاک f بر حسب عدد رینولدز برای موقعیت‌های مختلف آشوبگر در لوله گیرنده در شکل (۲۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر موقعیت از حالت نزدیک به دیواره شار غیریکنواخت به حالت نزدیک به دیواره عایق، تغییر چندانی در ضریب اصطکاک ایجاد نمی‌شود. بنابراین، موقعیت قرارگیری آشوبگر در لوله گیرنده تأثیر محسوسی بر ضریب اصطکاک ندارد.



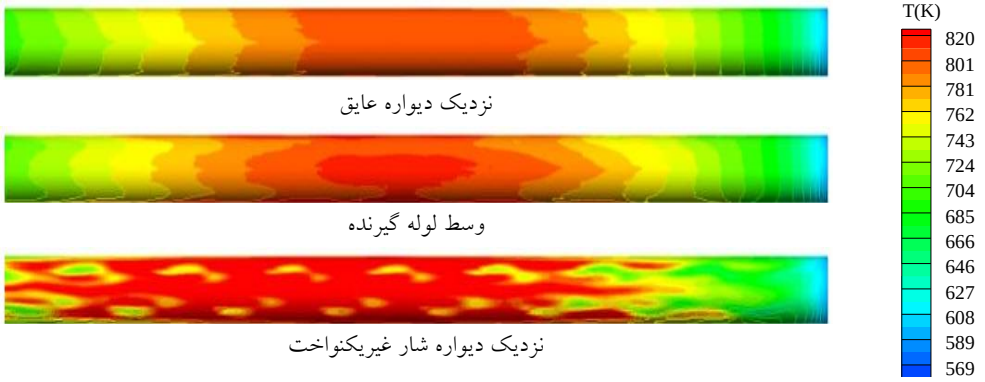
شکل ۲۴ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک f بر حسب عدد Re برای موقعیت‌های مختلف آشوبگر

شکل (۲۵) تغییرات دمای میانگین T_{avg} سطح بیرونی لوله گیرنده را بر حسب عدد رینولدز برای موقعیت‌های مختلف آشوبگر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با تغییر موقعیت آشوبگر از دیواره شار حرارتی غیریکنواخت به دیواره عایق، T_{avg} کاهش یافته است. در عدد رینولدز ۸۰۰۰، T_{avg} برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق، ۸۰۶ درجه کلوین و برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره شار غیریکنواخت، ۸۳۶ درجه کلوین است.

توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای سه موقعیت قرارگیری آشوبگر در شکل (۲۶) نمایش داده شده است. با تغییر موقعیت آشوبگر و نزدیک شدن به ناحیه شار غیریکنواخت، دمای ماکزیمم بر روی سطح افزایش یافته است. درحالی‌که در موقعیت نزدیک به دیواره عایق، توزیع دما یکنواخت‌تر است. وقتی آشوبگر نزدیک به دیواره با شار غیریکنواخت قرار می‌گیرد، اختلاط جریان سیال گرم نزدیک به دیواره بیشتر با بخش میانی لوله صورت می‌گیرد و بنابراین اختلاط جریان سیال گرم و سرد به خوبی صورت نگرفته و توزیع دما غیریکنواخت‌تر خواهد بود. بنابراین، بهترین حالت برای قرارگیری آشوبگر، موقعیت نزدیک به دیواره عایق است.



شکل ۲۵ نمودار تأثیر موقعیت آشوبگر بر دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده



شکل ۲۶ کانتور دما در سطح لوله گیرنده برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آشوبگر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، انتقال حرارت جابجایی نمک نیترات مذاب (هایتک) در لوله گیرنده حفره‌ای تحت شار حرارتی غیریکنواخت به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. به منظور بهبود انتقال حرارت و کاهش گرادیان دما بر روی سطح لوله گیرنده، چهار نوع آشوبگر مختلف درنظر گرفته شده است و تأثیر شکل آشوبگرها، ضخامت، گام و موقعیت قرارگیری درون لوله گیرنده مورد مطالعه قرار گرفته است. شار حرارتی غیریکنواخت واقعی بر اساس مدل HFLCAL و با نوشتن کد مخصوص به زبان سی پلاس پلاس به نرم افزار اضافه شده است. نتایج حاصل از انجام این پژوهش به شرح زیر است:

۱. نوار موج‌دار نسبت به سه نوع آشوبگر دیگر، بالاترین ناسلت Nu و کمترین دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده را دارد که به ترتیب دارای مقادیر ۱۵۰ و ۸۰۷ درجه کلوین در عدد رینولدز ۸۰۰۰ هستند.افزایش عدد ناسلت نوار موج‌دار نسبت به نوار پره‌دار، تابیده و حلزونی به ترتیب ٪۱/۸، ٪۲ و ٪۳/۲ و نسبت به لوله گیرنده بدون آشوبگر ٪۱۰ است.

۲. با افزایش گام آشوبگر، عدد ناسلت Nu کاهش یافته و دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده افزایش می‌یابد. در عدد رینولدز ۸۰۰۰، با افزایش گام از ۴۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر، T_{avg} از ۷۸۰ درجه کلوین تا ۸۱۱ درجه کلوین افزایش یافته و عدد Nu ٪۶ کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش گام در یک عدد رینولدز ثابت از ۴۰ تا ۱۶۰، ضریب اصطکاک f به طور متوسط ۷۰ درصد کاهش یافته است.

۳. تحت شار حرارتی مرزی غیریکنواخت، بهترین حالت برای قرارگیری آشوبگر، موقعیت نزدیک به دیواره عایق می‌باشد. توزیع دما در حالتی که آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق قرار گرفته است، به دلیل اختلاط بهتر جریان سیال گرم و سرد، یکنواخت‌تر از حالتی است که نزدیک به دیواره شار غیریکنواخت قرار می‌گیرد. دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده در عدد رینولدز ۸۰۰۰ برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق، ۸۰۶ درجه کلوین و برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره شار غیریکنواخت، ۸۳۶ درجه کلوین است. همچنین عدد ناسلت Nu برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق حدود ٪۸ بیشتر از دیواره شار حرارتی غیریکنواخت است.

واژه نامه

HFLCAL	محاسبات چیدمان میدان هلیوستات
sunshape	توزیع تابش خورشیدی

فهرست علائم

	علائم انگلیسی
A_m	مساحت کلی آینه‌های هلیوستات
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه
D	فاصله تا نقطه هدف
f	ضریب اصطکاک، فاصله کانونی
f_{at}	ضریب میرایی
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
H_t	ابعاد تصویر در صفحه مماسی
I_D	تابش مستقیم خورشیدی
k	انرژی جنبشی آشفتگی
K	ضریب هدایت گرمایی
L	طول لوله گیرنده
Nu	عدد ناسلت
u،v،w	سرعت
P	فشار
Re	عدد رینولدز
T	دما
W_s	ابعاد تصویر در صفحه طولی
x،y،z	مختصات کارتزین
	علائم یونانی
ρ	چگالی
μ	ویسکوزیته
ε	اتلاف آشفتگی
σ_{HF}	انحراف موثر در HFLCAL
σ_{sun}	خطای ردیابی
σ_{bq}	انحراف موثر
σ_{ast}	خطای شیب آینه
τ	بازتاب‌پذیری موثر آینه‌ها

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] P. Dutta, "High temperature solar receiver and thermal storage systems", *Applied Thermal Engineering*, vol. 124, pp. 624–632, (2017).

[2] L. Zhang, J. Fang, J. Wei and G. Yang, "Numerical investigation on the thermal performance of molten salt cavity receivers with different structures", *Applied Energy*, vol. 204, pp. 966–978, (2017).

[3] Z. Liao, X. Li, C. Xu, C. Chang and Z. Wang, "Allowable flux density on a solar central receiver", *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 747–753, (2014).

[4] C.K. Ho and B.D. Iverson, "Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 835–846, (2014).

[5] Y. Hao, Y. Wang and T. Hu, "The flow distribution in the parallel tubes of the cavity receiver under variable heat flux", *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 641–649, (2016).

[6] S.M. Besarati, D. Yogi Goswami and E.K. Stefanakos, "Optimal heliostat aiming strategy for uniform distribution of heat flux on the receiver of a solar power tower plant", *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 234–243, (2014).

[7] Q. Yu, Z. Wang and E. Xu, "Analysis and improvement of solar flux distribution inside a cavity receiver based on multi-focal points of heliostat field", *Applied Energy*, vol. 136, pp. 417–430, (2014).

[8] N. Tu, J. Wei and J. Fang, "Numerical investigation on uniformity of heat flux for semi-gray surfaces inside a solar cavity receiver", *Solar Energy*, vol. 112, pp. 128–143, (2015).

[9] M. Binotti, P.D. Giorgi, D. Sanchez and G. Manzolini, "Comparison of different strategies for heliostats aiming point in cavity and external tower", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 138, pp. 021008-1–021008-11, (2016).

[10] A. Salomé, F. Chhel, G. Flamant, A. Ferrière and F. Thiery, "Control of the flux distribution on a solar tower receiver using an optimized aiming point strategy: Application to THEMIS solar tower", *Solar Energy*, vol. 94, pp. 352–366, (2013).

[11] T. Ashley, E. Carrizosa and E. Fernández-Cara, "Optimisation of aiming strategies in solar power tower plants", *Energy*, vol. 137, pp. 285–291, (2017).

[12] K. Wang, Y.L. He, Y. Qiu and Y. Zhang, "A novel integrated simulation approach couples MCRT and Gebhart methods to simulate solar radiation transfer in a solar power tower system with a cavity receiver", *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 93–107, (2016).

[13] J. Pacio and T. Wetzel, "Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems", *Solar Energy*, vol. 93, pp. 11–22, (2013).

[14] L. Marocco, G. Cammi, J. Flesch and T. Wetzel, "Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 105, pp. 22–35, (2016).

[15] C. Zou, Y. Zhang, Q. Falcoz, P. Neveu, C. Zhang, W. Shu, and S. Huang, "Design and optimization of a high-temperature cavity receiver for a solar energy cascade utilization system", *Renewable Energy*, vol. 103, pp. 478–489, (2017).

[16] L. Yang, R. Zhou, Jin, X., Ling, X., Peng, H., "Experimental investigate on thermal properties of a novel high temperature flat heat pipe receiver in solar power tower plant", *Applied Thermal Engineering*, vol. 109, pp. 610–618, (2016).

[17] K. Kanatani, T. Yamamoto, Y. Tamaura and H. Kikura, "A model of a solar cavity receiver with coiled tubes", *Solar Energy*, vol. 153, pp. 249–261, (2017).

[18] A. Mwesigye, T. Bello-Ochende and J.P. Meyer, "Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts", *Applied Energy*, vol. 136, pp. 989–1003, (2014).

[19] Y. Liu, W-J. Ye, Y-H. Li and J-F. Li, "Numerical analysis of inserts configurations in a cavity receiver tube of a solar power tower plant with non-uniform heat flux", *Applied Thermal Engineering*, vol. 140, pp. 1–12, (2018).

[20] M. Allam, M. Tawfik, M. Bekheit and E. El-Negiry, "Heat transfer enhancement in parabolic trough receivers using inserts: A review", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 28, (2021).

[21] P. Liu, Z. Dong, H. Xiao, Z. Liu and W. Liu, "A novel parabolic trough receiver by inserting an inner tube with a wing- like fringe for solar cascade heat collection", *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 327-340, (2021).

[22] Y. Qiu, M. Li, M-J. Li, H. Zhang and B. Ning, "Numerical and experimental study on heat transfer and flow features of representative molten salts for energy applications in turbulent tube flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 135, pp. 732-745, (2019).

[23] W.Q. Tao, *Numerical Heat Transfer*, second ed., Xi'an Jiaotong University Press, Xi'an, (2001).

[24] P. Schwarzbölz, M. Schmitz and R. Pitz-Paal, *Visual HFCAL – a software for layout and optimization of heliostat fields*, Solar PACES, Berlin, (2009).

[25] F.J. Collado, "One-point fitting of the flux density produced by a heliostat", *Solar Energy*, vol. 84(4), pp.673–684, (2010).

[26] V. Gnielinski, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 16, pp. 359–368, (1976).

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 2, 2023. (37-54)

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

Estimating Solar Radiation in Different Climates of Iran using Hybrid Machine Learning Methods

Research Article

Nabi Jahantigh[1], Jamshid Piri[2]

DOI: 10.22067/JACSM.2022.79378.1144

1. Introduction

The use of global solar radiation information is significant in many fields of meteorology, hydrology, and renewable energy. In recent studies in the field of solar radiation forecasting, researchers have turned to artificial intelligence models due to their high prediction accuracy and simplicity of use. For example, some used Multilayer (ML) algorithm such as Feed Forward Neural Network (MLFFNN), Radial Basis Function Neural Network (RBFNN), Regression Vector Machine (SVR) and Adaptive Neural-Fuzzy Inference System (ANFIS) to predict hourly solar radiation. In this research, new hybrid methods based on Greg and Harmony algorithms are proposed for daily estimation of solar radiation in different cities of Iran. Among advantages of these methods are high capabilities of hybrid methods to deal with nonlinear multidimensional functions, their capacity to identify patterns and trends, continuous improvement using new training data, and their wide range of application. Moreover, comparative studies have been conducted using daily test sets, which allow understanding the behavior of these combined algorithms in relation to different weather conditions in the cities of Bandar Abbas, Kerman, Sanandaj, Semnan, and Zahedan. The daily compared results show that the performance of the proposed hybrid models significantly depends on the cloudiness of the sky. The daily classification technique provides the possibility of forming more homogeneous subsets, which has been used to train the best hybrid models of regression vector machine, wolf algorithms, and selected harmony. In the following, the study area is introduced, and governing equations, methods, and results are discussed.

2. Governing equations and solution methods

In this research, Abdullah's equation was used to predict solar radiation and their results were compared with hybrid models. Machine learning models are Regression Vector Machine (SVR), Support Vector Machine Model Based on Grey Wolf Optimization (SVR-GWO), and Hybrid Support Vector Regression with Harmony Search (SVR-HS). The data processing for estimation is done in four steps:

1) Collection and analysis of primary data;
2) Data segmentation in training and testing datasets;
3) Making SVR hybrid models;
4) Validation of models.

Figure 1 shows the flow diagram of the methods used in this study.

3. Results

An SVR model and two hybrid models GWO-SVR and HS-SVR were developed in this research to predict daily solar radiation. Predictions about the models were evaluated using Abdullah's empirical equations and the second regression equation (based on evaporation). Table 7 and Figure 5 show the results of the statistical analysis of the comparison between the artificial intelligence methods and the data measured in different stations. In this research, in terms of statistical comparison between the models in different stations, the hybrid models SVR-GWO and SVR-HS have the best performance and among these two models, the SVR-HS model is better.

*Manuscript received: October 29, 2022. Revised, November 21, 2022, Accepted, December 26, 2022.

[1]. Corresponding author. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. **Email**: njahantigh@uoz.ac.ir.

[2] Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty Water and Soil, Zabol University, Zabol, Iran.

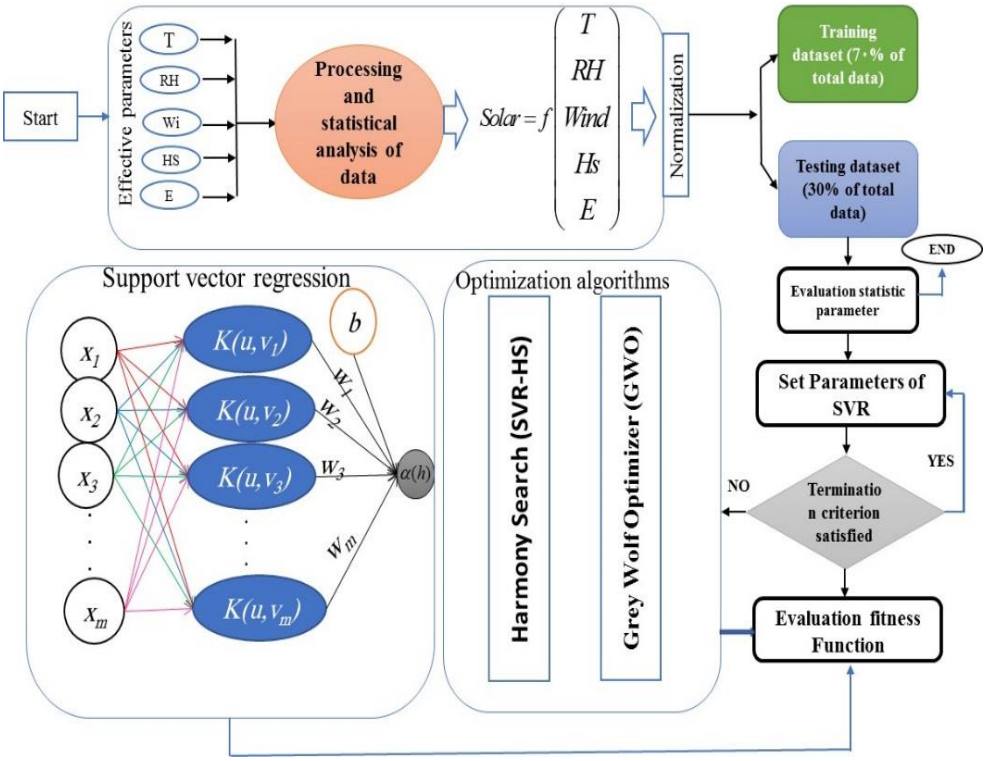


Figure 1. The structure of the proposed SVR based on optimization algorithms to solar prediction

Table 7. Statistical analysis results of comparison between artificial intelligence methods and data measured in different stations

Station	Model	NRMSE	R^2
Bandar Abbas	SVR	0.13	0.74
	SVR-GWO	0.12	0.77
	SVR-HS	0.12	0.78
Kerman	SVR	0.16	0.77
	SVR-GWO	0.15	0.78
	SVR-HS	0.15	0.80
Sanandaj	SVR	0.18	0.83
	SVR-GWO	0.17	0.85
	SVR-HS	0.17	0.86
Semnan	SVR	0.21	0.71
	SVR-GWO	0.20	0.72
	SVR-HS	0.20	0.73
Zahedan	SVR	0.17	0.69
	SVR-GWO	0.17	0.70
	SVR-HS	0.17	0.71

4. Discussion

SVR-HS model shows an absolute superiority over other models, especially the experimental models, so that the performance of SVR-HS model is about two times higher than the experimental model. Another finding of this research is that considering the smoothness index (n.N) as the only input for experimental models is not enough. Therefore, the correctness of most of the predictions is proved by considering the parameters in the more relevant data. Moreover, the results of this research show that SVR-HS is an efficient method for estimating solar radiation.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ،۳۵، ۱۴۰۲. (۵۴-۳۷)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

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

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

تخمین میزان تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از روش‌های هیبریدی یادگیری ماشین*

نبی جهانتیغ (۱) جمشید پیری (۲)

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/JACSM.2022.79378.1144

چکیده *تابش خورشیدی پارامتر اساسی مورد نیاز برنامه‌های انرژی خورشیدی به‌دلیل محدودیت‌های تکنیکی و مالی در اقصی نقاط جهان اندازه‌گیری نمی‌شود و تعیین آن با روش‌های تخمینی دقیق ضروری است. در این تحقیق، یک مدل برای تخمین تابش خورشیدی پراکنده‌ی افقی روزانه با روش‌های هیبریدی ماشین‌بردار رگرسیونی، الگوریتم‌های گرگ و هارمونی توسعه یافت. در بررسی اعتبار مدل، داده‌های تابش خورشیدی اندازه‌گیری‌شده روزانه شهرهای مختلف با اقلیمهای متفاوت در قسمت آفتابی ایران(بندرعباس، کرمان، سنندج، سمنان و زاهدان) استفاده شد. پارامترهای ورودی مدل‌ها، دمای متوسط، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، تبخیر و سرعت باد می‌باشند. مقایسه تابش خورشیدی مدل هیبریدی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان‌دهنده نتایج مطلوب بر اساس تحلیل آماری بوده و مدل ماشین بردار رگرسیونی – هارمونی روشی کارآمد و دقیق در مقایسه با سایر مدل‌ها به‌ویژه مدل‌های تجربی می‌باشد. متوسط خطای بایاس مطلق بدست آمده، خطای مجذور متوسط ریشه و ضریب همبستگی برای ایستگاه زاهدان به ترتیب برابر با ۱۴/۷۷ مگاژول بر مترمربع، ۲۶/۸۵ مگاژول بر مترمربع و ۰/۶۸ برای معادله تجربی و مقادیر بدست آمده ماشین بردار رگرسیونی – هارمونی به ترتیب برابر با ۱۳/۸۵ مگاژول بر مترمربع ، ۹/۵۸ مگاژول بر مترمربع و ۰/۷۱ می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی تابش خوشیدی، تغییر اقلیم، ماشین بردار رگرسیونی، الگوریتم گرگ، الگوریتم هارمونی، تجربی.

Estimation of Solar Radiation in Different Climates of Iran Using Hybrid Machine Learning Methods

Nabi Jahantigh Jamshid Piri

Abstract *Solar radiation, the basic parameter required for solar energy programs, is not measured in all parts of the world due to technical and financial limitations, and it is necessary to determine with the accurate estimation methods. In this research, a model was developed to estimate the daily horizontal scattered solar radiation with the hybrid methods of Support Vector Regression, Gray Wolf Optimization and Harmony Search Algorithm. To determine the validity of the model, daily measured solar radiation data of different cities in the sunny part of Iran (Bandar Abbas, Kerman, Sanandaj, Semnan and Zahedan) were used. The input parameters of the models are the mean temperature, relative humidity, sunshine hour, evaporation and wind velocity. The comparison of the solar radiation of the hybrid model with the measured values shows the desired results based on statistical analysis, and the hybrid model is an efficient and accurate method compared to other models, especially experimental models. The average absolute bias error obtained, root mean square error and correlation coefficient for Zahedan station are respectively equal to 14.77 MJ/m^2, 26.85 MJ/m^2, and 0.68 for the experimental equation and the obtained values of the regression vector machine - Harmony respectively It was similar to 13.85MJ/m^2, 9.58 MJ/m^2 and 0.71. The research results showed that the regression-harmony vector machine model is an efficient method that is much more accurate than other models.*

Key Words Solar Radiation, Climate change, Support Vector Regression, Wolf Optimization Algorithm, Harmony Search Algorithm, Experimental Models.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۷/۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۰/۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

Email: njahantigh@uoz.ac.ir

(۲) استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

مقدمه

استفاده از اطلاعات تابش خورشیدی جهانی در بسیاری از حوزه‌های هواشناسی [1,2]، هیدرولوژی [3-5]، و انرژی تجدیدپذیر [6,7] قابل‌توجه است. در طول سال‌های اخیر، سیستم‌های جدیدی بر اساس انرژی تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی مناسب برای سیستم‌های انرژی سنتی معرفی شدند. برنامه‌های کاربردی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر جدید به‌دلیل رفع تقاضاهای انرژی به شکل دوستدار محیط زیست، بسیار سودمند می‌باشند. در حقیقت، بهره‌برداری از انرژی تجدیدپذیر راه حل جذاب و ویژه‌ای برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات جوی است. در میان موارد تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی یکی از رایج‌ترین منابع تامین انرژی در نظر گرفته می‌شود زیرا به‌صورت جهانی و گسترده موجود و در دسترس می‌باشد. گسترش فن‌آوری‌های انرژی خورشیدی در بخش انرژی جهانی برای تأمین بخش قابل توجهی از الکتریسیته، گرمایش، سرمایش و پخت و پز باعث جذابیت بیشتر آن شده است. یکی از ملزومات اولیه‌ی استفاده از انرژی خورشیدی، گردآوری و پردازش اطلاعات دقیق تابش خورشید است. تابش خورشیدی زمینی شامل پرتوافکنی جهانی یا تابش پراکنده است که از پارامترهای بسیار مهم در برنامه‌های کاربردی قابل استفاده در انرژی خورشیدی می‌باشد مانند اندازه‌گذاری، شبیه سازی و تعیین فن‌آوری‌های انرژی خورشیدی. سطح جاذب عمده‌ی سیستم‌های انرژی خورشیدی مایل هستند. این کار باعث افزایش راندمان حرارتی در سیستم‌های مایل نسبت به سطوح افقی می‌شود.

تخمین میزان تابش خور شیدی پراکنده بر ا ساس روش‌های آماری رگرسیونی و هوش مصنوعی نسبت به اندازه‌گیری واقعی آنها بسیار دقیق‌تر می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، در طول دهه‌های گذشته، تعداد قابل توجهی از مدل‌های تجربی توسط محققان متفاوت پیشنهاد شده‌اند که تابش خورشیدی پراکنده افقی را با استفاده از پارامترهای درون داده‌ای متفاوت تخمین می‌زنند [8,9]. در میان همه‌ی این پارامترها، شاخص ابرناکی مهم‌ترین شاخص برای تخمین‌زدن تابش خورشیدی است.

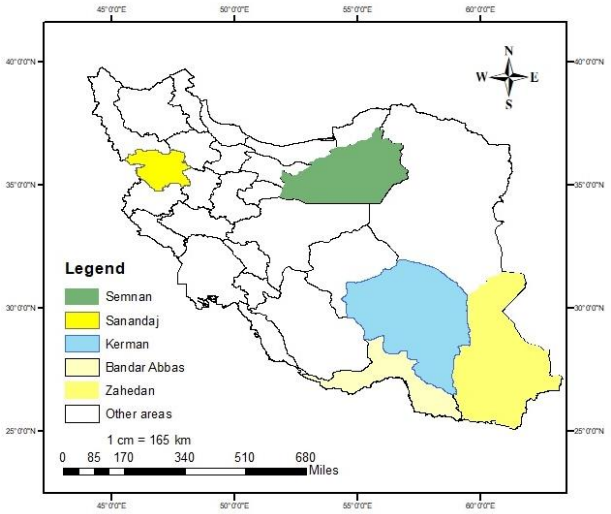
محققین در مطالعات اخیر در زمینه پیش‌بینی تابش خورشیدی به‌دلیل دقت بالای پیش‌بینی و سادگی استفاده آن‌ها به مدل‌های هوش مصنوعی روی آورده‌اند. خسروی و همکاران [10] چندین الگوریتم مولتی لایر (ML) را مانند شبکه عصبی پیش‌خور (MLFFNN)، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBFNN)، ماشین بردار رگرسیونی (SVR) و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) برای پیش‌بینی تابش خورشیدی ساعتی توسعه دادند که مدل SVR می‌تواند تابش خورشیدی ساعتی را با استفاده از مقادیر درونی تاریخی به دقت پیش‌بینی کند. لطفی و همکاران [11] از مدل چند لایه مانند شبکه‌های عصبی پرسپترون (MLP) و خود رگرسیون عصبی (NARX) برای پیش‌بینی اجزای تابش خورشیدی ساعتی استفاده کردند که مدل NARX بهترین عملکرد را با استفاده از داده‌های هواشناسی در دسترس و ارزان ارائه داده است. انور و خطیب [12] یک مدل ترکیبی جدید را براساس جنگل‌های تصادفی (RFs) و الگوریتم کرم شب تاب (FFA) برای پیش‌بینی تابش خورشیدی جهانی ساعتی پیشنهاد کردند. نتایج بدست‌آمده برتری مدل ترکیبی پیشنهادی را نسبت به مدل‌های مرسوم RFS و ANN نشان می‌دهد. بلاید و همکاران [13] یک رویکرد جدید مبتنی بر مدل SVM و اصل سری زمانی برای پیش‌بینی ساعتی تابش خورشیدی جهانی را توسعه داده است. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای روش پیشنهادی با استفاده از مقادیر تابش خورشیدی قبلی است. اورکا و همکاران [14] از مدل SVR برای پیش‌بینی ساعتی تابش جهانی خورشید در جنوب شرقی اسپانیا استفاده کردند. نتایج عملکرد بالای مدل SVR را در مقایسه با مدل‌های خطی کلاسیک و RF نشان می‌دهد. با این حال مطالعات بیشتری باید با استفاده از این تکنیک‌ها صورت گیرد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که مدل‌های RF، SVM و ANN روش‌های بسیار امیدوار کننده‌ای برای پیش‌بینی هستند. با این حال، مقایسه عملکرد بین این مطالعات به دلیل ماهیت مجموعه داده مورد استفاده برای آموزش، محل مطالعه، افق پیش‌بینی و شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی دشوار به نظر می‌رسد [15]. علاوه بر این، مدلی که برای یک مکان به خوبی عمل می‌کند، نتایج خوبی برای مکان‌های دیگر ارائه نمی‌دهد. در نتیجه، هیچ مدل جهانی وجود ندارد که برای همه مکان‌ها عملکرد خوبی داشته باشد، بلکه مجموعه‌ای از مدل‌های امید بخش است که میتوانند برای استفاده مفید واقع شوند. در این تحقیق، روش‌های ترکیبی جدید مبتنی بر الگوریتم‌های گرگ و هارمونی و برای تخمین روزانه تابش خورشیدی در شهرهای مختلف ایران پیشنهاد شده است.

قابلیت‌های بالای روش‌های ترکیبی برای مقابله با توابع چند بعدی غیرخطی، ظرفیت آن‌ها برای شناسایی الگوها و روندها، بهبود مستمر با استفاده از داده‌های آموزشی جدید، و دامنه گسترده کاربرد آن‌ها از جمله مزایای این روش‌ها می‌باشد. علاوه بر این، مطالعات مقایسه‌ای با استفاده از مجموعه‌های آزمایش روزانه انجام شده‌است که اجازه درک رفتار این الگوریتم‌های ترکیبی نسبت به شرایط آب و هوایی مختلف شهرهای بندرعباس، کرمان، سنندج، سمنان و زاهدان را می‌دهد. در واقع، نتایج مقایسه روزانه نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌های ترکیبی پیشنهادی به طور قابل‌توجهی به شرایط ابرناکی آسمان بستگی دارد. در واقع، تکنیک طبقه‌بندی روزانه امکان تشکیل زیرمجموعه‌های همگن‌تری را فراهم می‌کند که برای آموزش بهترین مدل‌های هیبریدی ماشین‌بردار رگرسیونی، الگوریتم‌های گرگ و هارمونی انتخاب‌شده مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه تحقیق،معرفی منطقه مطالعاتی، معادلات حاکم، روش‌های مطالعه و نتایج مورد بحث قرار می‌گیرد.

منطقه مطالعاتی

ایران در نیمکره شـــمالی بین ۰۳′ ۲۵º تا ۴۷′ ۳۹º درجه عرض شمالی از خط استوا و بین ۱۴′ ۴۴º و ۲۰′ ۶۳º درجه طول شرقی از نصف‌النهار است و گواه این است که ایران در منطقه معتدل قرار واقع شـــده اســـت. در این تحقیق مطابق شـــکل (۱)، ایستگاه‌های شهرهای مرکزی مورد استفاده در استان‌های مختلف بندرعباس، کرمان، سنندج، سمنان و زاهدان بوده است.

درجدول‌های (۱) تا (۵) پارامترهایی مانند میانگین (Xmean)، میانگین از انحراف معیار (Sx)، ثابت تغییرات (Cv)، کمینه (Xmin)، بیشینه (Xmax)، چولگی (Skewness) و ضریب همبستگی(Correlation) آمده است. در این ایستگاه‌ها، میزان تابش خورشیدی بیش از همه پارامترها به متوسط دما هوا بستگی دارد، در بیشتر ایستگاه‌ها ضریب همبستگی بیشتر از ۷۱٪ می‌باشد. در تمام ایستگاه‌ها کمترین میزان همبستگی تابش خورشیدی با پارامتر رطوبت نسبی وجود دارد. به‌طور مثال کمترین میزان همبستگی ۰/۷۱- است. با توجه به ضریب تغییرات ۰/۲۳ برای پارامتر درجه حرارت برای ایستگاه بندرعباس بطور متوسط در تمام طول سال آماری درجه حرارت بالای ۲۷ درجه سانتی‌گراد است. کمترین میزان تغییرات برای پارامتر دما برای ایستگاه سنندج می‌باشد که نشان‌دهنده دمای متوسط ۱۵ درجه سلیسیوس در تمام سال آماری می‌باشد. بعد از پارامتر دما، بیشترین همبستگی تابش خورشیدی با تبخیر است. که در بیشتر ایستگاه‌ها بالای ۷۰٪ همبستگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مختلف جهت بررسی تابش خورشیدی

جدول ۱ آنالیزآماری روزانه برای ایستگاه بندرعباس

Station	Data set	Unit	Xmean	Sx	Cv (Sx/Xmean)	Xmin	Xmax	Skewness	Correlation with Solar
Bandar Abass	T_{ave}	˚C	۲۷/۳۸	۶/۳۲	۰/۲۳	۱۲/۳۰	۳۹/۶۰	-۰/۳۳	۰/۷۱
	RH	%	۶۳/۰۷	۱۳/۵۱	۰/۲۱	۴/۰۰	۹۵/۶۳	-۱/۰۹	-۰/۰۹
	Wind	m/s	۶/۵۷	۱/۷۹	۰/۲۷	۳/۰۰	۲۲/۰۰	۱/۴۵	۰/۱۹
	Hs	Hour	۸/۷۹	۲/۳۶	۰/۲۷	۰/۰۰	۱۲/۱۰	-۱/۷۹	۰/۶۶
	E	mm	۷/۲۶	۳/۱۸	۰/۴۴	۰/۵۰	۲۲/۰۰	۰/۳۵	۰/۶۳
	Solar	Cal/cm^2	۲۰۱۰/۶۷	۵۰۹/۷۹	۰/۲۵	۲۴/۰۰	۳۴۷۳/۰۰	-۰/۵۸	۱

جدول ۲ آنالیزآماری روزانه برای ایستگاه کرمان

Station	Data set	Unit	Xmean	Sx	Cv (Sx/Xmean)	Xmin	Xmax	Skewness	Correlation with Solar
Kerman	T_{ave}	˚C	۱۷/۵۰	۸/۸۲	۰/۵۰	−۸/۴۰	۳۳/۴۰	−۰/۲۲	۰/۷۱
	RH	%	۲۸/۳۵	۱۸/۱۶	۰/۶۴	۴/۲۵	۹۷/۳۸	۱/۲۲	−۰/۶۷
	Wind	m/s	۸/۲۷	۳/۸۷	۰/۴۷	۲/۰۰	۳۰/۰۰	۱/۲۰	۰/۰۳
	Hs	Hour	۹/۳۵	۲/۹۴	۰/۳۱	۰/۰۰	۱۳/۵۰	−۱/۴۲	۰/۷۸
	E	mm	۷/۵۵	۴/۴۷	۰/۵۹	−۰/۸۱	۱۹/۴۰	۰/۱۵	۰/۷۲
	Solar	Cal/cm^2	۲۱۳۹/۰۳	۶۹۸/۵۲	۰/۳۳	۸۲/۰۰	۴۱۱۹/۰۰	−۰/۴۸	1

جدول ۳ آنالیزآماری روزانه برای ایستگاه سنندج

Station	Data set	Unit	Xmean	Sx	Cv (Sx/Xmean)	Xmin	Xmax	Skewness	Correlation with Solar
Sanandaj	T_{ave}	˚C	۱۴/۹۶	۹/۹۹	۰/۶۷	۱۲/۵۰	۳۴/۲۰	−۰/۰۲	۰/۷۷
	RH	%	۴۵/۱۴	۲۱/۹۶	۰/۴۹	۱۰/۱۳	۴۱۵/۱۳	۱/۴۷	−۰/۷۸
	Wind	m/s	۵/۶۰	۲/۳۷	۰/۴۲	۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۷۲	۰/۱۰
	Hs	Hour	۸/۴۵	۳/۵۹	۰/۴۲	۰/۰۰	۱۳/۴۰	−۰/۸۷	۰/۸۵
	E	mm	۵/۶۷	۴/۴۹	۰/۷۹	−۱/۰۴	۱۶/۷۰	۰/۲۳	۰/۷۹
	Solar	Cal/cm^2	۱۸۴۱/۲۸	۸۰۲/۱۹	۰/۴۴	۷۹/۰۰	۳۴۳۳/۰۰	−۰/۲۱	۱

جدول ۴ آنالیزآماری روزانه برای ایستگاه سمنان

Station	Data set	Unit	Xmean	Sx	Cv (Sx/Xmean)	Xmin	Xmax	Skewness	Correlation with Solar
Semnan	Tave	˚C	۱۹/۱۵	۱۰/۵۲	۰/۵۵	−۵/۵۰	۳۷/۹۰	−۰/۱۲	۰/۷۸
	RH	%	۳۵/۵۷	۱۹/۲۰	۰/۵۴	۵/۶۳	۹۴/۸۸	۰/۸۲	−۰/۷۱
	Wind	m/s	۵/۶۸	۲/۷۵	۰/۴۸	۱/۰۰	۲۰/۰۰	۰/۸۰	۰/۴۴
	Hs	Hour	۸/۶۳	۳/۲۷	۰/۳۸	۰/۰۰	۱۳/۲۰	−۱/۰۷	۰/۶۷
	E	mm	۶/۹۷	۵/۷۸	۰/۸۳	۰/۰۰	۲۵/۰۰	۰/۳۹	۰/۷۶
	Solar	Cal/cm2	۱۹۸۱/۳۱	۷۳۷/۵۵	۰/۳۸	۲۵/۰۰	۳۶۱۶/۰۰	−۰/۱۳	۱

جدول ۵ آنالیزآماری روزانه برای ایستگاه زاهدان

Station	Data set	Unit	Xmean	Sx	Cv (Sx/Xmean)	Xmin	Xmax	Skewness	Correlation with Solar
Zahedan	Tave	˚C	۱۹/۴۵	۸/۲۶	۰/۴۲	−۵/۹۰	۳۵/۱۰	−۰/۴۰	۰/۷۳
	RH	%	۲۹/۹۵	۱۶/۰۲	۰/۵۳	۵/۰۰	۹۹/۰۰	۱/۱۶	−۰/۵۶
	Wind	m/s	۱۰/۳۱	۳/۷۱	۰/۳۶	۳/۰۰	۳۲/۰۰	۱/۰۲	۰/۰۸
	Hs	Hour	۹/۲۶	۲/۴۸	۰/۲۷	۰/۰۰	۱۶/۷۰	−۱/۶۹	۰/۶۰
	E	mm	۸/۱۲	۴/۶۵	۰/۵۷	۰/۰۰	۲۸/۹۰	۰/۱۴	۰/۷۱
	Solar	Cal/cm^2	۱۹۶۹/۶۹	۶۰۹/۵۰۴	۰/۳۱	۲۴/۱۰	۴۰۹۳/۷۹	−۰/۲۸	۱

معادلات حاکم و روش‌های حل

معادله تجربی حاکم

در این تحقیق، معادله عبدالله [16] برای پیش‌بینی تابش خورشید واسنجی شد و نتایج آنها با مدل‌های هیبریدی مقایسه شده است. معادله (۱).

$$\frac{S}{S_e}=a+b(\frac{n}{N})+cRH+dT \qquad (۱)$$

بر اساس نتایج حاصل از تحقیق معادله (۲) بر اساس تبخیر و میانگین درجه حرارت بیان شده است که نسبت به معادله (۱) اثر تبخیر را نشان می‌دهد و در معادله قبلی اثر رطوبت نسبی بیان شده است.

در رابطه S و S_0 به‌ترتیب تابش رسیده به زمین و تابش برون زمینی بر حسب کالری بر سانتی‌متر مربع در روز ، n و N به ترتیب ساعات آفتابی اندازه گیری شده واقعی و حداکثر ساعات آفتابی روزانه a، b، c، d معادله ضرایب ثابت هستند.

$$\frac{S}{S_0}=a+b(\frac{n}{N})+cE+dT \qquad (۲)$$

مدل‌های یادگیری ماشین

ماشین بردار رگرسیونی (SVR)

SVR یک الگوریتم یادگیری نظارت شده است که برای طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل رگرسیون استفاده می‌شود. در واقع، SVR سریع، قابل‌اعتماد و قادر به مقابله با مشکلات غیرخطی پیچیده در زمینه پیش‌بینی انرژی خورشیدی به کار گرفته شد. در این مدل، ورودی‌های بردار با استفاده از یک تبدیل غیرخطی به فضای ویژگی با ابعاد بالاتر است که در آن یک جداسازی خطی انجام می‌شود. SVR معادله زیر را به حداقل می‌رساند.

$$\min\left(\frac{1}{2}\|w\|^2+C\sum_{i=1}^{n}\left(\xi_i+\xi_i^*\right)\right)$$
$$subject\ to\begin{cases} y_i-(<w,x_i>+b)\le\varepsilon+\xi_i \\ (<w,x_i>+b)-y_i\le\varepsilon+\xi_i^* \\ \xi_i,\xi_i^*\ge 0,\ clear,.... \end{cases} \qquad (۳)$$

x و y مجموعه ورودی و هدف هستند.W بردار وزن و b بایاس است. ξ_i^*و ξ_i متغیرهای کمبود می‌باشند در رابطه (۳) لحاظ و براساس اصل حداقل‌سازی خطای ساختاری، محدوده خطا به وسیله مسئله بهینه‌سازی در رابطه (۲) بهینه می‌گردد. ε محدوده سرعت دوران و C پارامتر هزینه می‌باشد. علاوه بر این، تبدیل غیرخطی با استفاده از توابع کرنل انجام می‌شود. انواع مختلفی از توابع هسته مانند توابع خطی، چندجمله‌ای، گاوسی و سیگموئید وجود دارند. در واقع، تابع خطی ساده‌ترین کرنل است که درجه بالایی از قابلیت تفسیر را ارائه می‌دهد، که اجازه تعیین اهمیت ویژگی را می‌دهد. با این حال، تابع کرنل خطی تنها برای مسائل خطی به خوبی عمل می‌کند. بر خلاف تابع خطی، تابع کرنل چندجمله ای می‌تواند توابع غیرخطی را حل کند و دقیق باشد. در تحقیق حاضر، تابع پایه شعاعی (RBF) برای پیش‌بینی تابش خورشیدی مورد استفاده قرار گرفت به همین دلیل، RBF به عنوان یک تابع هسته مورد استفاده قرار گرفته‌است [10,17] که عبارت آن به صورت معادله (۴) فرمول‌بندی شده‌است:

$$\varphi(x_i,x_j)=e^{-\|x_i-x_j\|^2/2\sigma^2} \qquad (۴)$$

که در σ پارامتری است که عرض تابع گاوسی را تعریف می‌کند. عملکرد SVR به پارامترهای بیش از حد مانند C,ε , and σ بستگی دارد. ترکیب بهینه این پارامترها باید با استفاده از مقادیر از پیش تعریف‌شده مختلف تعیین شود.

رگرسیون بردار پشتیبان ترکیبی با الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری (SVR-GWO)

GWO یک الگوریتم فرا ابتکاری است که برای اولین بار توسط میرجلیلی و همکاران پیشنهاد شد [18]. هدف شبیه‌سازی عادات زندگی گرگ‌های خاکستری در طبیعت تحت فرض الگوریتم بهینه‌سازی است [19]. گرگ خاکستری نوعی شبیه‌سازی رهبری و زندگی براساس سلسله‌مراتب تسلط اجتماعی است. در سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری، چهار نقش وجود دارد: تصمیم‌گیرنده (α)، تسهیل‌کننده (β)، مجری (γ) و پرستار (ω) در میان آن‌ها، تصمیم‌گیرنده (α)به عنوان رهبر بالاترین وضعیت اجتماعی را نشان می‌دهد. همه شخصیت‌های دیگر توسط گرگ‌های آلفا کنترل می‌شوند [20]. تسهیل‌کننده (β) به گرگ‌های آلفا در تصمیم‌گیری و ایجاد نظم و انضباط جمعی کمک می‌کند [18]. وقتی که گرگ‌های آلفا بازنشسته می‌شوند یا می‌میرند، گرگ‌های بتا نیز مناسب‌ترین جایگزین برای آلفا هستند

[21]. γ از گرگ‌های آلفا و گرگ‌های بتا اطاعت می‌کند و به عنوان شکارچی، نگهبان و ناظر وجود دارد. ω به عنوان یک گوسفند یا پرستار بچه گناهکار عمل می‌کند و در پایین اجتماع گرگ‌های خاکستری قرار دارد. با این حال، بدون وجود گرگ‌های امگا، حفظ ثبات سه نقش بالا دشوار است و نبرده‌ای داخلی ممکن است در هر زمانی شروع شوند. رفتار اجتماعی اصلی گرگ‌های خاکستری به دست آوردن شکار متناسب با سلسله‌مراتب اجتماعی است [21,22]. سپس می‌توان برای جمع‌آوری راه‌حل‌های ترجیحی تصادفی از طریق الگوریتم فرا ابتکاری GWO با فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفت. به طور خاص، α، β، γ، ω و به ترتیب به عنوان به ترتیب جواب بهینه، جواب دوم، جواب سوم و جواب باقی مانده در نظر گرفته می‌شوند. مدل GWO عمدتا شامل سه مرحله است(۱)نزدیک شدن به هدف و رفتار اطراف؛ (۲)رفتار شکار؛ (۳)حمله به هدف و رفتار بهره‌برداری [23,24]. اول، دسته گرگ‌های خاکستری محاصره می‌شوند و مدل دیجیتالی را می‌توان به صورت معادلات (۵) تا (۷) بیان کرد:

$$W_{\alpha}=\left|c_1 x_{\alpha}-x\right|, W_{\beta}=\left|c_2 x_{\beta}-x\right|, \quad W_{\gamma}=\left|c_3 x_{\gamma}-x\right| \qquad (۵)$$

$$x_1=x_{\alpha}-A_1 W_{\alpha}, x_2=x_{\beta}-A_2 W_{\beta}, \quad x_3=x_{\gamma}-A_3 W_{\gamma} \qquad (۶a)$$

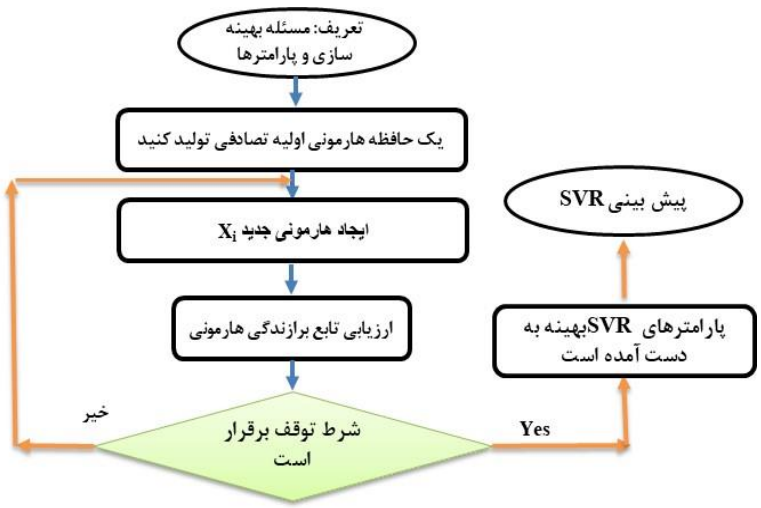
$$A=2.a.r_1-a \ , \ C=2.r_2 \qquad (۶b)$$

$$X(t+1)=\frac{x_1+x_2+x_3}{3} \qquad (۷)$$

در معادلات فوق، W_{α}، W_{β} و W_{γ} به ترتیب فاصله پاسخ مورد نظر تا پاسخ آلفا، بتا و دلتا هستند. همچنین x_{α}، x_{β} و x_{γ} موقعیت این سه پاسخ، X موقعیت پاسخ مورد نظر، t نشان دهنده عدد تکرار و A و C بردارهای ثابت هستند. در معادلات (5a)و (5b)، برداری است که مقادیر بین ۲ و صفر به صورت خطی در تکرارهای الگوریتم کاهش می‌یابد، و مقادیر بردارهای r_1 و r_2، اعدادی هستند که به صورت تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شوند. با تغییر مقادیر در تکرارهای مختلف، به طور طبیعی، مقادیر عناصر بردار نیز در هر تکرار تغییر خواهد کرد. با توجه به معادله (4b)، مقادیر بردار در بازه (2a,-2a) هستند. در معادلات بالا اگر $|A|\leq 1$، پاسخ مطلوب به موقعیت پاسخ آلفا حرکت کند، برعکس اگر $|A|\geq 1$، در این مورد، پاسخ‌های اومگا واگرا می‌شوند و به دنبال نواحی مختلف فضای پاسخ می‌گردند. مقادیر پارامتر قابل تنظیم در الگوریتم GWO در جدول (۶) و فلوچارت شکل (۲) فهرست شده‌اند.

جدول ۶ مقادیر معادله ضریب ثابت برای هر مدل برای هر ایستگاه

ایستگاه	مدل	ضرایب				معیارهای ارزیابی			
		a	b	c	d	MABE (Cal/cm^2)	RMSE (Cal/cm^2)	NRMSE	R^2
بندرعباس	Abdollah	−۱/۰۴	۲/۰۴	۰/۰۵۴	۰/۰۷	۲۸۶۰۲/۸۷	۳۰۱۰۸/۷۹	۱۴/۹۷	۰/۳۵
	Eq(2)	−۱/۳۲	۲/۰۷	۰/۴۶۰	۰/۰۷	۲۲۰۹/۱۲	۲۴۲۶/۲۲	۱/۲۱	۰/۳۱
کرمان	Abdollah	−۰/۹۹۳	۲/۰۵	۰/۰۰۴	۰/۱۶	۶۵۰/۱۵	۷۸۱/۰۳	۰/۳۷	۰/۱۶
	Eq(2)	−۰/۲۸	۱/۵۹	۰/۲۵۰	۰/۰۵	۶۰۹/۵۴	۷۳۷/۱۲	۰/۳۴	۰/۲۱
سنندج	Abdollah	۰/۰۶۵	۰/۰۲	−۰/۰۰۳	۰/۰۹۸	۶۸۳/۵۵	۶۸۳/۵۵	۰/۳۷	۰/۳۹
	Eq(2)	۰/۱۰۷	۱/۷۵	۰/۲۵۳	۰/۰۰۶	۶۴۱/۲۶	۶۴۱/۲۶	۰/۳۵	۰/۴۵
سمنان	Abdollah	۰/۲۰۸	۰/۴۱۷	−۰/۰۰۱	۰/۰۳۶	۴۲۶/۹۴	۵۴۴/۲۲	۰/۲۸	۰/۴۹
	Eq(2)	۰/۲۸۲	۰/۳۹۶	۰/۰۴۵	۰/۰۱۶	۳۹۳/۵۶	۵۱۶/۹۹	۰/۲۷	۰/۵۳
زاهدان	Abdollah	۰/۸۰	۱/۷۹	۰/۰۰۱	۰/۱۹	۶۸۳/۵۵	۳۵۲/۸۸	۰/۱۸	۰/۶۸
	Eq(2)	۰/۹۳	۱/۷۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۶۴۱/۲۶	۳۵۲/۸۶	۰/۱۸	۰/۶۸



شکل ۲ فلوچارت الگوریتم هارمونی سرچ

رگرسیون بردار پشتیبان ترکیبی با جستجوی هارمونی (SVR-HS)

قابلیت تعمیم رگرسیون بردار پشتیبان بسیار وابسته به پارامترهای یادگیری آن است. یعنی پارامتر تنظیم‌کننده، یعنی پارامتر تنظیم‌کننده و حاشیه خطا باید به درستی تنظیم شود. یافتن بهترین ترکیب از پارامترهای بیش از حد اغلب به دلیل فضای بسیار غیر خطی عملکرد مدل با توجه به این پارامترها مشکل‌ساز است. اگرچه یک روش جستجوی جامع می‌تواند برای تنظیم این پارامترهای بیش از حد مورد استفاده قرار گیرد، اما از مشکلات اصلی زمان بر بودن و عدم تضمین هم‌گرایی به راه‌حل بهینه جهانی رنج می‌برد. بنابراین، ما HS را برای انتخاب پارامتر بهینه SVR به منظور بهبود کارایی زمان اجرای فرآیند یادگیری SVR - HS اتخاذ کرده‌ایم. الگوریتم HS الگوریتمی است که اولین بار توسط جیم و همکاران در سال ۲۰۰۹ بیان شد [25]. اساسا، در فرآیند بداهه‌سازی موسیقی، هر نوازنده یادداشتی را برای یافتن بهترین هماهنگی (یعنی، در الگوریتم HS، هر نوازنده یک متغیر تصمیم را نشان می‌دهد و ارزشی را برای یافتن یک بهینه جهانی ایجاد می‌کند)، اجرا می‌کند. از آنجا که این الگوریتم می‌تواند متغیرهای پیوسته [26] و همچنین متغیرهای گسسته [27] را کنترل کند و نیازی به گرادیان‌های دیفرانسیلی نداشته باشد، الگوریتم HS با موفقیت برای طیف گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی عملی پیوسته و گسسته مانند طراحی ساختاری [28]، مسائل خوشه‌بندی [29]، مسائل برنامه‌ریزی بازی [30] و مسائل برنامه‌ریزی زمانی [31] به کار گرفته شده‌است. الگوریتم HS به مقادیر اولیه برای متغیرهای تصمیم‌گیری نیاز ندارد و از یک جستجوی تصادفی تصادفی استفاده می‌کند که براساس حافظه هارمونی، با در نظر گرفتن نرخ و نرخ تنظیم گام است. پیاده‌سازی این روش بسیار آسان است، و پارامترهای کمیبرای تنظیم وجود دارد. شکل (۳) فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای SVR با HS را نشان می‌دهد، که در زیر توضیح داده شده‌است:

گام اول: مقداردهی اولیه مساله بهینه‌سازی و پارامترهای الگوریتم، فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای SVR با HS

$$Minimize\ f(x)\ subject\ to$$
$$x_{iL} \le x_i \le x_{iU}\ (i = 1,2,...,N) \qquad (۸)$$

که در آن، x_{iU} و x_{iL} به ترتیب کران بالا و پایین برای متغیرهای تصمیم هستند. . پارامترهای الگوریتم HS نیز در این مرحله مشخص شده‌اند. آن‌ها اندازه حافظه هارمونی (HMS) یا تعداد بردارهای راه‌حل در حافظه هارمونی، نرخ تنظیم گام (PAR)، پهنای باند فاصله (bw)، حافظه هارمونی با توجه به نرخ (HMCR)، و تعداد بداهه‌سازی‌ها (K)، یا معیار توقف هستند. K برابر با تعداد کل ارزیابی‌های عملکرد است.

گام دوم: مرحله ۲ مقداردهی اولیه حافظه هارمونی: HS در حافظه هارمونی (HM) آغاز می‌شود. حافظه هارمونی یک مکان حافظه است، که در آن تمام بردارهای راه‌حل (مجموعه‌های متغیرهای تصمیم)ذخیره می‌شوند. حافظه هارمونی اولیه به طور تصادفی در ناحیه [x_{iU} ،x_{iL}] تولید می‌شود. این کار براساس معادله (۸) انجام می‌شود.

$$x_i^j = x_{iL} + rand() \times (x_{iU} - x_{iL}) \quad j = 1,2,...,HMS \qquad (۹)$$

که در آن()rand یک عدد تصادفی از توزیع یکنواخت [0,1] است.

گام سوم : بداهه نوازی هارمونی جدید: تولید یک هارمونی جدید، بداهه‌سازی نامیده می‌شود، و براساس۳ قانون است: در نظر گرفتن حافظه، تنظیم گام و انتخاب تصادفی. اول از همه، یک عدد تصادفی یکنواخت r1 در محدوده [0,1] تولید می‌شود. اگر r1 کم‌تر از HMCR باشد، متغیر تصمیم x_i^{new} با در نظر گرفتن حافظه ایجاد می‌شود؛ در غیر این صورت، x_i^{new} با یک انتخاب تصادفی به دست می‌آید. سپس، هر متغیر تصمیم‌گیری x_i^{new} در صورتی که توسط در نظر گرفتن حافظه تولید شود، تحت یک تنظیم گام با احتمال PAR قرار می‌گیرد. قانون تنظیم گام به شرح معادله (۹) است:

$$x_i^{new} = x_i^{new} \pm r \times bw \qquad (۱۰)$$

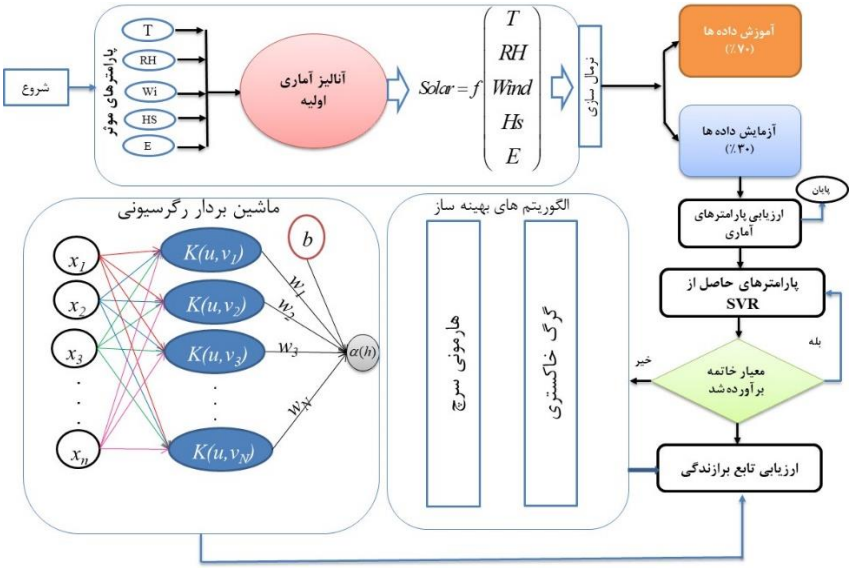
که در آن r یک عدد تصادفی یکنواخت بین ۰ و ۱ است.

گام چهارم: آموزش مدل ماشین بردار رگرسیونی و ارزیابی تابع برازندگی: برای این منظور، کل مجموعه داده به دو مجموعه داده مستقل و غیر هم پوشان مجموعه آزمایش و مجموعه آموزش به صورت دل‌خواه تقسیم می‌شود، که اولی برای روش‌های آموزش و انتخاب پارامتر بهینه به کار گرفته می‌شود، و دومینیرومندی و توانایی پیش‌بینی مدل را ارزیابی می‌کند. برای انتخاب پارامتر، یک تکنیک اعتبار سنجی عرضی K تایی همراه با HS به منظور به حداقل رساندن اثر سو پدیده بیش برازش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، برای هر مجموعه از پارامترهای ماشین بردار رگرسیونی $\{C,\sigma,\varepsilon\}$ ،i.e.، یعنی، مجموعه داده آموزشی به طور تصادفی به k زیرمجموعه گسسته با اندازه تقریبا برابر تقسیم می‌شود. سپس، زیرمجموعه‌های k-1 برای آموزش مدل با مجموعه پارامترهای انتخاب‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرند و عملکرد مدل توسط یک زیرمجموعه باقیمانده اندازه‌گیری می‌شود. این فرآیند برای k بار تکرار می‌شود به طوری که هر زیر مجموعه یک نوبت به عنوان زیر مجموعه اعتبارسنجی در نظر گرفته می‌شود، در حالی که دیگران نقش مجموعه داده آموزشی را انجام می‌دهند. در نهایت، قابلیت تعمیم کلی مدل برای هر مجموعه از پارامترها با میانگین گیری مقادیر عملکرد به‌دست‌آمده در مسیرهای k تخمین زده می‌شود.

گام پنجم: به روز ر سانی حافظه هارمونی: پس از ایجاد یک بردار هارمونی جدید x_{new}، حافظه هارمونی به روز می شود. اگر تناسب معادله (۱۰) برقرار گردد.

$$x^{new} = (x_1^{new}, x_2^{new}, ..., x_N^{new}) \qquad (۱۱)$$

گام شـــشـــم: پایان: مراحل ۳-۵ را تکرار کنید تا معیار توقف (حداکثر تعداد بداهه K) برآورده شـــود. فلوچارت الگوریتم هارمونی سرچ در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳ نمایش شماتیک یک سیستم رگرسیون بردار پشتیبان ترکیبی که با الگوریتم های بهینه ساز برای پیش تابش خورشیدی

فرآیند پردازش داده‌ها برای تخمین به چهار مرحله تقسیم می‌شود.

۱. جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های اولیه
۲. تقسیم‌بندی داده‌ها در مجموعه‌های داده آموزشی و آزمایشی
۳. ساخت مدل‌های ترکیبی SVR،
۴. اعتبارسنجی مدل‌ها

نمودار جریان روش‌های مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده است.

معیارهای ارزیابی

MABE ارائه کننده‌ی مقدار متوسطی از خطاهای بایاس مطلق کلی میان مقادیر تخمین زده شده و اندازه گیری شده است که به شکل زیر اندازه گیری می‌شود:

$$MABE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|S - S_e| \qquad (۱۲)$$

جایی که Se میزان تابش خورشیدی تخمین‌زده شده و S برابر با مقدار تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده می‌باشد. هم‌چنین n تعداد کلی مشاهدات را نشان می‌دهد. RMSE دقت مدل را با مقایسه‌ی انحراف میان اطلاعات تخمین‌زده شده و اطلاعات اندازه‌گیری‌شده شناسایی می‌کند. این همیشه مثبت است و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(s - s_e)^2} \qquad (۱۳)$$

R به عنوان مقیاس ارتباط خطی میان اطلاعات تخمین زده شده و اطلاعات اندازه گیری شده به شکل زیر به‌دست می‌آید:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_e - \bar{S_e})\times(S - \bar{S})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n}(S_e - \bar{S_e})^2\right]\times\left[\sum_{i=1}^{n}(S - \bar{S})^2\right]}} \qquad (۱۴)$$

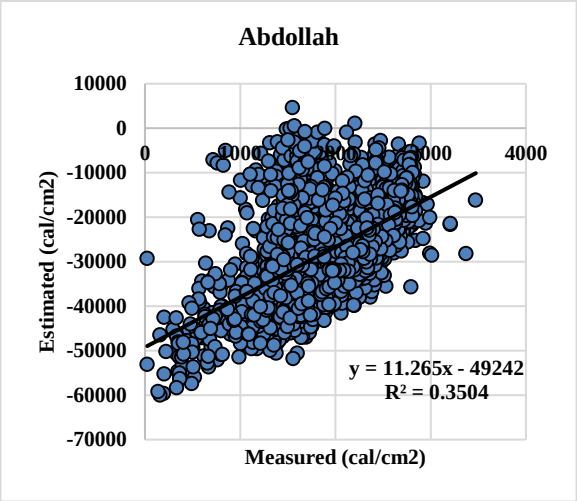
جایی که $\bar{S_e}$ و $\bar{S}$ به‌ترتیب متوسط مقادیر تخمین زده شده و مقادیر اندازه گیری شده می‌باشد.

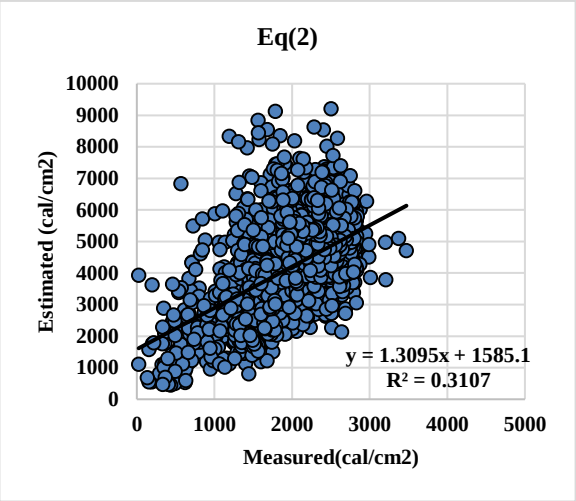
نتایج و بحث

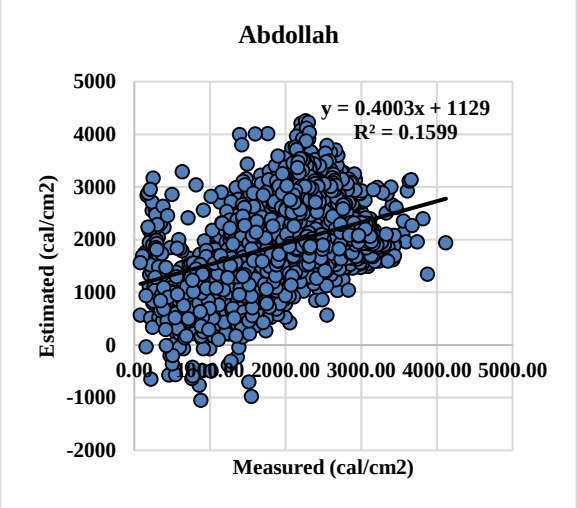
یک مدل SVR و دو مدل هیبریدی GWO-SVR و HS-SVR در این تحقیق توسعه یافته تا تابش خورشیدی روزانه را پیش‌بینی نماید. پیش بینی‌ها درباره مدل ها با معادله‌های تجربی عبدالله و معادله دوم رگرسیونی (براساس تبخیر) مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای کسب اطمینان از درستی مدل‌ها، عملکرد آنها بایستی با سایر مدل‌های موجود مقایسه شود. برای نیل به این هدف در این تحقیق، با استفاده از مجموعه اطلاعات آموزشی، تکنیک رگرسیون آماری معمول مورد استفاده قرار گرفت.

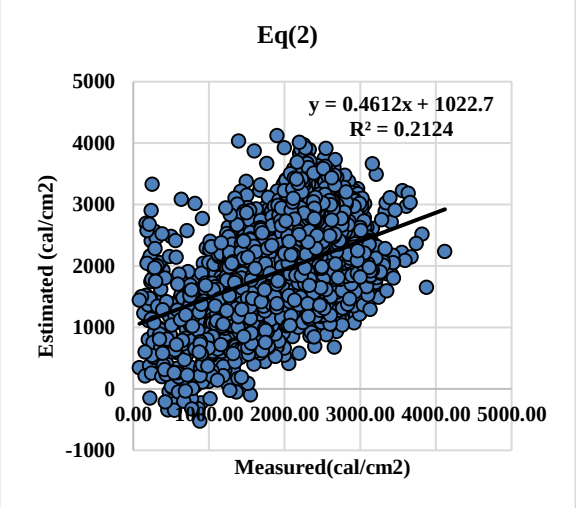
مقادیر معادله ضریب ثابت برای هر مدل به‌طور جداگانه محاسبه و در جدول (۶) نشان داده شده است. جدول (۶) ارائه کننده‌ی آمار توصیفی ضرایب معادله عبدالله و معادله (۲) رگرسیونی برای محدوده‌ی تابش خورشیدی روزانه‌ی اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده برای مرحله‌ی آزمایش در ایستگاه‌های مختلف است. چنان‌که مشاهده می شود بیشترین دقت این معادلات در ایستگاه زاهدان می‌باشد. هم‌چنین معادله دوم، نتایج با دقت بهتری برای تمام ایستگاه ها ارائه می‌کند و این نشان دهنده اثردهی بهتر تبخیر در معادله می‌باشد. هم‌چنین در بیشتر ایستگاه‌ها با توجه به تاثیر میزان رطوبت نسبی در معادله عبدالله باعث اثر منفی در برآورد تابش خورشیدی شده است. این شرایط به‌ویژه برای ایستگاه بندرعباس به‌وضوح قابل مشاهده است (شکل۴).

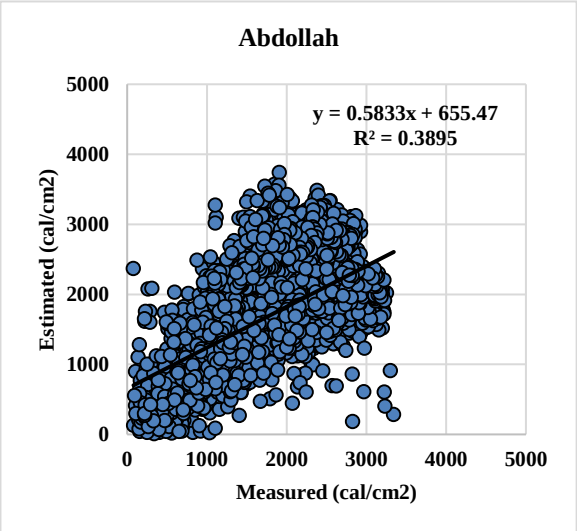
نتایج آنالیز آماری مقایسه بین روش‌های هوش مصنوعی و داده های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مختلف در جدول (۷) و شکل (۵) آورده شده است. برای ارائه‌ی نتیجه‌گیری کامل، دقیق بودن مدل های SVR ، SVR-GWO و SVR-HS با سه نشانه‌ی آماری مشخص برای خطای مطلق متوسط (MABE)، خطای مجذور متوسط ریشه (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۷) نشان دهنده‌ی پارامترهای آماری بدست آمده با تمامی مدل‌ها برای مجموعه داده‌های آزمایشی است. MABE و RMSE کمتر نشان دهنده‌ی درستی بیشتر پیش-بینی‌ها است. در حالی که مقادیر بیشتر R^2 نشان دهنده‌ی ارتباط خطی گسترده‌تری میان مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. بنابراین مقدار آن در حدود ۱- یا ۱+ نشان دهنده‌ی ارتباط خطی عالی است. دز این تحقیق، از نظر مقایسه آماری بین مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف، بهترین عملکرد را مدل‌های هیبریدی یعنی SVR-GWO و SVR-HS داشته و از بین این دو مدل نیز مدل SVR-HS بهتر می‌باشد (جدول ۷ و شکل ۵).

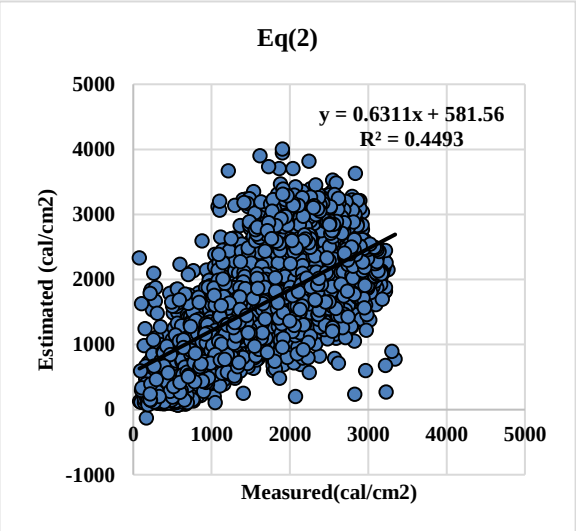

Abdollah
Estimated (cal/cm2)
Measured (cal/cm2)
y = 11.265x - 49242
R² = 0.3504

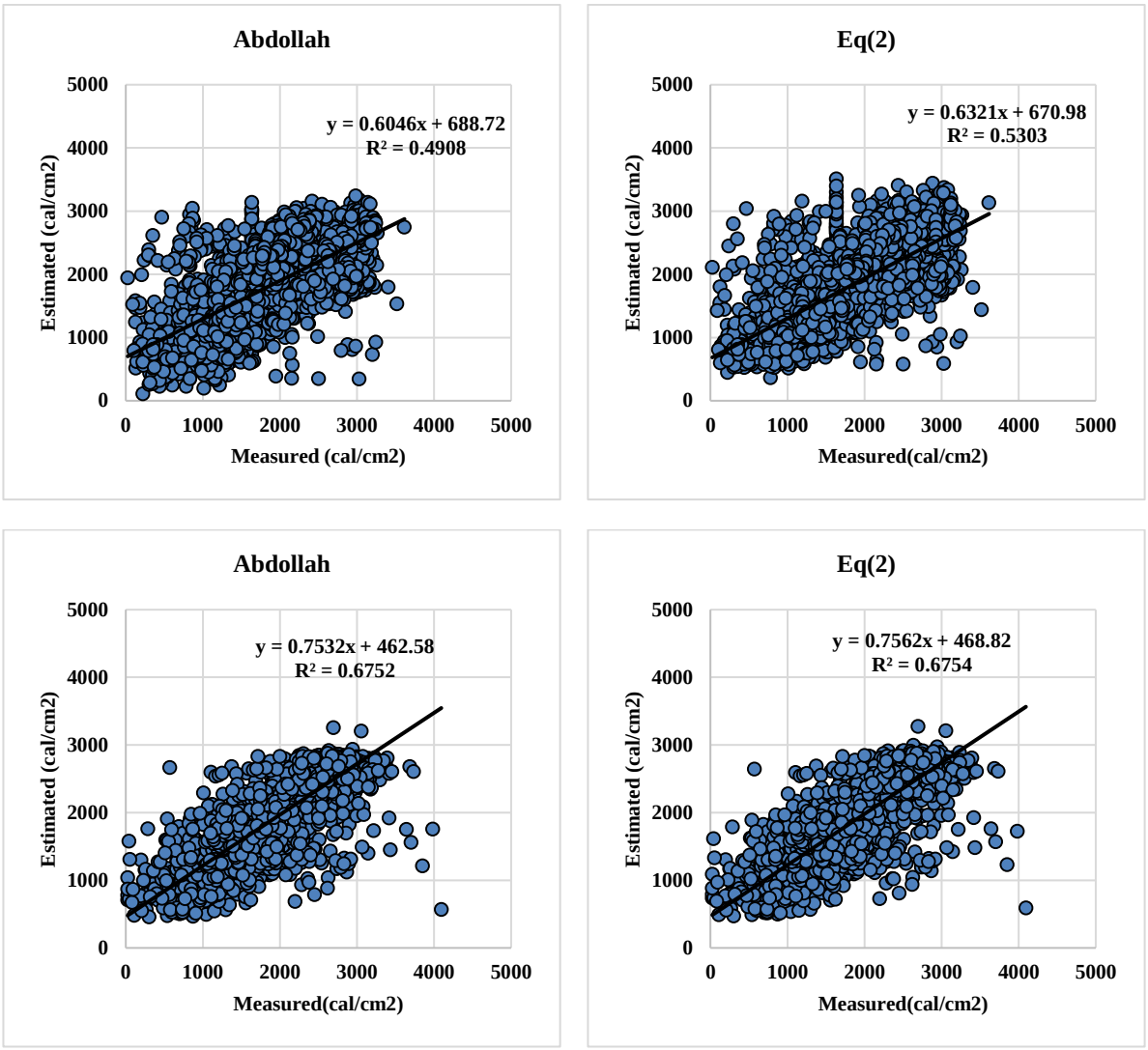

Eq(2)
Estimated (cal/cm2)
Measured(cal/cm2)
y = 1.3095x + 1585.1
R² = 0.3107


Abdollah
Estimated (cal/cm2)
Measured (cal/cm2)
y = 0.4003x + 1129
R² = 0.1599


Eq(2)
Estimated (cal/cm2)
Measured(cal/cm2)
y = 0.4612x + 1022.7
R² = 0.2124


Abdollah
Estimated (cal/cm2)
Measured (cal/cm2)
y = 0.5833x + 655.47
R² = 0.3895

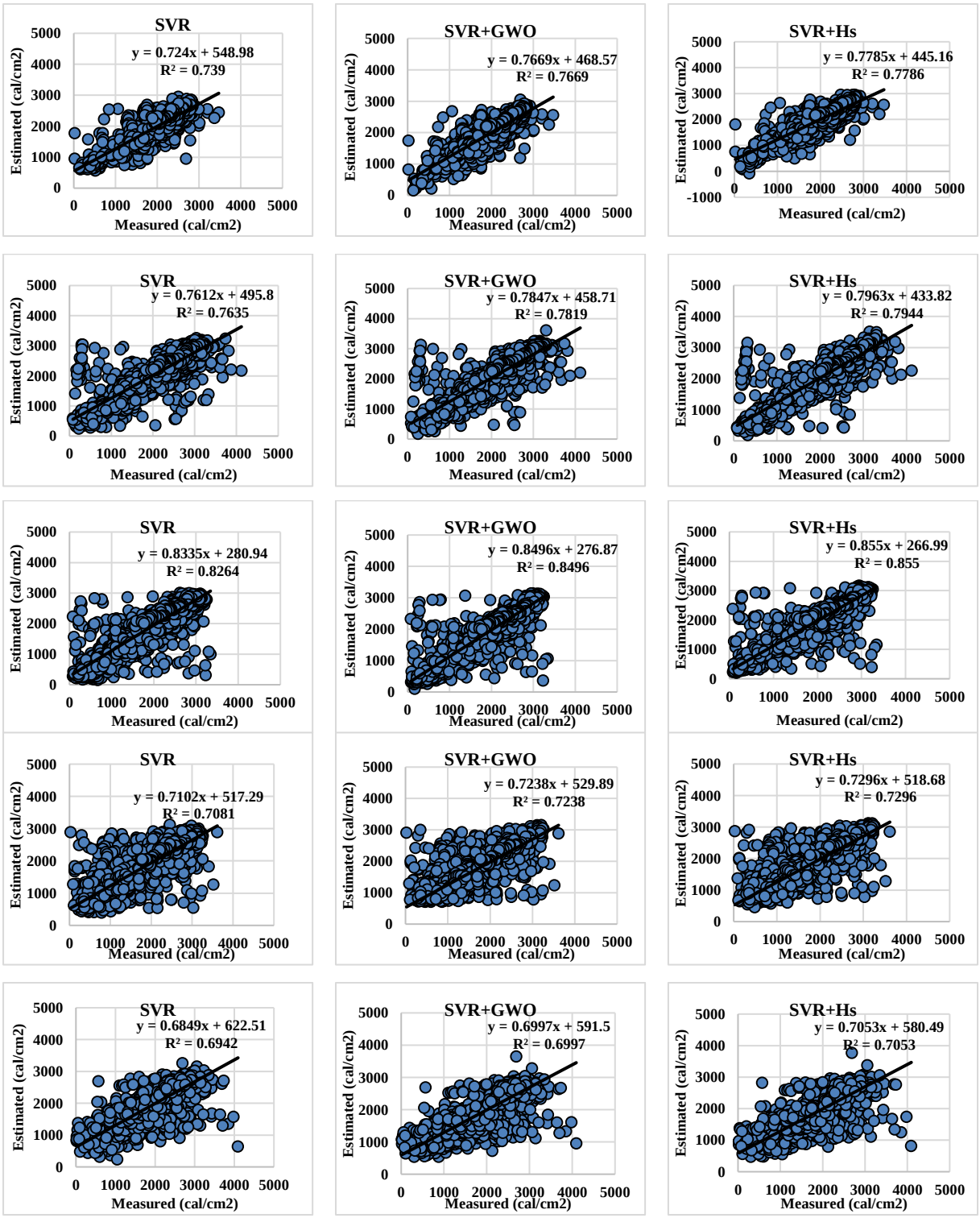

Eq(2)
Estimated (cal/cm2)
Measured(cal/cm2)
y = 0.6311x + 581.56
R² = 0.4493



شکل ۴ مقایسه نتایج معادلات عبدالله و دوم رگرسیونی، برآورد شده در ایستگاه‌های بندرعباس، کرمان، سنندج، سمنان و زاهدان

جدول ۷ نتایج آنالیز آماری مقایسه بین روش‌های هوش مصنوعی و داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مختلف

ایستگاه	مدل	Input Parameters	MABE (Cal/cm^2)	RMSE (Cal/cm^2)	NRMSE	R^2
بندرعباس	SVR	T, RH, hs, E, Wind	۱۹۹/۰۸	۲۶۰/۶۴	۰/۱۳	۰/۷۴
	SVR-GWO	T, RH, hs, E, Wind	۱۸۴/۸۴	۲۴۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۷۷
	SVR-HS	T, RH, hs, E, Wind	۱۷۷/۱۱	۲۳۹/۸۶	۰/۱۲	۰/۷۸
کرمان	SVR	T, RH, hs, E, Wind	۲۱۸/۵۳	۳۳۹/۹۴	۰/۱۶	۰/۷۷
	SVR-GWO	T, RH, hs, E, Wind	۲۰۷/۴۸	۳۲۶/۱۶	۰/۱۵	۰/۷۸
	SVR-HS	T, RH, hs, E, Wind	۱۹۵/۶۷	۳۱۶/۶۲	۰/۱۵	۰/۸۰
سنندج	SVR	T, RH, hs, E, Wind	۳۳۵/۲۸	۳۳۵/۲۸	۰/۱۸	۰/۸۳
	SVR-GWO	T, RH, hs, E, Wind	۳۱۱/۰۳	۳۱۱/۰۳	۰/۱۷	۰/۸۵
	SVR-HS	T, RH, hs, E, Wind	۳۰۵/۴۳	۳۰۵/۴۳	۰/۱۷	۰/۸۶
سمنان	SVR	T, RH, hs, E, Wind	۲۸۷/۰۲	۴۰۰/۳۰	۰/۲۱	۰/۷۱
	SVR-GWO	T, RH, hs, E, Wind	۲۶۶/۱۵	۳۸۷/۵۸	۰/۲۰	۰/۷۲
	SVR-HS	T, RH, hs, E, Wind	۲۶۲/۶۳	۳۸۳/۴۶	۰/۲۰	۰/۷۳
زاهدان	SVR	T, RH, hs, E, Wind	۲۳۴/۸۳	۳۳۷/۰۸	۰/۱۷	۰/۶۹
	SVR-GWO	T, RH, hs, E, Wind	۲۳۱/۲۴	۳۳۳/۹۸	۰/۱۷	۰/۷۰
	SVR-HS	T, RH, hs, E, Wind	۲۲۸/۷۷	۳۳۰/۸۶	۰/۱۷	۰/۷۱



شکل ۵ مقایسه نتایج مدل های هوش مصنوعی با مقادیر اندازه‌گیری شده تابش روزانه در ایستگاه‌های بندرعباس، کرمان، سنندج، سمنان و زاهدان به ترتیب از بالا به پایین

نتیجه‌گیری نهایی

اطلاعات تابش خورشیدی به‌صورت دقیق به‌عنوان داده ورودی مورد نیاز در پروژه‌های مرتبط به انرژی خورشیدی، دارای اهمیت حیاتی می‌باشد. در این تحقیق، روش‌های هیبریدی SVR-GWO و SVR-HS برای تخمین تابش خورشیدی روزانه در ایستگاه های بندرعباس، کرمان، سنندج، سمنان و زاهدان توسعه یافته

است. به عنوان مطالعه‌ای موردی، مجموعه‌های اطلاعات تابشی خورشیدی مربوط به ایستگاه‌های مورد نظر که در مناطق آفتابی ایران واقع شده، مورد استفاده قرار گرفته است. برای مقایسه این مدل‌ها از دو معادله رگرسیونی عبدالله و معادله دوم، استفاده شده است. ورودی‌های مدل‌ها، درجه حرارت متوسط، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و تبخیر روزانه می‌باشد. بر اساس ارزیابی آماری انجام شده با استفاده از عمده‌ی پارامترهای تطبیق داده شده‌ی MABE، RMSE و R، نتایج، قابلیت مطلوب مدل توسعه یافته‌ی SVR-HS را برای تخمین زدن تابش خورشیدی به صورت روزانه اثبات می‌کند. در حقیقت، مدل SVR-HS برتری مطلقی را نسبت به سایر مدل‌ها به‌خصوص مدل‌های تجربی نشان می‌دهد به طوری که عملکرد مدل SVR-HS حدود دو برابر بیشتر از مدل تجربی می‌باشد. یافته‌ی دیگر این تحقیق نشان می‌دهد که در نظر گرفتن شاخص صاف بودن (n/N) به عنوان تنها درون داده برای مدل‌های تجربی کافی نیست. بنابراین درستی بیشتر پیش‌بینی‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای درون داده‌ی مرتبط‌تر اثبات می‌شود. همچنین نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که SVR-HS روش کارآمدی برای تخمین تابش خورشیدی باشد. بررسی‌های بیشتر می‌تواند به صورت خاص برای ارزیابی دقیق مدل SVR-HS در تخمین تابش خورشیدی با استفاده از سایر پارامترهای مهم شامل ساعات تابش آفتاب نسبی انجام شود. علاوه‌بر این شهرهای بیشتری با شرایط اقلیمی متفاوت نیز بایستی در بررسی‌های آینده مورد توجه قرار گیرند. یکی از کاربردهای استفاده از مدل های تجربی و هوش مصنوعی طراحی و برآورد عملکرد سیستم‌های انرژی خورشیدی می‌باشد.

واژه نامه

ML	مولتی لایر
MLFFNN	شبکه عصبی پیش خور
RBFNN	شبکه عصبی تابع پایه شعاعی
SVR	ماشین بردار رگرسیونی
ANFIS	سیستم استنتاج عصبی–فازی تطبیقی
ANN	شبکه عصبی
NARX	خود رگرسیون عصبی
RFs	جنگل تصادفی
FFA	کرم شب تاب
GWO	گرگ خاکستری
HS	جستجوی هارمونی

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] Almorox, J., Bocco M., and Willington E., "Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina", *Renewable Energy*, 60: pp. 382-387, (2013).

[2] Okundamiya, M.S., Emagbetere J.O. and Ogujor E.A., "Evaluation of various global solar radiation models for Nigeria", *International Journal of Green Energy*, 13(5): pp. 505-512, (2016).

[3] W. Tang, K. Yang, J. He and J. Qin, "Quality control and estimation of global solar radiation in China", *Solar Energy*, 84(3): pp. 466-475, (2010).

[4] Z. Şen, and A.D. Şahİn, "Spatial interpolation and estimation of solar irradiation by cumulative semivariograms", *Solar Energy*, 71(1): pp. 11-21, (2001).

[5] J. Piri and O. Kisi, "Modelling solar radiation reached to the Earth using ANFIS, NN-ARX, and empirical models (Case studies: Zahedan and Bojnurd stations)", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 123: pp. 39-47, (2015).

[6] S.R.S. Aldhshan, K.N. Abdul Maulud, W.S.W. Mohd Jaafar, O.A. Karim and B. Pradhan , "Energy consumption and spatial assessment of renewable energy penetration and building energy efficiency in Malaysia": *A review*. *Sustainability*, 13(16): pp. 9244, (2021).

[7] Y. Kashyap, A. Bansal and A.K. Sao, "Solar radiation forecasting with multiple parameters neural networks", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: pp. 825-835, (2015).

[8] H. Khorasanizadeh and K. Mohammadi, "Diffuse solar radiation on a horizontal surface: Reviewing and categorizing the empirical models", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: pp. 338-362, (2016).

[9] N.S. Chukwujindu, "A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa", *Renewable and sustainable energy reviews*, 78: pp. 955-995, (2017).

[10] A. Khosravi, R.N.N. Koury, L. Machado and J.J.G. Pabon, "Prediction of hourly solar radiation in Abu Musa Island using machine learning algorithms", *Journal of Cleaner Production*, 176: pp.63-75, (2018).

[11] H. Loutfi, A. Bernatchou and R. Tadili, "Generation of horizontal hourly global solar radiation from exogenous variables using an artificial neural network in Fes (Morocco)", *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(7), pp. 1097-1107, (2017).

[12] I.A. Ibrahim and T. Khatib, "A novel hybrid model for hourly global solar radiation prediction using random forests technique and firefly algorithm", *Energy Conversion and Management*, 138: pp. 413-425, (2017).

[13] S. Belaid, A. Mellit, H. Boualit and M. Zayani , "Hourly global solar forecasting models based on a supervised machine learning algorithm and time series principle", *International Journal of Ambient Energy*, 43(1): pp. 1707-1718, (2022).

[14] R. Urraca, J. Antonanzas, M. Alia-Martinez, F.J. Martinez-de-Pison and F. Antonanzas-Torres, "Smart baseline models for solar irradiation forecasting", *Energy Conversion and Management*, 108: pp. 539-548, (2016).

[15] C. Voyant, G. Notton, S. Kalogirou , M-L. Nivet, C. Paoli, F. Motte and A. Fouilloy, "Machine learning methods for solar radiation forecasting", *A review*. *Renewable Energy*, 105: pp. 569-582, (2017).

[16] Y.A. Abdalla, "New correlations of global solar radiation with meteorological parameters for Bahrain", International Journal of Solar Energy, 16(2): pp. 111-120, (1994)

[17] K.Y. Bae, H.S. Jang and D.K. Sung, "Hourly solar irradiance prediction based on support vector machine and its error analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2): pp. 935-945, (2016).

[18] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey wolf optimizer", *Advances in Engineering Software*, 69: pp. 46-61, (2014).

[19] M.H. Sulaiman, Z. Mustaffa, M.R. Mohamed and O. Aliman, "Using the gray wolf optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem", *Applied Soft Computing*, 32: p. 286-292, (2015).

[20] M. Pradhan, P.K. Roy and T. Pal, "Oppositional based grey wolf optimization algorithm for economic dispatch problem of power system", *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4): pp. 2015-2025, (2018).

[21] H. Moayedi, A.Osouli, D.T.Bui and L.K. Foong, "Spatial landslide susceptibility assessment based on novel neural-metaheuristic geographic information system based ensembles", *Sensors*, 19(21): pp. 4698, (2019).

[22] M. Dehghani, H. Riahi-Madvar, F. Hooshyaripor. A. Mosavi, S. Shamshirband, E.K. Zavadskas and K-W Chau, "Prediction of hydropower generation using grey wolf optimization adaptive neuro-fuzzy inference system", *Energies*, 12(2): pp. 289, (2019).

[23] S. Zhang and Y. Zhou, "Template matching using grey wolf optimizer with lateral inhibition", *Optik*, 130: pp. 1229-1243, (2017).

[24] C. Muro, R. Escobedo,L. Spector and R.P. Coppinger,."Wolf-pack (Canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations", *Behavioural Processes*, 88(3): pp. 192-197, (2011).

[25] Z.W. Geem, Music-inspired harmony search algorithm: theory and applications, Vol. 191. Springer, 2009.

[26] K.S. Lee and Z.W. Geem, "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194(36-38): pp. 3902-3933, (2005).

[27] Z.W. Geem, "Novel derivative of harmony search algorithm for discrete design variables Environmental Planning and Management Program", *Applied Mathematics and Computation*, 199(1): pp. 223-230, (2008).

[28] Z.W. Geem, C.-L. Tseng, and Y. Park "Harmony search for generalized orienteering problem: best touring in China", *in International Conference on Natural Computation*, Springer, (2005).

[29] O.M. Alia, M.A. Al-Betar, R. Mandava and A.T. Khader, "Data clustering using harmony search algorithm", *in International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*, Springer, (2011).

[30] Z.W. Geem, , "Harmony search for multiple dam scheduling, in Encyclopedia of artificial intelligence", *IGI Global*, pp. 803-807, (2009).

[31] M.A. Al-Betar and A.T. Khader, "A harmony search algorithm for university course timetabling", *Annals of Operations Research*, 194(1): pp. 3-31, (2012).

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 2, 2023. (55-76)

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 Comparison of Shell Side Thermo-Hydraulic Characteristics for Shell and Tube Heat Exchangers with Trefoil and Segmental Baffle by Genetic Algorithm

Research Article

Hadi Eskandar[1], SeyyedIman Hashemi[2] .

DOI: 10.22067/JACSM.2023.75777.1105

1. Introduction

Shell and tube heat exchangers are among the most widely used types of heat exchangers. They can be used in industrial processes, oil and gas industries, conventional and nuclear power plants as condensers, steam generators, pressurized water reactors, and feed water heaters. They have many other uses including alternative energy such as the ocean, geothermal, as well as air conditioning and refrigeration systems. The plates holding tube bundles in the shell side of the shell and tube heat exchangers have two important functions. The most important thing one is supporting the tubes for structural strength, preventing vibration and sagging of the tubes, and determining the flow pattern among the tube bundle to increase the convection heat transfer coefficient. Trefoil Perforated Plate (Figure 1) is a type of baffle with a circular orifice that directs the flow longitudinally in the shell. Shell-and-tube heat exchangers with Trefoil Perforated Plate have exceptional computational and fundamental anti-vibration properties and represent the challenges of erosion and advanced requirements for safe operation and performance. In this research, the thermal and hydraulic properties of the shell side of the shell and tube heat exchanger with segmental baffle and trefoil baffle are studied. Through the genetic algorithm, the functions of heat transfer and pressure drop of the plates are optimized in a single-objective and multi-objective manner for the square and triangular arrangement of the tubes and the optimized parameters of the trefoil and the segmental baffle are measured together. Three-dimensional simulation of shell and tube heat exchanger with trefoil and segmental baffle is done by CFD to compare the behavior and flow pattern of both baffles on the shell side.

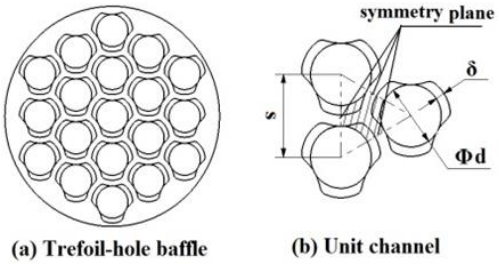


Figure 1. Trefoil Perforated Plate in triangular arrangement

2. Implementation of genetic algorithm

The guiding equations for implementing the genetic algorithm for the trefoil perforated plate are:

$$N_u = 0.42457 Re^{0.78172} \left(\frac{\delta}{d_e}\right)^{-0.16.35} \left(\frac{B}{d_e}\right)^{-0.14487} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho u^2} = 9.0713 Re^{-0.1887} \left(\frac{\delta}{d_e}\right)^{-1.92116} \left(\frac{B}{d_e}\right)^{-0,85157} \quad (2)$$

The guiding equations for the implementation of the genetic algorithm for the segmental baffle are:

$$NU = 0.36 \left(\frac{d_e G_s}{\mu}\right)^{0.55} \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (3)$$

$$\Delta P = \frac{f G_s^2 (N_b + 1) D_s}{2 \rho d_e \phi_s} \quad (4)$$

3. Simulation of shell and tube heat exchanger using CFD

The standard model of turbulence (k-ε), which is a semi-empirical model based on transient equation models for the kinetic energy of turbulence (k) and the amount of loss (ε), was used. It is a class of turbulence models commonly used in practical engineering flow calculations such as turbulent flows on the shell side of heat exchangers. The simulation method was pressure-velocity coupling method based on SIMPLE algorithm, and the discrete momentum and energy equations were based on the second-order upwind difference scheme.

4. Results of the genetic algorithm

The highest value of convection heat transfer coefficient for trefoil baffle in square arrangement is 5482.332 (w/m²k) and for triangle arrangement is 7519.513 (w/m²k). These values for the segmental baffle are 4570.745 (w/m²k) and 6468.366 (w/m²k).

For the lowest pressure drop for trefoil baffles, the diameter of the tubes, the height of the hole, the distance

*Manuscript received: March 11, 2022. Revised January 22, 2023, Accepted, February 5, 2023.

[1] Corresponding author. Associate Professor, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran, **Email**: eskandari@put.ac.ir

[2] M.Sc. Arvandan Oil and Gas Company.

between the baffles, and the Reynolds number are 0.02 m, 0.003 m, 0.25 m, and 5000, respectively. PARETO FRONT charts for trefoil and segmental baffles in square and triangle arrangement of tube bundles were obtained from multi-objective optimization, which plots heat transfer capacities against corresponding pressure drop (Figure 2).

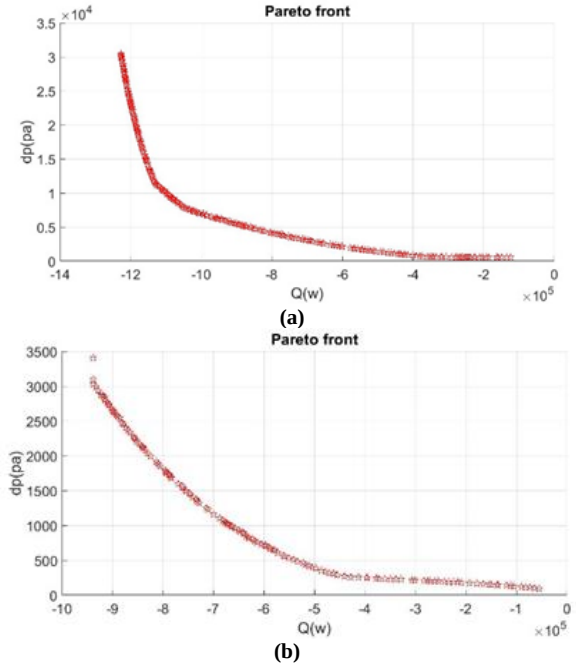


Figure 2. Diagram (Pareto front) with a combined approach for square arrangement of trefoil (a) and segmental baffle (b)

5. Results of CFD simulation

The flow pattern on the shell side of the heat exchanger with trefoil baffle is longitudinal, without obvious dead areas (Figure 3), while in the segmental baffle there are too many dead zones, vortices and backflows caused by the zigzag flow on the shell side, which leads to reduced velocity, inefficient use of the heat transfer area, and worse heat transfer (Figure 4).

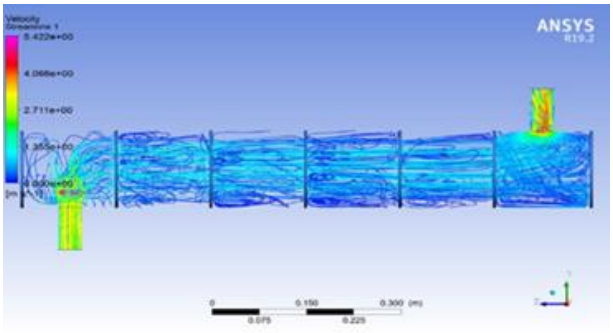


Figure 3. Flow pattern on the shell side of heat exchanger with trefoil baffle

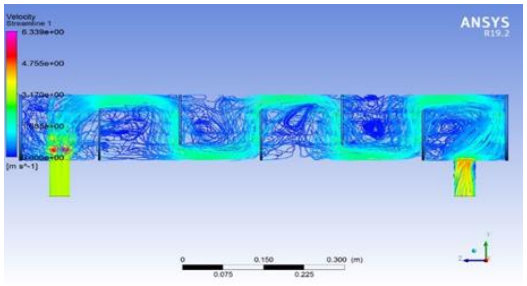


Figure 4. Flow pattern on the shell side of heat exchanger with segmental baffle

6. Comparison of heat transfer capacity and pressure drop of baffles

Figure 5 shows the comparison of the heat transfer capacity and pressure drop in square arrangement state for trefoil and segmental baffles. As the Reynolds number increases, the difference in heat transfer capacity and pressure drop for the trefoil baffle increases compared to the segmental baffle.

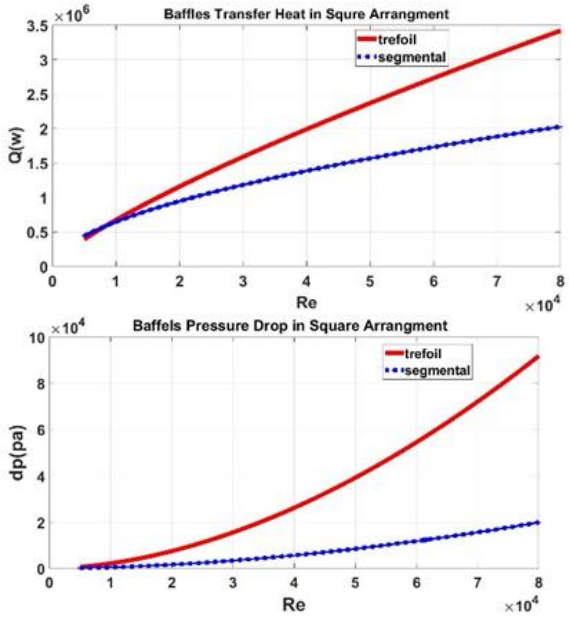


Figure 5. Comparison of heat transfer capacity and pressure drop of baffles in square arrangement

7. Conclusion

The heat transfer capacity in the maximum state obtained from the single-objective genetic algorithm of the trefoil baffle with a square arrangement is 19.944% more than that of the segmental baffle, and this value reaches 16.25% for the triangle arrangement. Moreover, the pressure drop increased 3.2 times for the square arrangement and 2.075 times for the triangle arrangement compared to the segmental baffle. The convection heat transfer coefficient of the triangular mode compared to the square mode increased by 37% for the trefoil baffle and this figure was obtained for the segmental baffle by 41.5%. The jet flows created in the trefoil pores increase the heat transfer performance and the corrosion products and chemical deposits are reduced, which also improves the corrosion conditions.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک،۳۵، ۱۴۰۲. (۷۶-۵۵)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

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

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

مقایسهٔ عددی مشخصه‌های ترمو هیدرولیک سمت پوستهٔ مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله با بفل تری‌فویل و بفل قطاعی به وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک

مقاله پژوهشی

هادی اسکندری[۱] ایمان هاشمی[۲]

DOI: 10.22067/JACSM.2023.75777.1105

چکیده *در این مقاله به مطالعهٔ تاثیر استفاده از بفل‌های تری‌فویل و قطاعی بر انتقال حرارت و افت فشار سمت پوستهٔ مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله پرداخته می‌شود. بفل‌ها در پوسته مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله برای افزایش ضریب انتقال حرارت، تکیه‌گاه لوله‌ها، تعیین الگوی جریان، استحکام ساختاری و جلوگیری از ارتعاش، به کار می‌روند. با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شرایط یکسان، تابع‌های انتقال حرارت و افت فشار بفل‌ها به‌صورت تک هدفه و چند هدفه بهینه‌سازی می‌شوند. مبدل حرارتی با بفل تری‌فویل به وسیلهٔ نرم افزار انسیس فلوئنت شبیه‌سازی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که بفل تری‌فویل ضریب انتقال حرارت را با افت فشار بیشتری، افزایش می‌دهد. ظرفیت انتقال حرارت بفل تری‌فویل نسبت به بفل قطاعی در وضعیت بیشینهٔ حاصل شده از الگوریتم ژنتیک تک هدفه در آرایش مربع ۱۹,۹۴۴٪ و برای آرایش مثلث ۱۶,۲۵٪ بیشتر شده است، این در حالی است که افت فشار برای چیدمان مربع دستهٔ لوله‌ها ۳,۲ برابر و برای چیدمان مثلث دستهٔ لوله‌ها ۲,۰۷۵ برابر نسبت به بفل قطاعی بیشتر شده است.جریان‌های جت ایجاد شده در منفذهای تری‌فویل عملکرد انتقال حرارت مبدل حرارتی را افزایش می‌دهد و محصولات خوردگی و رسوبات شیمیایی دستهٔ لوله‌ها را کاهش می‌دهد و باعث بهبود شرایط خوردگی مبدل حرارتی پوسته-لوله با بفل منفذدار تری‌فویل شده است.*

واژه‌های کلیدی بفل تری‌فویل، بفل قطاعی، مبدل حرارتی پوسته-لوله، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی سه بعدی.

Numerical Comparison of Shell Side Thermo-Hydraulic Characteristics for Shell and Tube Heat Exchangers with Trefoil and Segmental Baffle by Genetic Algorithm

Hadi Eskandari Iman Hashemi

Abstract: *In this paper, the effect of using trefoil and segmental baffles on heat transfer and pressure drop towards the shell of shell and tube heat exchangers is studied. Baffles are used in shell and tube heat exchangers to increase heat transfer coefficient, pipe support, flow pattern determination, structural strength and vibration prevention. Using the genetic algorithm under the same conditions, the heat transfer and pressure drop functions of the baffles are optimized as single-objective and multi-objective. The heat exchanger with the trefoil baffles is simulated by Aansys fluent software. The results show that in trefoil baffles, increasing the heat transfer coefficient will be accompanied by a greater pressure drop. The heat transfer capacity of the trefoil baffle has increased by 19.944% in the square arrangement and 16.25% in the triangle arrangement compared to the segmental baffle in the maximum state obtained from the single-objective genetic algorithm, while the pressure drop for the square arrangement of the tube bundle is 3.2 times and for the triangle arrangement tube bundle has increased 2.075 times compared to the segmental baffle. The jet fluid flow created in the trefoil perforated increase the heat transfer performance and the corrosion products and chemical sediments are reduced, which also improves the corrosion conditions of the shell and tube heat exchanger with the trefoil perforated plate.*

Key Words: Trefoil baffle, Segmental Baffle, Shell and Tube Heat Exchanger, Thermo-hydraulic, Genetic Algorithm, Optimization, 3D simulation.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ و تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۶ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران.

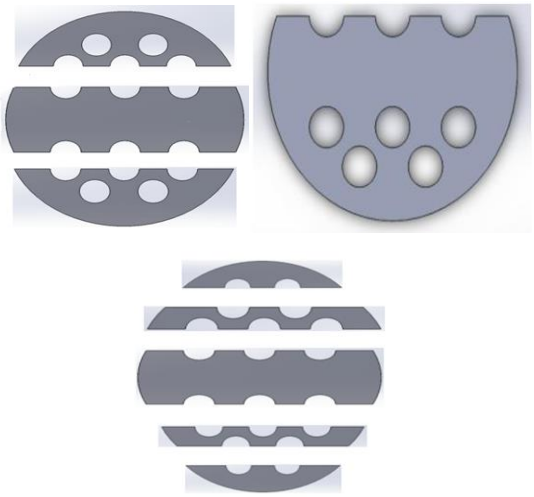
Email: eskandari@put.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد شرکت نفت و گاز اروندان منطقه آزاد اروند ایران.

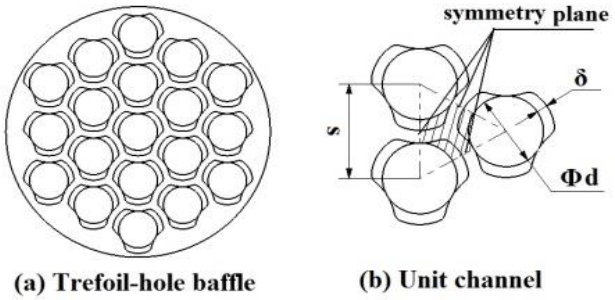
مقدمه

مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله از انواع پر کاربرد در میان انواع مبدل‌های حرارتی هستند. آن‌ها قابل استفاده در فرایندهای صنعتی، صنایع نفت و گاز، نیروگاه‌های مرسوم و هسته‌ای به عنوان چگالنده، ژنراتور بخار، رآکتور آب تحت فشار نیروگاه‌ها و گرمکن‌های آب تغذیه هستند. از آن‌ها در مصارف بسیار دیگری مثل انرژی‌های جایگزین همچون اقیانوس، زمین گرمایی و نیز تهویهٔ مطبوع و سیستم‌های برودتی استفاده می‌شود. مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله می‌توانند برای فشارهای بالا نسبت به محیط و فشارهای بالا در میان مسیرهای جریان، طراحی شوند. بفل‌ها اجزایی از مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله هستند که دو وظیفهٔ حیاتی بر عهده دارند، از همه مهمتر تکیه‌گاه دستهٔ لوله‌ها برای استحکام ساختاری، جلوگیری از ارتعاش و افتادگی لوله‌ها و دیگری، جابه‌جایی جریان در میان دستهٔ لوله‌ها برای بالا بردن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است.

بفل قطاعی یکی از نوع‌های متداول بفل هستند و به‌صورت یگانه، دوگانه و سه‌گانه وجود دارند شکل (۱). آنها جریان را به طور موثر از طریق لوله‌ها هدایت می‌کنند. فاصلهٔ دقیق بین بفل‌ها بین ۰,۴ تا ۰,۶ قطر پوسته و برش بفل ۲۵٪ تا ۳۵٪ معمولا پیشنهاد می‌گردد [1]. بفل منفذدار تری‌فویل یک نوع از بفل صفحه‌ای ارفیس مدور است که جریان را به‌صورت طولی در پوسته هدایت می‌کند. مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله با بفل منفذدار تری‌فویل دارای مزایای استثنایی در مهندسی هسته‌ای و توانایی اساسی در ضد لرزش و ارتعاش دارد و چالش طاقت فرسایی و نیازهای پیشرفته برای عملکرد و بهره برداری ایمن را برآورده می‌نماید شکل (۲).



شکل ۱ بفل قطاعی منفذدار



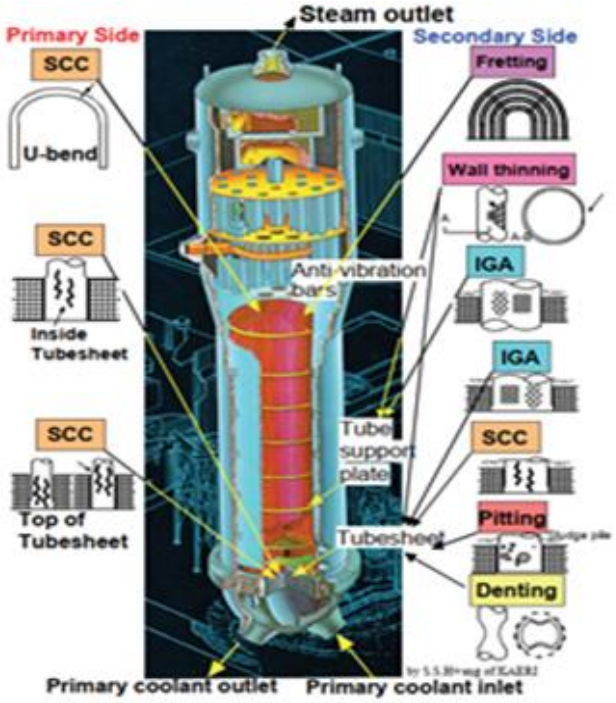
شکل ۲ بفل منفذدار تری‌فویل با آرایش مثلث

بیشینهٔ تحقیق

کوتین و همکاران [2]، در مقالهٔ خود یک رویکرد نظری درگیر در محاسبهٔ عملکرد ترموهیدرولیک مبدل حرارتی پوسته لوله به وسیلهٔ دو روش کالبرن و بل دلاور ارائه نمودند. دمای آب در سمت گرم ۵۰ درجه سانتیگراد، ۷۰ درجه سانتیگراد و ۹۰ درجه سانتیگراد متغیر بوده و سیال سرد در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد تنظیم می‌شد. نمودارهایی از پارامترهای عملکرد، مانند بار حرارتی، ضریب انتقال حرارت سمت پوسته و اثربخشی توسط هر دو رویکرد مورد بحث قرار دادند. از نتایج استنباط نمودند که روش بل دلاور برای محاسبه در سناریوهای عملی قابل اعتمادتر است زیرا زیان‌هایی که ممکن است رخ دهد در نظر گرفته می‌شود. یانگ و همکاران [3]، در کار خود به مطالعهٔ ژنراتورهای بخار (SGs) که مبدل‌های حرارتی حیاتی هستند و دو طرف اولیه و ثانویه را در سیستم‌های نیروگاهی به هم متصل می‌کنند، پرداختند. آن‌ها (SGs) نقش کلیدی در اتصال حلقه‌های اولیه و ثانویه در راکتورهای آب تحت فشار (PWR) نیروگاه‌های هسته‌ای ایفا می‌کنند. جریان داخلی و رفتارهای انتقال حرارت (SG) را با استفاده از مدل تغییر فاز حرارتی CFX شبیه‌سازی نمودند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌داد که میانگین کیفیت بخار خروجی (۰,۲۶) و دمای خروجی مایع خنک کننده ۵۵۴,۲۸ کلوین بود که با مقدارهای طراحی مطابقت داشت. توزیع سرعت سیال در ناحیه U - bend به غیر یکنواخت تبدیل می‌شد. نسبت لغزش سمت ثانویه ابتدا افزایش و سپس به تدریج در امتداد محوری کاهش می‌یافت. جدی ترین آسیب ارتعاش ناشی از جریان (FIV) در زوایای ۶۰ درجه در پایهٔ سرد و ۱۱۰درجه در پایهٔ داغ با توجه به چگالی و سرعت سیال سمت ثانویه در ناحیهٔ (U - bend)، نتیجه شده بود. گومز – کاستارو و همکاران [4]، در

مقالهٔ خود چهار مطالعهٔ موردی برای بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله در نظر گرفتند. برای هر مطالعه موردی استفاده از روش کرن و بل – دلاور با قطرهای مجزا و پیوستهٔ لوله‌ها لحاظ کردند. در مجموع ۱۶ مسئله بهینه‌سازی (چهار مسئله بهینه‌سازی در هر مطالعه موردی) که در آن تابع هدف کل، هزینه سالانه تجهیزات بود، نتیجه می‌شد. از هفت الگوریتم فراابتکاری برای حل هر مسئله بهینه‌سازی استفاده نمودند، عملکرد آنها با استفاده از پارامترهای آماری مانند میانگین، میانه و انحراف استاندارد تابع هدف مقایسه نمودند. الگوریتم‌های فراابتکاری با بهترین عملکرد جهانی، تکامل تفاضلی و بهینه‌سازی گرگ خاکستری بودند. سعید و همکاران [5]، شبیه‌سازی عددی سه گونه بفل منحنی قطاعی جدید را (بفل‌های هسته محدب/ بفل‌های محدب محیطی (CB1))، (بفل محدب محیطی / بفل هسته محدب(CB2))، (بافل‌های محدب محیطی / بافل‌های هسته مقعر (CB3)) برای تحلیل عملکرد ترموهیدرولیک انجام دادند. برای مقایسه، بفل قطاعی یگانه را نیز شبیه‌سازی عددی نمودند. هر پیکر بندی بفل با عدد رینولدزهای متفاوت (۱۷۶۳۹ – ۳۰۳۳۱) بر اساس ضریب انتقال حرارت کلی (U)، بازدهی (ε) و عدد انتقال واحد (NTU) آزمایش کردند و همچنین، افت فشار در سراسر سمت پوسته را برای برآورد اتلاف انرژی از سیستم به دلیل طراحی پیشنهادی محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که پیکربندی (CB3) منجر به افزایش قابل توجه عملکرد مبدل حرارتی در مقایسه با دو پیکربندی دیگر برای همه انواع تحت بررسی، می‌شود. سو و همکاران [6]، در مطالعهٔخود، یک کد تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی ژنراتور بخار مبتنی بر فلوئنت (STAF)را برای پیش‌بینی ویژگی‌های حرارتی – هیدرولیکی موضعی سه‌بعدی در طرف‌های اولیه و ثانویه ژنراتور بخار شکل (۳) ایجاد نمودند. کد (STAF) بر اساس مدل رسانه متخلخل در فلوئنت توسعه دادند. مقاومت‌های جریان که به وسیلهٔ لوله‌ها، صفحات نگهدارندهٔ لوله‌های دانکامر و جداسازها ایجاد می‌شود و با معادلهٔ مومنتوم به عنوان مولفه‌های افزوده شدهٔ منبع سیال سمت پوسته معرفی شوند. انتقال حرارت از سیال جانبی اولیه به ثانویه به عنوان معادله منبع انرژی سیال جانبی ثانویه در نظر گرفتند.

جریان و انتقال حرارت در سمت اولیه و همچنین انتقال حرارت لوله به پوسته از طریق توابع تعریف شده توسط کاربر(UFD) در فلوئنت حل نمودند. (STAF) را برای شبیه‌سازی آزمایش (Westinghouse MB2) استفاده نمودند و پارامترهای ترموهیدرولیکی موضعی را به دست آوردند. نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌داد، که توانایی (STAF) را برای مدل‌سازی ویژگی‌های جریان سه‌بعدی و انتقال حرارت در سمت اولیه و ثانویه مولد بخار را نشان می‌دهد. شرینکانت و همکاران [7]، به مطالعهٔ تاثیر پیکربندی‌های مختلف بفل‌ها در مبدل حرارتی پوسته – لوله بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار با بفل قطاعی یگانه، دوگانه، سه‌گانه، بفل‌های مارپیچ و بفل گل به وسیلهٔ شبیه‌سازی عددی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که برای دبی جرمی یکسان سمت پوسته، ضریب انتقال حرارت، افت فشار و نرخ انتقال حرارت برای بفل قطاعی یگانه حداکثر هستند. مناطق رکود تقریباً صفر در بفل‌های مارپیچ مشاهده شدند که منجر به کاهش رسوب و طول عمر عملیاتی طولانی می‌شود زیرا ارتعاش ناشی از جریان کم است. بفل‌های نوع گل "A" و "B" نیز کاهش مناطق راکد را نشان دادند.



شکل ۳ طرح شماتیک رآکتور آب تحت فشار با بفل‌های تری‌فویل

حمید یوسف وند و همکاران [8]، یک مبدل حرارتی پوسته – لوله با بفل‌های قطاعی – مارپیچ هیبریدی جدید - (HSHB STHX) با لوله‌های آجدار مختلف با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان (SolidWorks) با روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار دادند. برای بهبود دستگاه ارجاع شده با بفل قطاعی موجود، از دو رویکرد استفاده کردند، اعمال یک بفل جدید با یک مسیرگذر پوسته و استفاده از لوله آجدار، با در نظر گرفتن آرایش دنده‌های مختلف (دایره، مثلث و مستطیل). علاوه بر این، با مقایسه پارامترهای مختلف ترمو – هیدرولیک مانند ضریب ارزیابی کارایی، انتقال حرارت به افت فشار (Q / Δp)، معیارهای ارزیابی عملکرد (PEC)، نسبت عدد ناسلت به آرایش افت فشار (فاصله و زاویه جهت گیری در ناحیه مرکزی) و لوله آجدار با اشکال دنده‌های مختلف (دایره، مثلثی و مستطیلی) ارائه نمودند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل(HSHB - STHX) با شش بفل قطاعی و زاویه جهت ۹۰ درجه با لوله آجدار مستطیلی به عنوان بهترین مدل از نظر PEC نسبت به مدل‌های دیگر معرفی شدند. در میان شکل پرهٔ پیشنهادی (دایره، مثلثی و مستطیلی)، لوله با ۱۲۰ پرهٔ مستطیلی دارای حداکثر مقدار(Nu / ΔP) بود. در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک بفل تری‌فویل با بفل قطاعی مقایسه می‌شوند و به وسیلهٔ شبیه‌سازی سه بعدی، به مطالعه جریان در پوستهٔ مبدل حرارتی پوسته – لوله با صفحهٔ منفذدار تری‌فویل پرداخته شده است.

مواد و روش تحقیق

در این بخش، بر روی بفل‌های منفذدار تری‌فویل و قطاعی الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود. بدین منظور که تابع‌های هدف ظرفیت انتقال در حالت حداکثر و افت فشار در شرایط حداقل و متغیرهای متناظر با آن‌ها با یکدیگر ارزیابی و مقایسه. همچنین یک شبیه‌سازی سه بعدی از مبدل حرارتی پوسته – لوله با بفل منفذدار تری‌فویل و قطاعی صورت می‌گیرد تا به مطالعهٔ مشخصه‌های رفتار جریان سیال در سوی پوسته مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله پرداخته شود.

پیاده سازی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) یک روش جستجو است که روند انتخاب طبیعی را تقلید می‌کند. این روش جستجوی ابتکاری به طور معمول برای تولید راه حل‌های مفید برای بهینه‌سازی جستجوی مسائل استفاده می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک به گروه بزرگترالگوریتم‌های تکاملی تعلق دارند که با بهره جستن از تکنیک‌های الهام گرفته از تکامل طبیعی، راه حل‌هایی برای مشکلات بهینه‌سازی مانند وراثت، جهش، انتخاب و (Crossover) تولید می‌کنند. الگوریتم با مجموعه ای از راه حل‌ها شروع می‌شودکه جمعیت نامیده می‌شود. راه حل‌هایی از یک جمعیت گرفته شده و برای تشکیل جمعیت جدید استفاده می‌شود. راه حل‌هایی که برای تشکیل راه‌حل‌های جدید (فرزندان) انتخاب می‌شوند، با توجه به تناسب آنها انتخاب می‌شوند، هرچه منا سب تر با شند، شانس بیشتری برای تولید مثل دارند. این کار تکرار می‌شود تا زمانی که برخی شرایط (تعداد جمعیت یا بهبود بهترین راه حل) برآورده شود. تعمیم عملکرد ارائه شده در الگوریتم ژنتیک برای به حداقل رساندن یک مسئله است بنابراین، یک تابع دیگر g(x) باید ارائه شود به طوری که g (x) = -f (x) برای تابع هدف تا حداکثر سازی مسئله ایجاد شود قیدها در مسئله انتخاب می‌شوند تا مقدار بهینه شده در مقادیر آزمایش گنجانده شود. تمام قیود مشخص شده برای توابع (Q) و (ΔP) مرزها خطی هستند. با حل این مسئله دو حالت بهینه شده حاصل خواهد شد یکی حداکثر تابع (Q) و دیگری حداقل تابع (ΔP) است. قیدها برای تابع‌های (Q) و (ΔP)، شامل عدد رینولدز، تعداد وقطر لوله‌ها، فاصله و ارتفاع منفذ بفل‌ها هستند.

راه حل دقیقی مورد نیاز است تا یک حالت بهینه از هر دو تابع‌های هدف را برآورده کند. بنابراین یک بهینه‌سازی چند هدفه با الگوریتم ژنتیک انجام خواهد گرفت. از طرح ترکیبی برای یافتن یک (Pareto front) بهینه برای مسئله چند هدفه استفاده می‌شود.

بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته – لوله با صفحهٔ منفذدار تری‌فویل

معادلات راهنما برای مشخصه‌های ترمو – هیدرولیک سمت پو ستهٔ مبدل حرارتی پو سته – لوله با صفحهٔ منفذدار تری‌فویل [9] عبارتند از:

$$N_u = 0.42457 Re^{0.78172} \left(\frac{\delta}{d_e}\right)^{-0.16.35} \left(\frac{B}{d_e}\right)^{-0.14487} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (۱)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho u^2} = 9.0713 Re^{-0.1887} \left(\frac{\delta}{d_e}\right)^{-1.92116} \left(\frac{B}{d_e}\right)^{-0,85157} \quad (۲)$$

در معادله‌های فوق عدد ناسلت (N_u) و افت فشار (ΔP) بر حسب عدد رینولدز (Re)، ارتفاع منفذ (δ) و فاصلهٔ بین صفحه‌های بفل (B) بیان می‌شود. برای تابع‌های هدف انتقال حرارت و اتلاف فشار قیدهای زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\max Q(X) \rightarrow \begin{cases} 5000 \le Re \le 20000 \\ 10 \le N_T \le 30 \\ 0.01 \le d_o \le 0.03 \\ 0.0018 \le \delta \le 0.0033 \\ 0.15 \le B \le 0.25 \end{cases}$$

$$\min \Delta P(X) \rightarrow \begin{cases} 5000 \le Re \le 20000 \\ 0.01 \le d_o \le 0.03 \\ 0.0025 \le \delta \le 0.0033 \\ 0.15 \le B \le 0.25 \end{cases}$$

در قیدهای قرارداده شده، (N_T) تعداد و (d_o) قطر لوله‌ها می‌باشد.

بهینه‌سازی مبدل حراتی پوسته – لوله با بفل قطاعی

معادلات راهنما برای مشخصه‌های ترمو–هیدرولیک سمت پوستهٔ مبدل حرارتی پوسته – لوله با بفل قطاعی[1] عبارتند از:

$$NU = 0.36 \left(\frac{d_e G_s}{\mu}\right)^{0.55} \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (۳)$$

$$\Delta P = \frac{f G_s^2 (N_b + 1) D_s}{2 \rho d_e \phi_s} \quad (۴)$$

در معادله‌های بالا (d_e) قطر معادل، (G_s) جریان جرمی سمت پوسته، (f) ضریب اصطکاک، (N_b) تعداد صفحه‌های بفل و (D_s) قطر پوسته می‌باشد.

برای تابع‌های هدف انتقال حرارت و اتلاف فشـــار قیدهای زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\max Q(X) \rightarrow \begin{cases} 5000 \le Re \le 20000 \\ 10 \le N_T \le 30 \\ 0.01 \le d_o \le 0.03 \end{cases}$$

$$\min \Delta P(X) \rightarrow \begin{cases} 5000 \le Re \le 20000 \\ 0.01 \le d_o \le 0.03 \\ 10 \le N_T \le 30 \\ 0.15 \le B \le 0.25 \end{cases}$$

شبیه‌سازی سه بعدی مبدل حرارتی پوسته – لوله با صفحهٔ منفذدار تری‌فویل

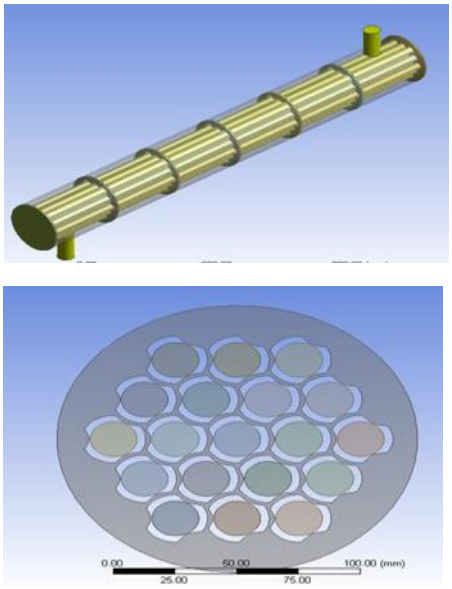
برای مطالعهٔ دقیق تر رفتار جریان سیال سمت پوسته مبدل حراتی پوسته – لوله با بفل منفذ دار تری‌فویل، شبیه‌سازی سه بعدی در نرم افزار انسیس فلوئنت از این گونه مبدل حرارتی انجام می‌گیرد. برای بفل تری‌فویل روش‌های کرن و بل دلاور، کارایی ندارد از همین رو یکی از روش‌های تحلیل آن‌ها شبیه‌سازی در نرم افزار انسیس فلوئنت است و استفاده از رابطه‌هایست که به طور آزمایشگاهی به دست آمده است.

مدل هندسی مبدل حرارتی پوسته – لوله با صفحهٔ منفذدار تری‌فویل

مدل مبدل حرارتی پوسته – لوله با بفل منفذدار تری‌فویل بر اساس استانداردهای مبدل حرارتی طراحی شده است و در جدول (۱) نشان داده شده است . قطر داخلی پوسته ۱۴۶، طول پوسته ۹۰۰، قطر لوله‌ها ۱۹ و گام آن‌ها ۲۵میلی متر است . آرایش مثلث با تعداد ۱۹عدد لوله تطبیق یافته است . ضخامت بفل‌ها ۴م، فاصلهٔ آن‌ها ۱۵۰، ارتفاع منفذ بفل ۳ میلی متر وتعداد بفل‌ها ۵ عدد است. مدل سه بعدی مبدل حرارتی و بفل منفذ دار تری‌فویل در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای هندسی مبدل حرارتی پوسته – لوله با صفحهٔ منفذدار تری‌فویل

اجزا	پارامترها	ابعاد
پارامترهای پوسته	قطرداخلی D_i	146mm
	طول L	900mm
پارامترهای لوله	قطرخارجی لوله d_o	19mm
	گام لوله P_t	25mm
	آرایش لوله‌ها	مثلثی
	قطرخارجی دسته لوله	147mm
پارامترهای بفل	ضخامت بفل	4mm
	فاصلهٔ بین بفل‌ها B	150mm
	ارتفاع منفذ بفل`	3mm
نازل‌های ورودی و خروجی	قطر داخلی	40mm
	ارتفاع	80mm
	فاصله از مرکز نازل تا بفل	75mm



شکل ۴ مبدل حرارتی پوسته – لوله (a) و صفحهٔ منفذدار تری‌فویل (b)

معادلات حاکم

سیال سمت پو سته در مبدل حرارتی مدل باید در سه معادلهٔ راهنمای پایه‌ای، پیو ستگی (۴)، بقای مومنتوم (۵) و بقای انرژی (۶) صدق نماید.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (۶)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right] \qquad (۷)$$

از مدل استاندارد تلاطم (k-ε)که یک مدل نیمه‌تجربی براساس مدل‌های معادلات گذرا برای انرژی جنبشی تلاطم (k) و میزان اتلاف (ε) است استفاده شده است . این یک کلاس مدل تلاطمی است و معمولاً در محاسبه جریان مهندسی عملی مانند جریان‌های متلاطم در طرف پوسته مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شود. معادله‌های بقا برای (k) و (ε) به ترتیب به شکل زیر بیان می‌شوند:

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t} + \rho\frac{\partial (k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \qquad (۸)$$

$$\rho\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho\frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\varepsilon_k})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{C_{1\varepsilon}\varepsilon}{k} + G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۹)$$

در معادله‌های بالا، ویسکوزیتهٔ تلاطم (μ_t) با ترکیبی از (ε) و (k) محاسبه می‌شود.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۱۰)$$

$$G_k = -\rho\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \qquad (۱۱)$$

(G_k) بیانگر تولید انرژی جنبشی تلاطم است که به وسیلهٔ گرادیان‌های متوسط سرعت محاسبه می‌شود. مقادیر ثابت بدین صورت تنظیم می‌گردد: $C_{1\varepsilon} = 1.44$، $C_{2\varepsilon} = 1.92$، $C_\mu = 0.09$، $\sigma_k = 1$ و $\sigma_\varepsilon = 1.3$. در شبیه‌سازی، جریان سیال به طور کامل متلاطم و غیرقابل تراکم است، ازتاثیر ویسکوزیتهٔ مولوکولی صرف نظر شده است. در شبیه‌سازی از مدل تلاطم استاندارد (k-ε) استفاده شده است . عدد رینولدز به شکل زیر معین می‌گردد:

$$Re = \frac{\rho u d_e}{\mu} \qquad (۱۲)$$

$$d_e = \frac{4\left(\sqrt{3}/2 p_t^2 - \pi d_o^2/4\right)}{\pi d_o} \qquad (۱۳)$$

در این معادله (d_o) قطر خارجی و (p_t) گام لوله‌ها برای آرایش مثلث دستهٔ لوله‌ها است.ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سمت پوسته به‌صورت زیر تشریح می‌گردد:

$$h = \frac{m c_p (T_O - T_i)}{A \Delta T_{lmtd}} \qquad (۱۴)$$

$$\Delta T_{lmtd} = \frac{(T_w - T_o) - (T_w - T_i)}{\ln\frac{(T_w - T_o)}{(T_w - T_i)}} \qquad (۱۵)$$

در معادله‌های فوق h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، ΔT_{lmtd} اختلاف دمای میانگین لگاریتمی، T_w دمای دیوارهٔ لوله‌ها، T_i دمای سیال ورودی به پوسته و T_o دمای سیال خروجی از پوسته می‌باشد.

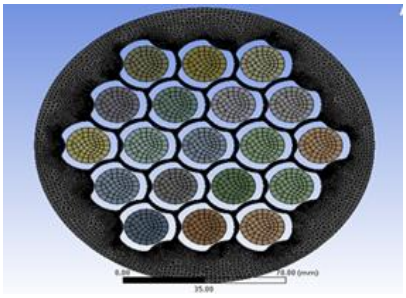
شرایط مرزی

در فرایند شبیه‌سازی فرض شده است که سیال نیوتونی و غیر قابل تراکم و به طور متوسط پیوستگی دارد. از اثرات جاذبه صرف نظر می‌شود و دیواره‌ها مرز لغزشی نیستند. سطح خارجی دیواره‌های پوسته آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شوند. سیالی که در پوستهٔ مبدل حرارتی جریان دارد آب است. میزان جریان جرمی ورودی که معادل عدد رینولدز (۱۰۰۰۰) است، در نظر گرفته

می‌شود. دمای ورودی سیال (۲۹۳ کلوین) تنظیم می‌شود. شرایط خروجی به‌صورت فشار خروجی در نظر گرفته می‌شود و فشار آن (۰) پاسکال فرض می‌شود. فشار ورودی حاصل شده همان اتلاف فشار است. دمای دستهٔ لوله‌ها (۳۹۳ کلوین) انتخاب می‌شود که معادل انتقال حرارت هم دمای چگالش سیال سمت لوله‌ها می‌باشد در جایی که از مقاومت هدایت حرارتی دیوارهٔ لوله‌های مبدل حرارتی صرف نظر شده است. روش حل شبیه‌سازی از جفت شدگی فشار – سرعت بر اساس الگوریتم (couple) ومومنتوم گسسته و معادلات انرژی بر اساس طرح متفاوت مخالف مرتبه دوم استفاده می‌شود.

تقسیم مش و تایید استقلال

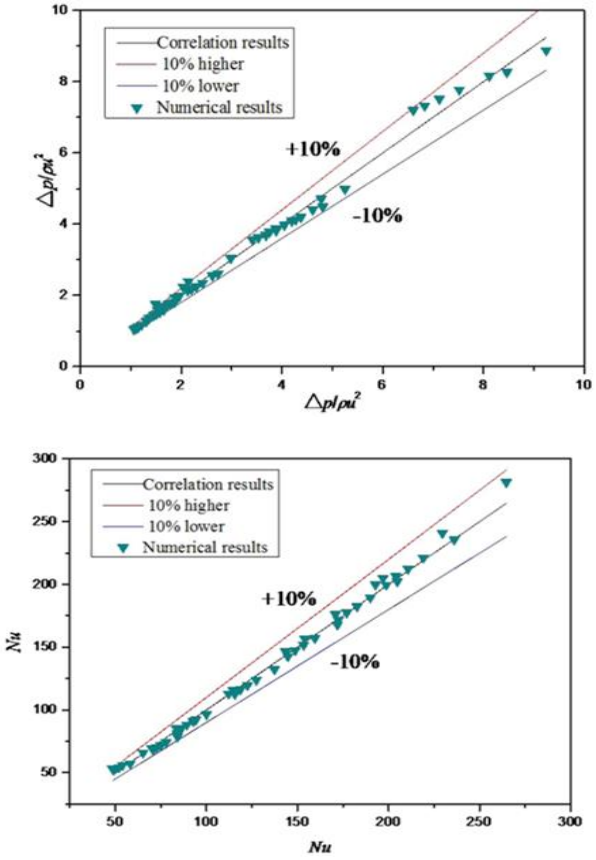
تراکم‌های مختلف مش و طرح‌های مش‌بندی مدل برای به دست آوردن راه حل استقلال شبکه مورد بررسی قرار گرفت. مش‌بندی برای مدل مبدل حرارتی با بفل‌های منفذ دار تری‌فویل توسط مش‌های بلوک ایجاد شده است. از مش‌های تصفیه شده در مناطق صفحهٔ محافظ لوله‌ها برای دقیق‌تر شدن جریان سیال در نزدیکی سطح صفحه استفاده می‌شود، شکل (۵). مدل‌ها با تعداد المان مش‌های ۷,۵ و ۶ میلیون بررسی شدند. تغییرات نسبی اتلاف فشار و ضریب انتقال حرارت هر دو کمتر از۰,۰۲ درصد می‌شود. می‌توان در نظر گرفت که راه حل استقلال شبکهٔ مش‌بندی حاصل شده است.



شکل ۵ صفحهٔ منفذدار تری‌فویل مش‌خورده

اعتبار سنجی

معادله‌های (۱) و (۲) مربوط به بفل تری‌فویل برای عدد رینولدز۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰، عدد پرانتل ۰,۵ تا ۱۶۰، ارتفاع منفذ ۰,۰۰۱۸ تا ۰,۰۰۳۳ (متر) و فاصلهٔ بفل ۰,۱۵ تا ۰,۹ (متر) معتبر است [9]. از این معادله‌ها برای اجرای الگوریتم ژنتیک برای بفل تری‌فویل استفاده شده است. همانگونه که در شکل (۶)، مشاهده می‌گردد، نتایج حاصل از روش‌های عددی در تطابق خوبی با نتایج معادلات ارائه شده می‌باشند. برای بفل‌های تری‌فویل درصد خطا میان معادله‌های ضریب انتقال حرارت و افت فشار با نتیجه‌های عددی $10\%^{\pm}$ به دست آمده است. اجرای الگوریتم ژنتیک برای بفل قطاعی از روش کرن استفاده شده است. معادله‌های این روش از طریق آزمایش‌های تجربی به دست آمده اند و نتایج آن‌ها با شبیه‌سازی‌های عددی هم خوانی با درصد خطای اندکی دارند [1].



شکل ۶ مقایسهٔ نتیجه‌های عددی و معادله‌های بفل تری‌فویل برای افت فشار(a) و عدد ناسلت(b)

نتایج

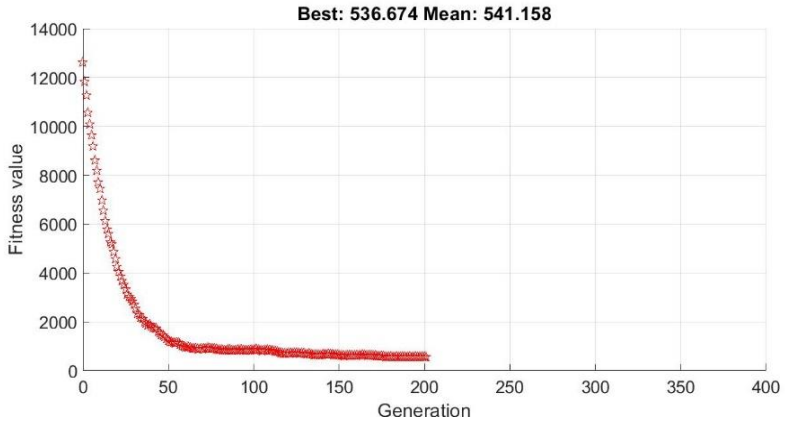
در این قسمت نتیجه‌های حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک برای مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله دسته بندی می‌شوند. بدین طریق امکان مقایسهٔ مبدل‌های حرارتی در حالی که به‌صورت تک هدفه بهینه شده‌اند میسر می‌شود و همچنین مقدار پارامترهای متناظر برای حالت‌های بهینه چند هدفه آن‌ها به دست می‌آید. با استفاده

از شبیه‌سازی سه‌بعدی مبدل‌ها، توزیع دما، توزیع سرعت و الگوی خطوط جریان برای آن‌ها معلوم و مقایسهٔ آن‌ها صورت می‌گیرد.

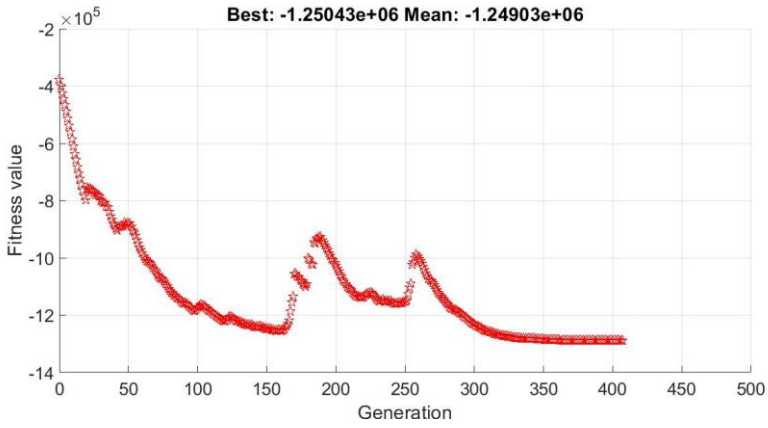
بهینه‌سازی تک هدفهٔ مبدل حرارتی پوسته – لوله با صفحهٔ منفذدار تری‌فویل

شکل(۷)، حداقل مقدار برای افت فشار و حداکثر مقدار برای ظرفیت انتقال حرارت حاصل از الگوریتم ژنتیک تک هدفه برای منفذ تری‌فویل آرایش مربع را نشان می‌دهد. برای حداکثر مقدار ظرفیت انتقال حرارت تعداد لوله‌ها، قطر لوله‌ها، ارتفاع منفذ، فاصلهٔ بین بفل‌ها، عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت به ترتیب برابر با، ۳۰ عدد، ۰,۰۳ متر، ۰,۰۰۳ متر، ۰,۱۵ متر، ۱۸۴۴۷,۴۱۱ و ۵۴۸۲,۳۳۲ (w/m²k) می‌شوند. برای حداقل افت فشار قطر لوله‌ها، ارتفاع منفذ، فاصلهٔ بفل‌ها و عدد رینولدز به ترتیب برابر با، ۰,۰۱۳ متر، ۰,۰۰۳ متر، ۰,۲۵ متر و ۵۰۰۰ نتیجه شده است.

شکل (۸)، حداقل مقدار برای افت فشار و حداکثر مقدار برای ظرفیت انتقال حرارت حاصل از الگوریتم ژنتیک تک هدفه برای منفذتری‌فویل آرایش مثلث را نشان می‌دهد. برای حداکثر مقدار ظرفیت انتقال حرارت تعداد لوله‌ها، قطر لوله‌ها، ارتفاع منفذ، فاصلهٔ بین بفل‌ها، عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت به ترتیب برابر با، ۳۰ عدد، ۰,۰۳ متر، ۰,۰۰۲ متر، ۰,۱۵متر، ۱۹۴۸۰,۹۶۹ و ۷۵۱۹,۵۱۳ (w/m²k) می‌شوند. برای حداقل افت فشار، قطر لوله‌ها، ارتفاع منفذ، فاصلهٔ بفل‌ها و عدد رینولدز به ترتیب برابر با، ۰,۰۲ متر،۰,۰۰۳ متر، ۰,۲۵متر و ۵۰۰۰ نتیجه شده است.

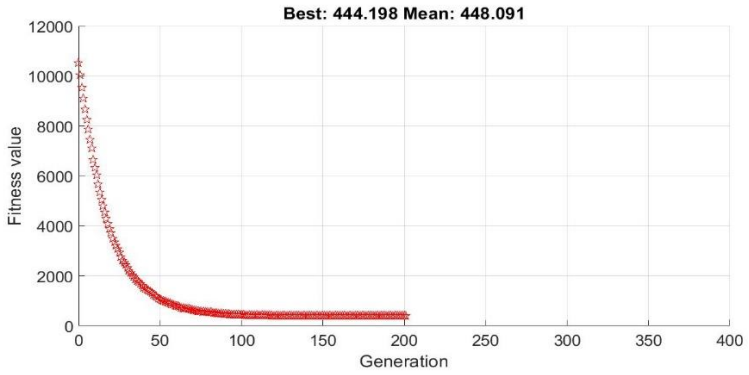


(a)

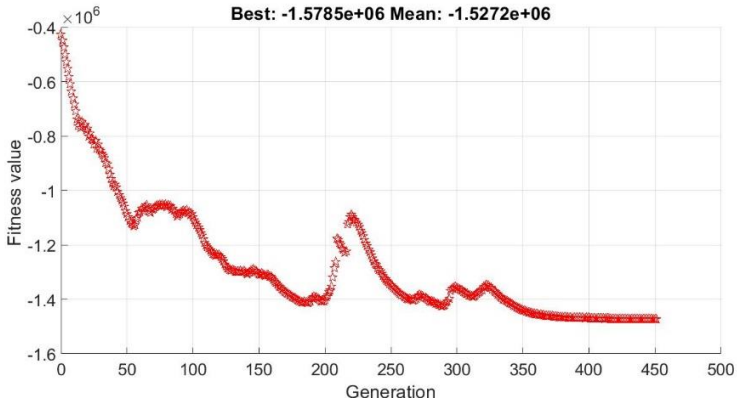


(b)

شکل ۷ (a) بهترین طرح تناسب در بهینه‌سازی تک هدفه برای افت فشار و (b) انتقال حرارت بفل تری‌فویل آرایش مربع



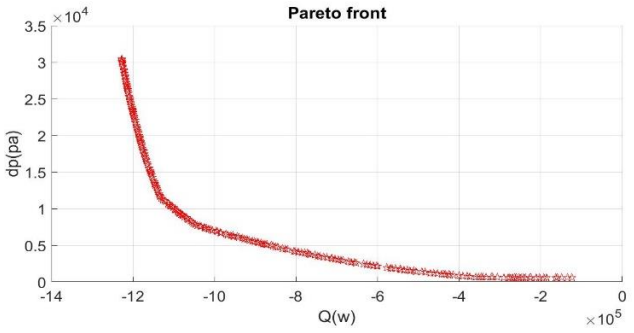
(a)



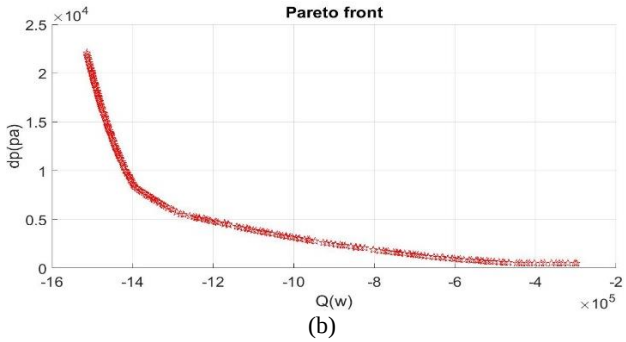
(b)

شکل ۸ بهترین طرح تناسب در بهینه‌سازی تک هدفه برای افت فشار(a) و انتقال حرارت بفل تری‌فویل آرایش مثلث بهینه‌سازی چند هدفهٔ مبدل حرارتی پوسته – لوله با صفحهٔ منفذدار تری‌فویل(b)

شکل (۹)، نمودار ظرفیت انتقال حرارت در برابر افت فشار برای حالت‌های آرایش مربع و مثلث را نشان می‌دهد که از بهینه‌سازی چندهدفهٔ بفل تری‌فویل حاصل شده است. این نمودارها یک دیدگاه کلی از طراحی مبدل حرارتی ترسیم می‌نماید و این که طراح مبدل حرارتی با در نظر گرفتن وضعیت کارکرد آن، در چه محدوده ای از ظرفیت انتقال حرارت در برابر افت فشار بهره گیرد تا حالت بهینه و صرفه جویی در مصرف انرژی در مطلوب‌ترین وضعیت نتیجه شود. در جدول (۲) پارامترهای متناظر با هر افت فشار و ظرفیت انتقال به وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک چند هدفه مشخص می‌شود. برای آرایش مثلث دستهٔ لوله‌ها، الگوریتم بیشترین تعداد لوله‌ها و قطر لوله‌ها که ۳۰ و ۰,۰۳ متر می‌باشد را در اکثر حالت‌های ظرفیت انتقال حرارت در برابر افت فشار را نشان داده است. همچنین برای فاصلهٔ بفل‌ها بیشترین تکرار ۰,۱۵متر نتیجه شده است.



(a)

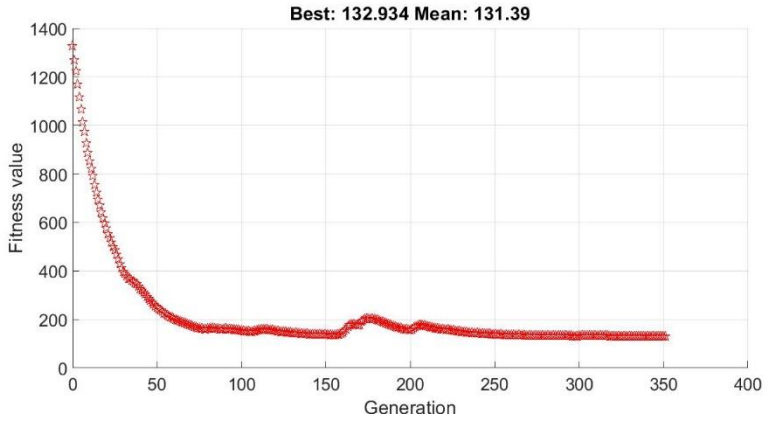


(b)

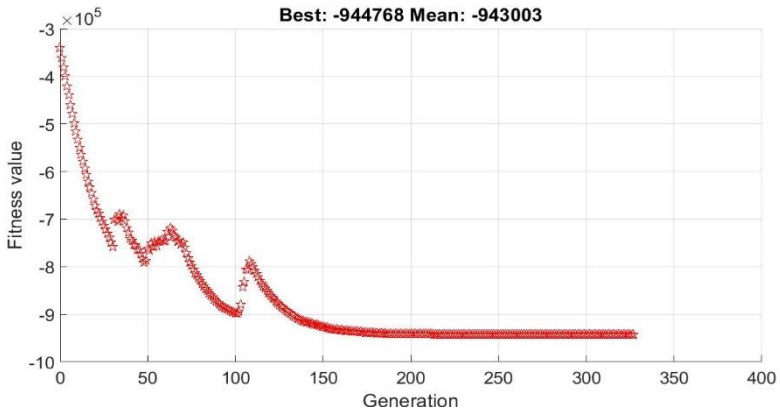
شکل ۹ نمودار (Pareto front) با رویکرد ترکیبی برای آرایش مربع(a) و آرایش مثلث (b) منفذ تری‌فویل به دست آمده است

جدول ۲ مقادیر بهینه شدهٔ آرایش مثلث متناظر با تابع‌های Qو ΔP منفذ تری‌فویل حاصل از الگوریتم چندهدفه

	Q	ΔP	do	Nt	Re	δ	B	h
1	1442483	17894	0.030	30	18094	0.002	0.15	7090
2	1389455	13946	0.030	30	18047	0.002	0.15	6933
3	1311455	8645	0.030	30	17417	0.003	0.15	6504
4	1413735	15068	0.030	30	18076	0.002	0.15	6974
5	300692	506	0.020	28	5442	0.003	0.25	2388
6	1215414	5566	0.030	30	17140	0.003	0.23	5978
7	1370984	12362	0.030	30	18004	0.002	0.16	6813
8	1366844	9894	0.030	30	18061	0.003	0.15	6740
9	537754	1212	0.025	29	8177	0.003	0.24	3316
10	826704	2306	0.029	30	11104	0.003	0.22	4248
11	300692	506	0.020	28	5442	0.003	0.25	2388
12	1082535	4098	0.029	28	16944	0.003	0.25	5738
13	1442483	17894	0.030	30	18094	0.002	0.15	7090
14	656400	1629	0.027	30	8735	0.003	0.22	3556
15	1269164	6599	0.030	30	17879	0.003	0.22	6251
16	902310	2738	0.030	29	12796	0.003	0.25	4642
17	1143108	4942	0.029	30	16419	0.003	0.22	5792
18	1425139	16611	0.030	30	18080	0.002	0.15	7033



(a)



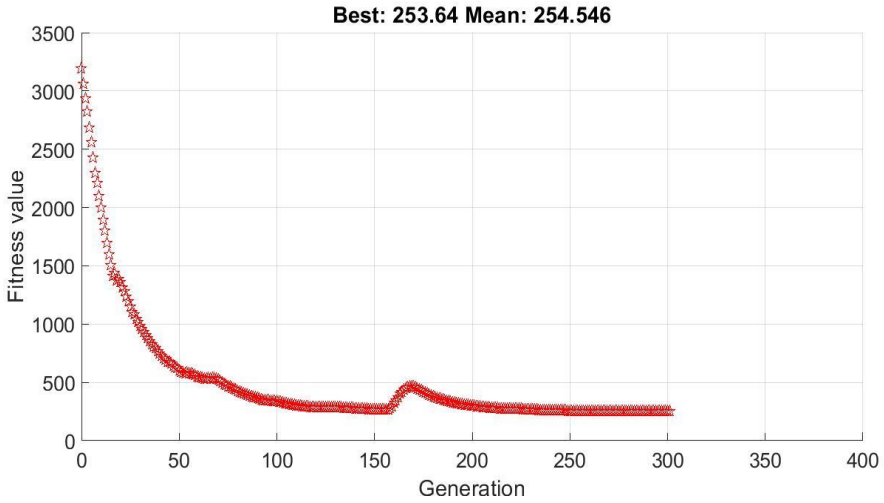
(b)

شکل ۱۰ بهترین طرح تناسب در بهینه‌سازی تک هدفه برای افت فشار(a)وانتقال حرارت بفل قطاعی آرایش مربعی(b)

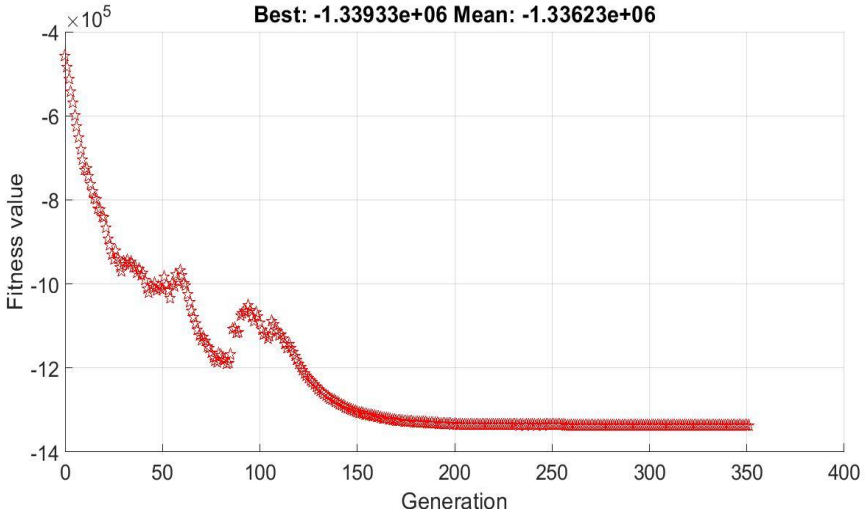
بهینه‌سازی تک هدفهٔ مبدل حرارتی پوسته – لوله با بفل قطاعی

شکل (۱۰)، حداقل مقدار برای افت فشار و حداکثر مقدار برای ظرفیت انتقال حرارت حاصل از الگوریتم ژنتیک تک هدفه برای بفل قطاعی، آرایش مربع را نشان می‌دهد. برای حداکثر مقدار ظرفیت انتقال حرارت تعداد لوله‌ها ،قطر لوله‌ها، عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت به ترتیب برابر با، ۳۰عدد، ۰,۰۳ متر، ۱۹۴۵۷,۲۱۱ و ۴۵۷۰,۷۴۵ (w/m^2k) می‌شوند. برای حداقل افت فشار، قطر لوله‌ها، تعدادلوله‌ها، فاصلهٔ بفل‌ها و عدد رینولدز به ترتیب برابر با، ۰,۰۱ متر، ۱۰، ۰,۱۵ متر و ۵۰۰۰ نتیجه شده است.

شکل (۱۱)، حداقل مقدار برای افت فشار و حداکثر مقدار برای ظرفیت انتقال حرارت حاصل از الگوریتم ژنتیک تک هدفه برای بفل قطاعی، آرایش مثلث را نشان می‌دهد. برای حداکثر مقدار ظرفیت انتقال حرارت تعداد لوله‌ها، قطر لوله‌ها، عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت به ترتیب برابر با، ۳۰عدد، ۰,۰۳ متر، ۱۹۵۲۰,۴۰۹ و ۶۴۶۸,۳۶۶ (w/m^2k) می‌شوند. برای حداقل افت فشار، قطر لوله‌ها، تعداد لوله‌ها، فاصلهٔ بفل‌ها و عدد رینولدز به ترتیب برابر با، ۰,۰۱ متر، ۱۰، ۰,۱۵ متر و ۵۰۰۰ نتیجه شده است.

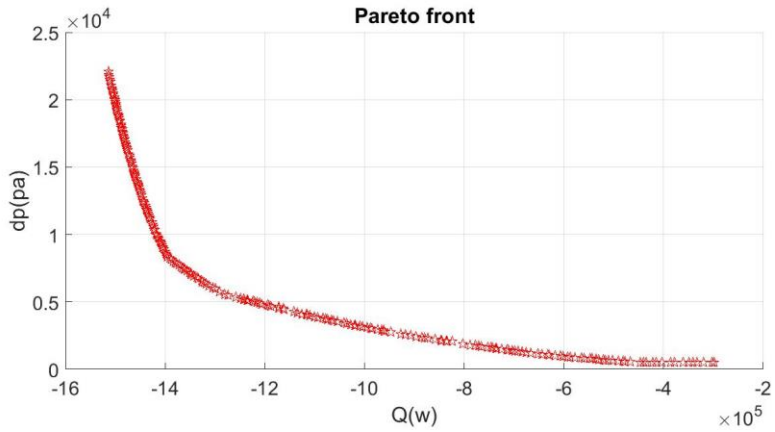


(a)

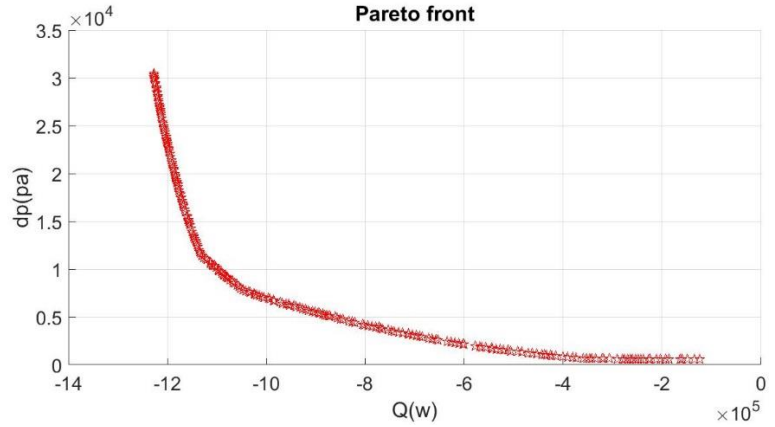


(b)

شکل ۱۱ بهترین طرح تناسب در بهینه‌سازی تک هدفه برای افت فشار(a) و انتقال حرارت بفل قطاعی آرایش مثلث (b)



(a)



(b)

شکل ۱۲ نمودار (Pareto front) با رویکرد ترکیبی برای آرایش مربع(a) و آرایش مثلث (b) بفل قطاعی به دست آمده است

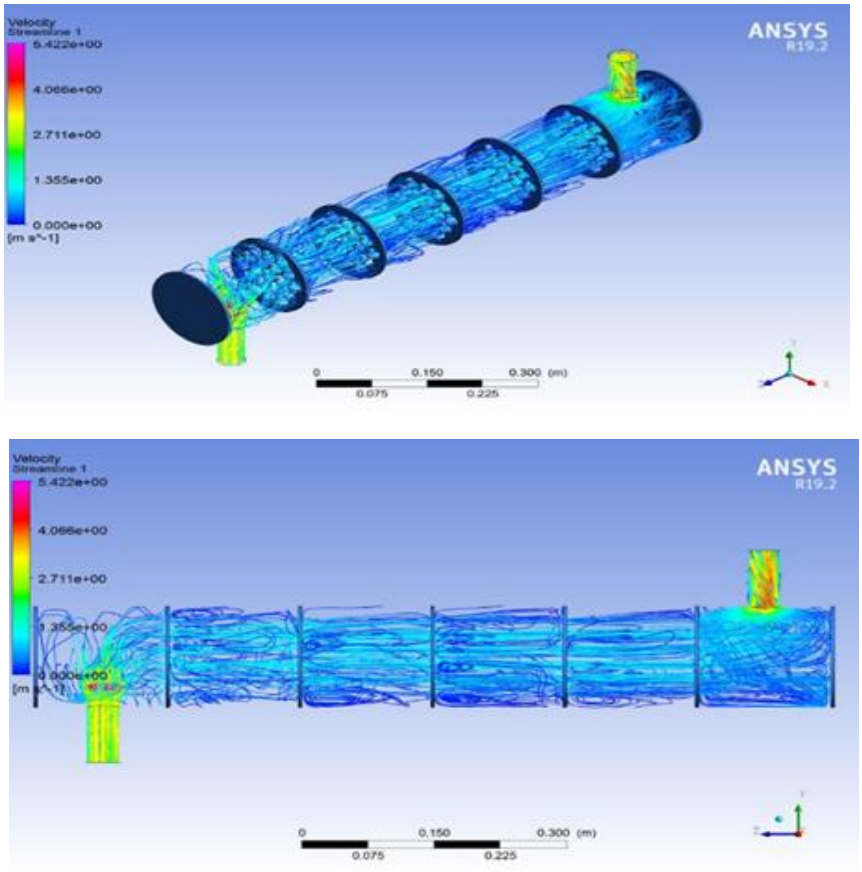
نتیجه‌های حاصل‌شده از شبیه‌سازی سه‌بعدی مبدل حرارتی پوسته – لوله با بفل تری‌فویل

همان گونه که در شکل (۱۳)، مشخص شده است جریان در سمت پوستهٔ مبدل حرارتی به‌صورت طولی و در راستای محور لوله‌ها جریان می‌یابد و مناطق مردهٔ آشکار یا جریان‌های برگشتی قابل توجه ای دیده نمی‌شود. در مبدل حرارتی پوسته – لوله با بفل قطاعی شکل (۱۴)، مناطق مرده بسیار زیاد، گرداب‌ها و جریان‌های برگشتی ناشی از جریان زیگزاگی در سمت پوسته قرار دارد، که منجر به کاهش سرعت، استفاده ناکارآمد از ناحیه انتقال حرارت و بدتر شدن انتقال حرارت می‌شود.

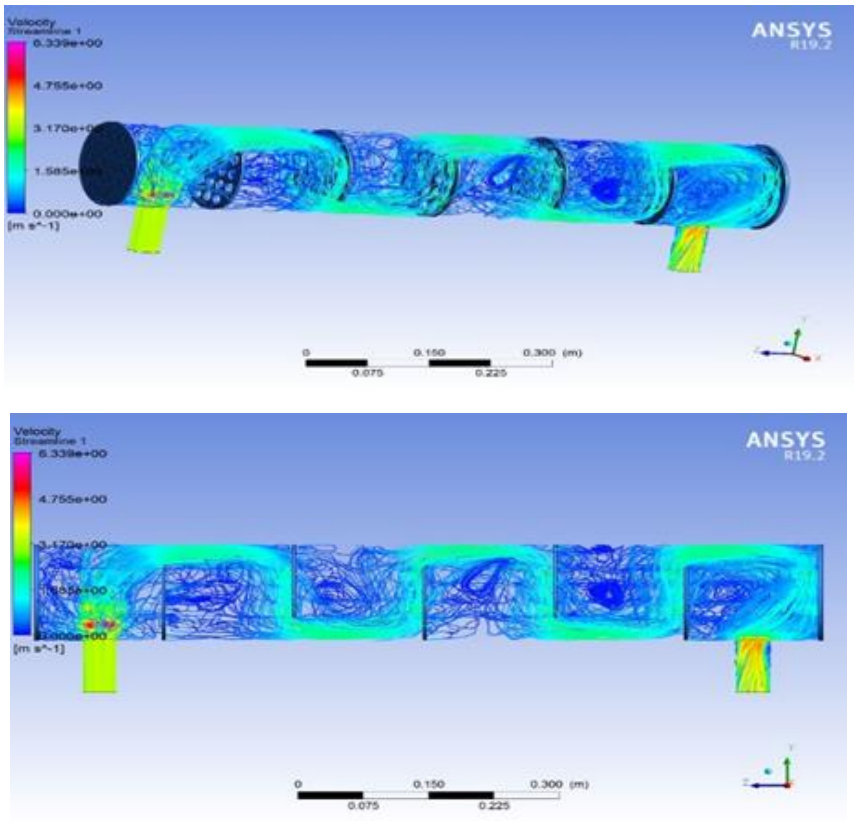
مقایسه ظرفیت انتقال حرارت و افت فشار مبدل حرارتی پوسته – لوله با بفل‌های تری‌فویل و قطاعی

شکل (۱۵)، مقایسهٔ ظرفیت انتقال حرارت آرایش مربع (a) و آرایش مثلث (b) بفل تری‌فویل و قطاعی را نشان می‌دهد. با بیشتر شدن عدد رینولدز فاصلهٔ اختلاف مقدار ظرفیت انتقال حرارت برای بفل تری‌فویل در مقایسه با بفل قطاعی بیشتر می‌شود. زیرا جریان به هنگام عبور از بازشوهای تری‌فویل، آشفته شده و جریان‌های جت ایجاد می‌شود. در نتیجه آن ظرفیت انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به دنبال افزایش سرعت در بازشوهای تری‌فویل، افت فشار بیشتری پدیدار می‌شود.

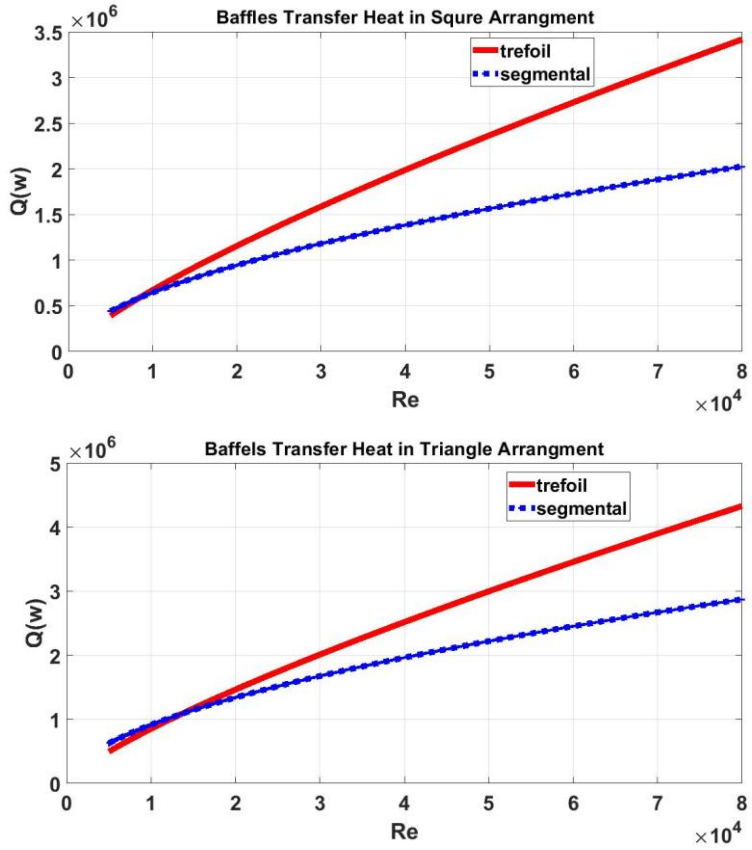
نسبت افزایش افت فشار به تغییرات عدد رینولدز در مقایسه با تغییرات ظرفیت انتقال حرارت برای بفل تری‌فویل بیشتر است شکل (۱۶). چیدمان مثلث لوله‌ها برای بفل تری‌فویل نسبت به چیدمان مربع، دارای ظرفیت انتقال حرارت بیشتر و همچنین افت فشار بیشتر است. در اعداد رینولدز بالاتر ظرفیت انتقال حرارت بفل تری‌فویل نسبت به قطاعی بیشترمی‌شود. اثر مسدود شدن سیال در آرایش مثلث باعث افت فشار و افزایش سرعت جریان می‌گردد. آشفتگی جریان در این وضعیت به افزایش ضریب انتقال حرارت می‌انجامد.



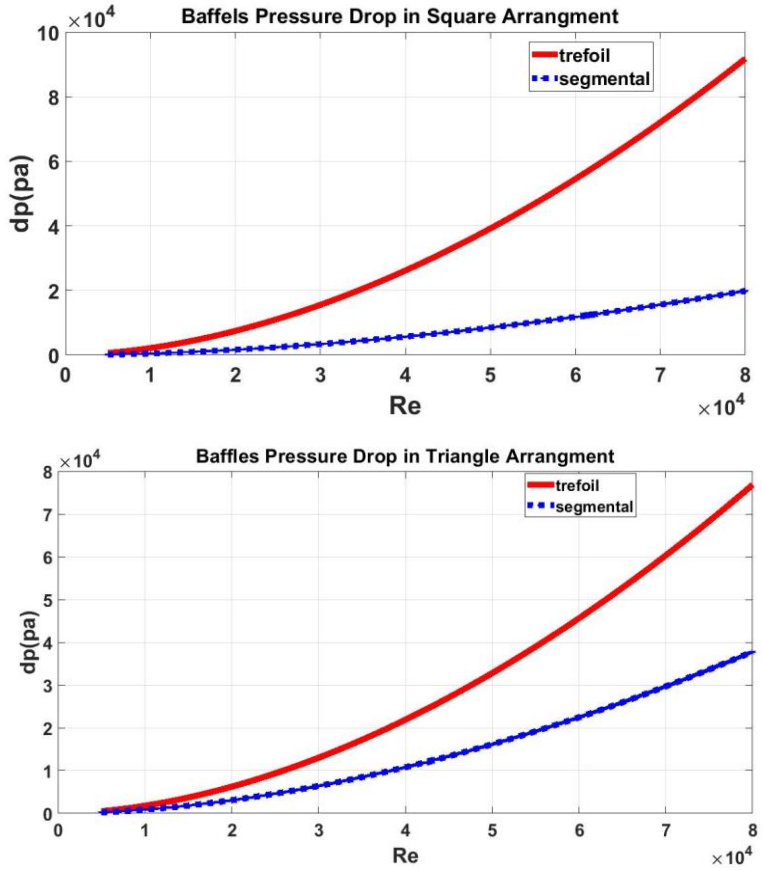
شکل ۱۳ خطوط جریان مبدل حرارتی با بفل تری‌فویل



شکل ۱۴ خطوط جریان مبدل حرارتی با بفل قطاعی



شکل ۱۵ نمودارمقایسهٔ ظرفیت انتقال حرارت بفل تری‌فویل و قطاعی (a) آرایش مربع و (b) آرایش مثلث



شکل ۱۶ نمودارمقایسهٔ اتلاف فشار بفل تری‌فویل و قطاعی (a) آرایش مربع و (b) آرایش مثلث

جدول ۳ مقادیر بهینه شدهٔ آرایش مثلث متناظر با تابع‌های Q و ΔP بفل قطاعی حاصل از الگوریتم چندهدفه

	Q	ΔP	do	Nt	Re	B	h
1	72865	356	0.01	11	5150	0.11	3021
2	109790	393	0.011	14	5530	0.15	3183
3	187767	530	0.011	23	5637	0.15	3221
4	243761	658	0.013	27	5568	0.14	3250
5	309077	831	0.017	24	5749	0.15	3377
6	380982	961	0.021	24	5656	0.15	3355
7	463296	1129	0.023	26	5781	0.15	3384
8	488495	1183	0.023	28	5752	0.14	3379
9	575598	1402	0.029	25	6094	0.15	3434
10	678208	1416	0.03	30	5805	0.15	3333
11	724054	1755	0.03	30	6538	0.15	3558
12	756483	2454	0.028	29	8024	0.15	4004
13	815870	2611	0.03	30	8123	0.15	4010
14	852402	3098	0.03	30	8796	0.14	4189
15	858052	3391	0.03	30	9273	0.14	4320
16	924467	4131	0.03	30	10195	0.14	4543
17	951913	5123	0.028	30	12080	0.15	5020
18	1016562	5636	0.03	30	12123	0.14	4998
19	1033346	5958	0.03	30	12482	0.14	5079
20	1037227	6107	0.03	30	13118	0.15	5223

جدول ۴ مقادیر توابع انتقال حرارت و اتلاف فشار حاصل شده از الگوریتم ژنتیک تک هدفه برای بفل‌ها با آرایش مربعی(s)وآرایش مثلثی(t)

	Qs*10^6	Qt*10^6	DPs	DPt	(Q/DP)s	(Q/DP)t
تری‌فویل	1.115	1.53	525	434	2125	3524.1
قطاعی	0.93	1.32	134	253	7009	5197

جدول ۵ پارامترهای مبدل‌ها برای کمینهٔ افت فشار

آرایش مربعی					
Baffle type	Re	do	B	N	δ
تری‌فویل	5000	0.013	0.25	-	0.003
قطاعی	5000	0.01	0.15	10	0.003
آرایش مثلثی					
Baffle type	Re	do	B	N	δ
تری‌فویل	5000	0.02	0.25	-	0.003
قطاعی	5000	0.01	0.15	10	0.003

جدول(۶) پارامترهای مبدل‌ها برای حداکثر ظرفیت انتقال حرارت

آرایش مربعی						
Baffle type	Re	do	B	N	δ	h
تری‌فویل	18447	0.03	0.25	30	0.003	5482
قطاعی	19457	0.03	-	30	0.003	4571
آرایش مثلثی						
Baffle type	Re	do	B	N	$\boldsymbol{\delta}$	h
تری‌فویل	19481	0.03	0.25	30	0.003	7520
قطاعی	19521	0.03	-	30	0.003	6468

نتیجه‌گیری

ظرفیت انتقال حرارت در وضعیت ماکزیمم حاصل شده از الگوریتم ژنتیک تک هدفهٔ بفل تری‌فویل با آرایش مربع ۱۹,۹۴۴درصد بیشتر از بفل قطاعی می‌باشد و این مقدار برای آرایش مثلث به ۱۶,۲۵درصد می‌رسد جدول (۴). این در حالی است که افت فشار برای آرایش مربع ۳,۲ برابر و برای آرایش مثلث ۲,۰۷۵ برابرنسب به بفل قطاعی بیشتر شده است. این نشان دهندهٔ سرعت گرفتن سیال در بازشوها می‌باشد که با افت فشار قابل ملاحظه ای روبرو می‌شود و در پی آن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سمت پوسته نسبت به بفل قطاعی بیشتر می‌شود و همان درصد افزایش ظرفیت انتقال حرارت نتیجه شده است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی حالت مثلث نسبت به حالت مربع برای بفل تری‌فویل ۳۷ ٪ افزایش یافته است و این رقم برای بفل قطاعی ۴۱,۵ ٪ حاصل شده است. با توجه به نتایج حاصل شده برای تابع‌های انتقال حرارت و افت فشار در حالت بهینه شدهٔ تک هدفه، مقدار مفهومی ($Q/\Delta P$) برای بفل قطاعی بیشتر است زیرا که بفل تری‌فویل ضریب انتقال حرارت را به نحوی افزایش می‌دهد که با افت فشار بالا همراه است در صورتی که در بفل قطاعی، افزایش انتقال حرارت با شیب کمتر و متناسب تر با افزایش افت فشار صورت می‌گیرد. در جدول‌های (۵) و (۶) پارامترهای متناظر با حداکثر ظرفیت انتقال حرارت و حداقل افت فشار در آرایش مربع و مثلث نشان داده شده است. برای حداکثر سازی تابع انتقال حرارت و حداقل سازی افت فشار در هر آرایش ارتفاع منفذ تری تری‌فویل ۰,۰۰۳ میلی متر، در نتیجهٔ بهینه‌سازی تک هدفه حاصل شده است. برای حداکثر سازی تابع انتقال حرارت، فاصلهٔ بفل‌های تری‌فویل ۱۵۰ میلی‌متر شده است و برای حداقل سازی تابع افت فشار فاصلهٔ بفل‌ها ۲۵۰ میلی متر به دست می‌آید.

پارامتر مهم عدد رینولدز بطور برجسته‌ای در افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار نقش ایفا می‌کند. در جدول‌های (۵ و۶) نمایان است که برای بیشینه نمودن تابع انتقال حرارت، افزایش عدد رینولدز صورت گرفته است و فاصلهٔبین بفل‌ها در حد پایین خود قرار دارد همچنین برای کاهیدن افت فشار عدد رینولدز در حد پایین خود قرار می‌گیرد و فاصلهٔ بین بفل‌ها بیشترین مقدار شده است. توزیع دما در بفل‌های تری‌فویل یکنواخت است، همچنین مناطق مردهٔ آشکاری در آن دیده نمی‌شود. هنگامی که سیال از منفذهای بفل تری‌فویل عبور می‌کند، جریان‌های جت را ایجاد می‌کند و پروفایل سرعت بالا را در اطراف و پشت صفحه‌ها تولید می‌شود. ضخامت لایه مرزی روی دیواره لوله با الگوی جریان کاهش می‌یابد، عملکرد انتقال حرارت افزایش می‌یابد و محصولات خوردگی و رسوبات شیمیایی کاهش می‌یابد که شرایط خوردگی را نیز بهبود می‌بخشد. کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی همچنین از دست دادن انرژی مکانیکی بالا در مجاورت ساختار صفحه‌ها را نشان می‌دهد. با حذف تأثیرات متغیر جرم، انرژی جنبشی آشفتگی فقط متناسب با انرژی جنبشی نوسان سرعت آشفتگی است. حداکثر مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در پشت صفحه‌های بفل تری‌فویل ظاهر می‌شود و وجود بیشینهٔ سرعت در پشت صفحات، موید این امر است. توزیع سرعت و دما برای بفل قطاعی به طور کامل غیر یکنواخت است. مناطق مرده بسیار زیاد، گرداب‌ها و جریان‌های برگشتی ناشی از جریان زیگزاگی است که در سمت

پوسته قرار دارد، که منجر به کاهش سرعت، استفاده ناکارآمد از ناحیه انتقال حرارت و بدتر شدن انتقال حرارت می‌شود. هنگامی که ارتفاع باز شدن منفذها در بفل‌های صفحه منفذدار تری‌فویل افزایش می‌یابد، الگوهای خطوط جریان ثابت می‌کند که جریان‌های معکوس در مجاورت ساختار نگهدارنده‌ها وجود دارد. انرژی جنبشی نوسان آشفتگی سیال، نشان دهنده از دست دادن قابل توجه انرژی مکانیکی است که منجر به افزایش قابل توجه مقاومت جریان می‌شود. با توجه به ایجاد جریان‌های جت و کاهش رسوبات شیمیایی بروی لوله‌ها و بهبود شرایط خوردگی و همچنین استحکام ساختاری بفل تری‌فویل، شرایط کارکرد ایمن مبدل‌های حرارتی پوسته – لوله در فشار و دماهای بالا و محیط‌های خورنده که دستهٔ لوله‌ها به طور عمودی استقرار یافته‌اند، مانند ژنراتورهای بخار نیروگاه‌های هسته‌ای را فراهم می‌نماید.

واژه نامه

شرایط مرزی	Boundary condition
رسوبات شیمیایی	Chemical deposits
انتقال حرارت جابه‌جایی	Convection heat transfer
معادلات راهنما	Guide equations
ارتعاش ناشی از جریان	Flow induced vibration
جریان طولی	Longitudinal flow
مبدل حرارتی	Heat exchanger
ظرفیت انتقال حرارت	Heat transfer capacity
جریان‌های جت	Jet streams
بهینه‌سازی چند هدفه	Multi objective optimization
جهش	Mutation
افت فشار	Pressure drop
راکتور آب تحت فشار	Pressurize water reactor
بفل قطاعی	Segmental baffle
پوسته	Shell
بهینه‌سازی تک هدفه	Single objective optimization
چیدمان مربع	Square arrangement
ژنراتور بخار	Steam generator
صفحهٔ منفذدار تری‌فویل	Trefoil perforated plate
چیدمان مثلث	Triangle arrangement
دستهٔ لوله	Tube bundle
اعتبار سنجی	Validation

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] S. Kakac, *Heat Exchangers Selection and Thermal Design*, 2nd Ed. Miami Gables: Florida University. (2002).

[2] S. Kotian, N. Methekar, N. Jain, P. Vartak and P. Naik, *"Colburn vs Bell Delaware approach for evaluation of thermo hydraulic performance of a shell and tube heat exchanger" a theoretical study, 1st International Conference on Computations in Materials and Applied Engineering*, (2021).

[3] Z. Sui, J. Yang, Y. Yao and X-Y Zhang, "Numerical investigation of the thermal-hydraulic characteristics of AP1000 steam generator U-tubes", *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*, vol. 2, pp. 52-59, (2020).

[4] O. D. Lara-Montano, F.I. Gomez-Castro and C. Cutierrez-Antonio, "Comparison of the performance of different metaheuristic methods for the optimization of shell-and-tube heat exchangers", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 152, pp.1-17, (2021).

[5] E.M.S. El-said, A.H. Elsheikh and H.R. El-Tahan, "Effect of curved segmental baffle on a shell and tube heat exchanger thermo hydraulic performance: Numerical investigation", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 165, pp. 1-13, (2021).

[6] T. Cong, R. Zhang, W. Tian, G.H. Su and S. Qiu, "Analysis of Westinghouse MB2 test using the Steam-generator Thermo hydraulics Analysis code STAF", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 85, pp. 127-136, (2015).

[7] A.S. Ambekar, R. Sivakumar, N. Anantharaman and M. Vivekenandan, "CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations", *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 999-1007, (2016).

[8] H. Uosofvand and A.A. Abbasian Arani, "Shell and tube heat exchanger's performance improvement employing hybrid segmental–helical baffles and ribbed tubes combination", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43 (399), pp. 1-15, (2021).

[9] D. Wang, K. Wang, Y. Wang, C. Bai and M. Liu, "Numerical and Experimental Investigation of the Shell Side Characteristics of the Trefoil-Hole Baffle Heat Exchanger", *Heat Transfer Research*, vol. 48, pp. 81-95, (2017).

[10] A.E. Maakoul, A. Laknizi, S. Saadeddine, M.E. Metoui, A. Zaite, M. Meziane and A.B. Abdellah, "Numerical comparison of shell-side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole, helical and segmental baffles", *Applied Thermal Engineering*, vol. 109, pp. 175-185, (2016).

[11] Y. Sun, X. Wang, R. Long, F. Yuan and K. yang "Numerical Investigation and Optimization on Shell Side Performance of A Shell and Tube Heat Exchanger with Inclined Trefoil-Hole Baffles", *Energies*, 12(21), 4138, (2019).

[12] S. Wang, J. Xiao, J. Wang, G. Jian, J. Wen and Z. Zhang, "Configuration optimization of shell-and-tube heat exchangers with helical baffles using multi- Objective genetic algorithm based on fluid-structure interaction", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 85, pp. 62-69, (2017).

[13] X. Zhang, D. Han, W. He and C. Yue, "Numerical simulation on a novel shell-and-tube heat exchanger with screw cinquefoil orifice baffles", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9(8), pp 1-12, (2017).

[14] Z. Xu, Y. Guo, H. Mao and F. Yang, "Configuration Optimization and Performance Comparison of STHX-DDB and STHX-SB by A Multi-Objective Genetic Algorithm", *Energies*, 12(9), 1794, (2019).

[15] S. Jena, P. Patro and S.S. Behera, "Multi-Objective Optimization of Design Parameters of a Shell &Tube type Heat Exchanger using Genetic Algorithm", *International Journal of Current Engineering and Technology* , vol. 3, no. 4, (2013).

[16] S. Sanaye and H. Hajabdollahi, "Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 1937-1945, (2010).

[17] H. Bayram and G. Sevilgen, "Numerical Investigation of the Effect of Variable Baffle Spacing on the Thermal Performance of a Shell and Tube Heat Exchanger", *Energies*, 10(12), 2181, (2017).

[18] T. Du and W. Du, "Characteristics of flow and heat transfer of shell-and-tube heat exchangers with overlapped helical baffles", *Frontiers of Engineering Management*, vol. 6(1), pp. 70–77, (2019).

[19] L. Ma, K. Wang, M. Liu, D. Wang, T. Liu, Y. Wang and Z. Liu "Numerical study on performances of shell-side in trefoil-hole and quatrefoil hole baffle heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, pp. 1444-1455, (2017).

[20] D. Wang, H. Wang, J. Xing and Y. Wang “Investigation of the thermal-hydraulic characteristics in the shell side of heat exchanger with quatrefoil perforated plate”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 159, 106580, (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

Investigating the Impact of Tibia Bone Heterogeneity on Natural Frequency using Modal Test and Finite Element Modeling

Research Article

Hamid Dehghan Tarzjani[1], Mohammad Ali Nazari[2], Mohammad Mahjoob[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.78480.1135

1. Introduction

Natural frequencies and mode shapes of bone can be predicted using numerical analysis and finite element modeling, and measured and validated by modal testing of laboratory samples. These vibration characteristics are widely used in clinical diagnostics.

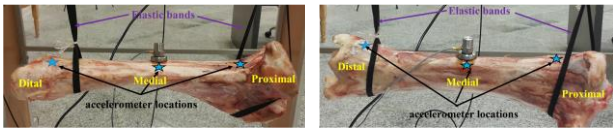
Bone heterogeneity in finite element models affects its natural frequency. Most previous studies have assumed the bone material to be homogeneous. Although a few of them have considered bone to be heterogeneous, the impact of this assumption on the vibration characteristics of bone has not been studied much.

This research tries to answer the questions about the accuracy required for a finite element model to predict the natural frequencies of the tibia bone and the effect of bone heterogeneity in finite element models. Another problem this study tries to focus is, for assigning the elastic modulus of bone material in the heterogeneous model, which density-elasticity relationship proposed in previous studies can predict a more accurate natural frequency for bone.

A cow tibia bone was prepared and subjected to modal test. The experimental results of the modal test were compared with the results of the 3D finite element model created from the bone CT scan images. Inhomogeneity based on the proposed density-elasticity relationships was applied element by element (continuous) and regionally based on a tolerance (discrete) in the model. Comparing the results of heterogeneous models with experimental results shows that the first five frequencies, a discrete heterogeneous model with 20 regions, can predict the natural frequencies with an error of less than 2%.

2. Method

The tibia bone sample was hung by elastic bands in two positions, anterior-posterior and lateral-medial, and was knocked by impact hammer in three different directions: vertical Y, horizontal X, and longitudinal Z in the proximal and distal positions of the bone. In each test, the position of the accelerometer was changed between three different points: proximal, distal, and medial. Figure 1 shows the position of the accelerometer mounted on the bone. Graphs of frequency response and phase difference functions were obtained and the first five identifiable natural frequencies of the tibia bone were calculated by the peak picking method.



(a) (b)

Figure 1. Position of the accelerometer on the bone: (a) Anterior-posterior; (b) Lateral-medial position of the sample

The tibia bone was scanned using a GE Hi-Speed Single Slice CT Scan Machine. In the imaging, the thickness of the slices was 1 mm and the pixel resolution was 1280 x 1024. A three-dimensional geometric model of the sample was created using CT scan images and Mimics software, with appropriate separation and thresholding for the Hounsfield unit. Figure 2 shows the 3D geometric model created in Mimix software.

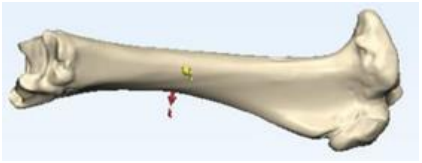


Figure 2. 3D geometric model of tibia bone in Mimics software

The intensity of grayness of CT images, which is characterized by CT numbers or Hunsfield units (HU), can be linearly related to tissue density in living tissues. The following three common Hounsfield -density relationships have been proposed for bone in previous research, where ρ_{eff} is the effective density of bone.

$$\rho_{eff}(kg/m^3) = 0.523HU + 1000 \quad (1)$$

$$\rho_{eff}(kg/m^3) = 0.464HU + 1000 \quad (2)$$

$$\rho_{eff}(kg/m^3) = 0.635HU + 1000 \quad (3)$$

*Manuscript received: August 28, 2022. Revised November 6, 2022, Accepted, February 19, 2022.

[1]. Corresponding author. PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. **Email**: h.dehghan.t@ut.ac.ir

[2]. Assistant Professor, Department of Biomechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

[3]. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Member of the Center for Advanced Orthopedic Studies, Harvard Medical School, USA.

Various mechanical tests of previous studies have shown that there is an exponential relationship between bone density and elastic modulus. The following relationships are three important density-elastic modulus relationships. in which the density is in gr/cm^3

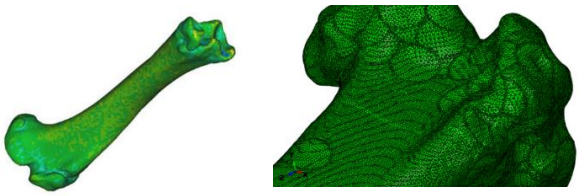
$$E(GPa) = 3.79\rho_{app}^{3} \quad (4)$$

$$E(GPa) = 3.26\rho_{app}^{2.29} \quad (5)$$

$$E(GPa) = 6.85\rho_{app}^{1.49} \quad (6)$$

After creating the geometric model, the material properties are assigned to the model in Mimics software. By using the lowest and highest Hounsfield units in the bone CT image, the range of bone density changes can be obtained. Now this interval can be divided into a specific number of region. In this way, the discrete heterogeneous model of the bone is created.

After segmenting and assigning properties to the regions of the model in Mimix, the model was entered into Abaqus and based on the same regions in Mimix, it was transferred to Abaqus. By meshing the model in Abaqus with second-order tetrahedral elements of C3D10 type, natural frequencies and mode shapes were determined. Following the mesh sensitivity analysis, the optimal mesh size was obtained. The number of optimal elements is 432782. Figure 3 shows the bone model with assigned materials in Mimics and the finite element model of heterogeneous bone in Abaqus.



(a) (b)

Figure 3. a) The bone model with assigned materials in Mimics. b) The finite element model of heterogeneous bone in Abaqus

4. Results and discussion

After the bone modal test, all 36 frequency response graphs were transferred to MATLAB and drawn. Figure 4 shows two examples of bone frequency response functions drawn in MATLAB.

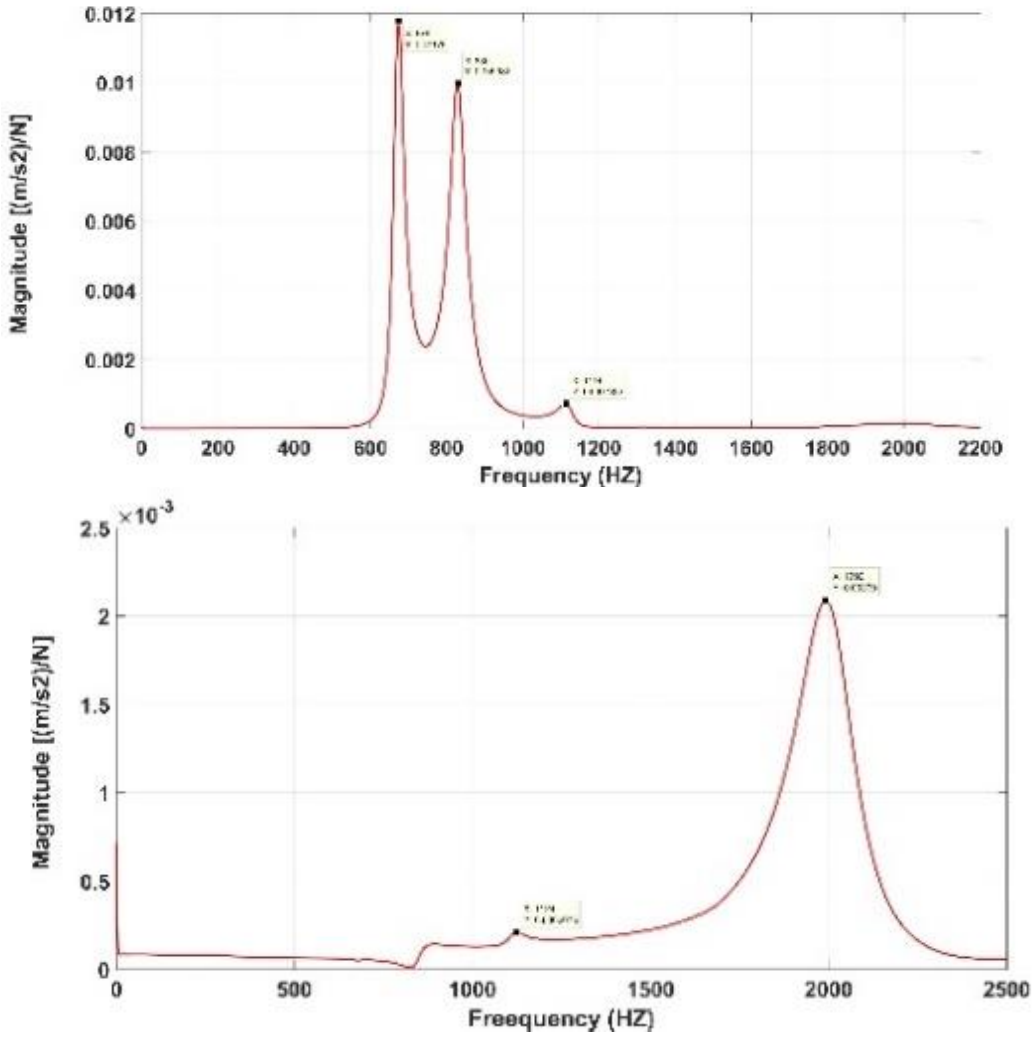


Figure 4. Two examples of bone frequency response functions drawn in MATLAB

Table 1. The first five frequencies of each of the homogeneous, discrete heterogeneous, and continuous heterogeneous models

The position of the sample	the impact direction Hammer	first freq.	Sec. freq.	third freq.	fourth freq.	fifth freq.
Anterior - posterior	axis Y	663	832	……	……	……
	axis X	674	830	1114	……	……
	axis Z	……	……	1125	……	1992
lateral-middle	axis Y	658	……	……	……	……
	axis X	658	833	……	……	……
	axis Z	670	844	……	1711	……
Mean value and standard deviation		665± 7/2	835± 6/3	1120 ±7/8	1711	1992

Table 2. The first five frequencies of the discrete heterogeneous model based on the number of regions

Density-elasticity relationship	Bone model	Bone natural frequencies (Hz)				
		First freq.	Second freq.	Third freq.	Fourth freq.	Fifth freq.
……	Homogenous	795	995	1492	2502	2944
Carter and Hayes	Discrete heterogeneous (40 regions)	672	847	1129	1717	1999
Keller		683	857	1151	1955	2229
Morgan		688	864	1225	2328	2537
Carter and Hayes	Continuous heterogeneity (432782 regions)	670	845	1127	1715	1995
Keller		681	856	1149	1952	2224
Morgan		685	860	1220	2322	2530
Modal test		665	835	1120	1711	1992

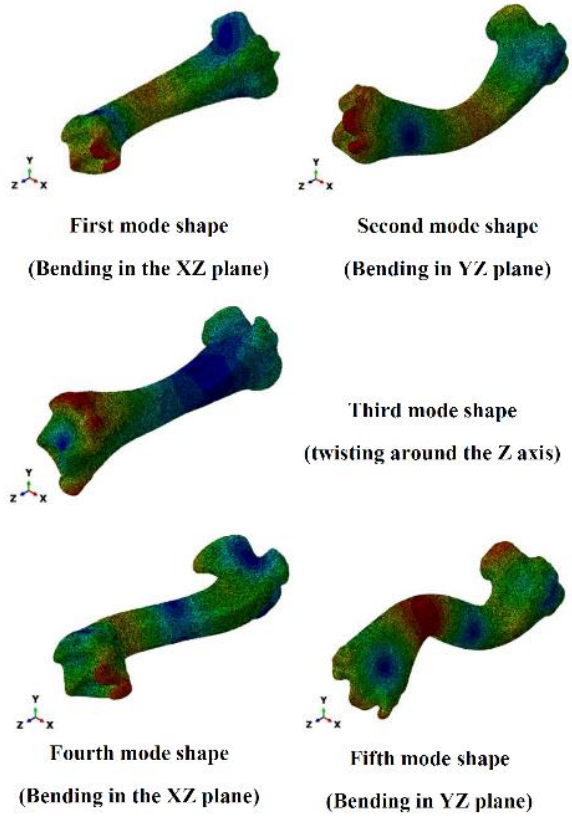


Figure 5. The first five mode shapes of the tibia bone

By solving each of the homogeneous, discrete heterogeneous and continuous heterogeneous finite element models, the first five non-zero frequencies of each model are listed in Table 1. Moreover, Figure 5 shows the first five mode shapes of bone. It can be seen that the values of the natural frequencies obtained according to the density-elasticity relationship of Carter and Hayes are closer to the natural frequencies obtained from the modal test with an error of less than 1%.

Moreover, Table 2 shows the first five frequencies of the discrete heterogeneous model based on the number of regions of the model. The results show that when the number of regions in the model exceeds 20, the difference of the frequencies obtained from the finite element models with the results of the modal test of bone decreases to below 1%

5. Conclusion

The results of this research show that although the use of continuous inhomogeneous models can probably give more accurate results in static analyses such as stress and strain analysis, in vibration analysis and natural frequencies of bone, a simpler discrete inhomogeneous model with 20 sections can obtain natural frequencies close to experimental values (less than 1% error) with less cost and shorter time.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ،۳۵، ۱۴۰۲. (۹۶-۷۷)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

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

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

بررسی تأثیر ناهمگنی استخوان تیبیا بر فرکانس طبیعی به کمک تست مودال و مدل‌سازی اجزای محدود*

مقاله پژوهشی

حمید دهقان طرزجانی[۱] محمد علی نظری[۲] محمد محجوب[۳]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.78480.1135

چکیده *فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای استخوان به طور گسترده در تشخیص بهبود شکستگی استخوان، بازسازی مجدد استخوان، تشخیص پوکی استخوان و برهم کنش ایمپلنت و استخوان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مشخصه‌ها را می‌توان با استفاده از تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی اجزای محدود تخمین زده و با تست مودال نمونه‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری و صحه‌گذاری نمود. ناهمگنی استخوان در مدل‌های اجزای محدود بر فرکانس طبیعی آن تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق تأثیر ناهمگنی استخوان و روابط چگالی-الاستیسیته بر فرکانس طبیعی استخوان و دقت تخمین آنها بررسی شده است. یک استخوان تیبیا گاوی تهیه و مورد تست مودال قرار گرفت. نتایج تجربی تست مودال با نتایج مدل اجزای محدود سه بعدی ایجاد شده از روی تصاویر سی تی اسکن استخوان، مقایسه گردید. ناهمگنی بر مبنای روابط چگالی-الاستیسیته پیشنهادی به صورت المان به المان (پیوسته) و به صورت ناحیه‌ای بر مبنای یک تلرانس (گسسته) در مدل اعمال شد. مقایسه نتایج مدل‌های ناهمگن با نتایج تجربی نشان می‌دهد که تفاوت بسیار کمی بین فرکانس‌های طبیعی مدل‌های ناهمگن گسسته و پیوسته وجود دارد. بطوریکه برای پنج فرکانس اول، یک مدل ناهمگن گسسته با ۲۰ ناحیه، می‌تواند فرکانس‌های طبیعی را با خطای کمتر از ۲درصد و صرف هزینه و زمان کمتر پیش بینی نماید.*

واژه‌های کلیدی فرکانس طبیعی، شکل مود، استخوان تیبیا، ناهمگنی استخوان، تست مودال ، اجزای محدود.

Investigating the Effect of Tibia Bone Heterogeneity on Natural Frequency Using Modal Test and Finite Element Modeling

Hamid Dehghan Tarzjani Mohammad Ali Nazari Mohammad Mahjoob

Abstract *The natural frequencies and mode shapes of bone are widely used in the diagnosis of bone fracture healing, bone remodeling, osteoporosis diagnosis, and implant-bone interaction. These characteristics can be estimated using numerical analysis and finite element modeling and measured and validated by modal testing of laboratory samples. Bone heterogeneity in finite element models affects its natural frequency. In this research, the effect of bone heterogeneity and density-elasticity relationships on the natural frequency of bone and the accuracy of their estimation have been investigated. A cow tibia bone was prepared and subjected to modal test. The experimental results of the modal test were compared with the results of the 3D finite element model created from the bone CT scan images. Inhomogeneity based on the proposed density-elasticity relationships was applied element by element (continuous) and regionally based on a tolerance (discrete) in the model. Comparing the results of heterogeneous models with experimental results shows that there is very little difference between the natural frequencies of discrete and continuous heterogeneous models. So, for the first five frequencies, a discrete heterogeneous model with 20 regions can predict the natural frequencies with an error of less than 2% with less cost and shorter time.*

Key Words Natural Frequency, Mode Shapes, Tibia Bone, Bone Heterogeneity, Modal Test, Finite Elements.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۶/۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۱/۳۰ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران. **Email:** h.dehghan.t@ut.ac.ir

(۲) استادیار، گروه بیومکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، عضو مرکز مطالعات ارتوپدی پیشرفته، دانشکده پزشکی هاروارد، آمریکا.

مقدمه

ویژگی‌های ارتعاشی استخوان، همچون فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها، را می‌توان با استفاده از تحلیل‌های عددی و مدل‌سازی اجزای محدود پیش‌بینی و به کمک تست مودال نمونه‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری و صحه‌گذاری نمود. این ویژگی‌های ارتعاشی به طور گسترده در تشخیص‌های بالینی همچون ترمیم شکستگی استخوان [1]، بازسازی مجدد استخوان [2]، تشخیص پوکی استخوان [3]، و بررسی برهم‌کنش ایمپلنت و استخوان [4] مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مدل‌سازی اجزای محدود به شکل وسیعی جهت مدل‌سازی و مطالعه رفتار ارتعاشی استخوان مورد استفاده قرار می‌گیرد. به کمک تست مودال روی نمونه‌های مصنوعی، انسانی و حیوانی، این مدل‌ها اعتبارسنجی و به‌روزرسانی می‌شوند. به عنوان مثال گو و همکاران [5,6] با ایجاد یک مدل اجزای محدود سه بعدی صحت سنجی‌شده، شامل مهره‌های بخش کمری، ستون فقرات، دیسک‌های بین مهره‌ای و رباط‌ها به تحلیل جراحات حاصل از ارتعاشات بدن روی دیسک‌های بین مهره‌ای پرداختند. وردنلی و همکاران [7] با تهیه یک استخوان مصنوعی کامپوزیتی و با خواص نزدیک به استخوان تیبیا، آن را مورد تست مودال قرار داده و با ایجاد یک مدل اجزای محدود، به کمک نتایج تست، آن را اعتبار سنجی نمودند. سپس به کمک این مدل به تأثیر آتل‌بندی روی رفتار استخوان تحت بارهای دینامیکی و ارتعاشی پرداختند. لین و همکاران [8] یک نمونه جسدی از فک پایین انسان را مورد تست ضربه چکش قرار داده و با تهیه یک مدل اجزای محدود از نمونه، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی را بدست آورده و اعتبار آنها را با نتایج تجربی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که صدمات وارد بر فک در تصادفات شدید بیشتر در محل حداکثر دامنه مودهای بالای ارتعاشی رخ می‌دهد تا در موقعیت حداکثر تنش. پاستراو و همکاران [9] تست مودال و مدل اجزای محدود یک نمونه مصنوعی استخوان ران به همراه ایمپلنت را تحت مقادیر مختلفی از سطح تماس بین استخوان و ایمپلنت بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با کم شدن میزان سطح تماس بین استخوان و ایمپلنت فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد و لذا تشدید سریعتر رخ می‌دهد. هوباتو و همکاران [10] به تحلیل مودال استخوان ساق پای انسان و تعیین فرکانس طبیعی، شکل مودها و نسبت میرایی پرداخته‌اند. در این پژوهش نتایج حاصل از تست مودال و تحلیل مودال یک مدل اجزای محدود سه بعدی از استخوان ساق پای انسان مقایسه شده‌اند. اختلاف فرکانس‌های طبیعی آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود حدود ۳٪ می‌باشد. در کلیه این مدل‌ها استخوان‌ها همسانگرد و همگن فرض شده‌اند. بدیز و همکاران [11] دو نمونه تیبیا انسانی یخ زده یکی تر و دیگری خشک را مورد تست مودال قرار داده و فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی را تعیین کردند. نتایج نشان می‌دهد نمونه خشک دارای فرکانس‌های طبیعی بالاتر و نسبت میرایی پایین‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش میزان پوکی استخوان (از نمونه تر به نمونه خشک) فرکانس‌های طبیعی استخوان بالا رفته و نسبت میرایی آن کاهش می‌یابد که می‌تواند در تشخیص پوکی استخوان کمک کند. این پژوهش صرفا یک پژوهش آزمایشگاهی بدون مدل‌سازی بوده است.

دسته‌ای دیگر از مدل‌ها با اضافه کردن ناهمگنی یا ناهمسانگردی، تأثیر آنها را بر نتایج مدل‌سازی تحقیق نموده و مدل مناسب برای تأثیر ناهمگنی را پیشنهاد نموده‌اند. تیلور و همکاران [12] یک نمونه جسدی از استخوان ران را مورد تست مودال قرار داده و به کمک تصاویر سی‌تی نمونه، یک مدل اجزای محدود ناهمسانگرد ایجاد کرده و فرکانس‌های طبیعی مدل را با فرض خواص ارتوتروپیک برای استخوان تعیین نمودند. از مقایسه فرکانس‌های طبیعی تجربی با نتایج عددی، ثابت‌های الاستیک اورتوتروپیک ماده استخوان را تعیین کرده و با مقادیر این ثابت‌ها که با روش اولتراسونیک در پژوهش‌های قبلی بدست آمده است، مقایسه نمودند. شولز و همکاران [13] اعتبارسنجی روابط بین مدول الاستیک با یکای هانسفیلد، برای یک مدل اجزای محدود از استخوان لگن را به کمک تحلیل مودال بررسی و نتایج را با تست مودال پژوهش‌های قبلی مقایسه نمودند. آنها دریافتند که رابطه چگالی–الاستیسیته مورگان و همکاران [14] برای استخوان لگن نزدیکترین فرکانس طبیعی را به نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند. ورنر و همکاران [15] با تست مودال به کمک ارتعاش سنج لیزری، فرکانس‌های طبیعی استخوان لگن را بدست آوردند. آنها با ایجاد یک مدل اجزای محدود از تصاویر

سی‌تی نمونه، روابط چگالی- الاستیسیته مختلف را جهت تخصیص خواص مواد استخوان به مدل بررسی نمودند. آنها با بررسی سه مدل مختلف و تغییر رابطه چگالی با یکای هانسفیلد به یک رابطه چگالی- الاستیسیته مناسب رسیدند. از آنجا که رابطه چگالی با یکای هانسفیلد را ثابت نگرفته‌اند لذا رابطه الاستیسیته برحسب چگالی به دست آمده قابلیت تعمیم ندارد. هنیس و همکاران [16] به مطالعه تأثیر چگالی و هندسه استخوان بر فرکانس‌های طبیعی به کمک مدل اجزای محدود استخوان لگن کامپوزیتی با استناد به تست مودال پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که تفاوت بین نتایج مدل و آزمایش ناشی از فرض همسانگردی در مدل بوده است در حالیکه نمونه مصنوعی از یک ماده ارتوتروپ ساخته شده است. مقدم و همکاران [17] یک نمونه ران گاو را به کمک تست ضربه چکش مورد تست مودال قرار داده و با ایجاد یک مدل اجزای محدود سه بعدی از نمونه به کمک تصاویر سی‌تی اسکن، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی را بدست آوردند. آنها یک مدل بهینه برای تخصیص خواص ناهمگنی استخوان ران پیشنهاد کرده و نشان دادند که با این رابطه تفاوت فرکانس‌های طبیعی مدل و تست مودال، حداقل می‌شود.

با برر سی پژوهش‌های یاد شده م شخص می شود که تأثیر میزان دقت ناهمگنی ماده اســـتخوان بر فرکانس‌های طبیعی آن چندان مورد مطالعه قرار نگرفته اســـت. تحقیق حاضـــر به دنبال پاســـخ دادن به پرســـش هایی پیرامون د قت مورد نیاز برای مدل سازی ناهمگنی در مدل‌های اجزای محدود جهت پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی استخوان تیبیا می‌باشد. از جمله پر سش‌های مطرح، اثر ناهمگنی استخوان در مدل‌های اجزای محدود و دامنه تأثیر آن بر فرکانس‌های طبیعی اســـت. بالا بردن دقت ناهمگنی ا ستخوان مستلزم ایجاد مدل‌های اجزای محدود دقیقتر ا ست که خود هزینه محاسباتی و مدت زمان حل را افزایش می‌دهد.

در اینجا لازم است دقت مدل‌سازی ناهمگنی ماده استخوان تشریح شود. فرض کنیم چگالی متراکم ترین نقطه و کم تراکم ترین نقطه استخوان را به ترتیب چگالی حداکثر و چگالی حداقل ماده استخوان بنامیم. حال در نرم‌افزار میمیکس این بازه حداکثر و حداقل چگالی را مثلا به ۱۰ زیر بازه مساوی تقسیم کرده و میانگین چگالی هر زیر بازه را به آن بازه تخصیص داده و هر کدام از این چگالی‌های میانگین را با یک رنگ مشخص می‌کنیم. اکنون کل ماده استخوان بر اساس اینکه، چگالی هر قسمتش در کدام یک از بازه‌های ده گانه فوق قرار می‌گیرند، به طیفی از ده رنگ مختلف درمی‌آید. بدین ترتیب به جای اینکه همه استخوان دارای یک چگالی باشد (فرض همگن بودن ماده استخوان) داری ده عدد مختلف چگالی است که در سراسر استخوان پخش شده است. بنابراین یک مدل ناهمگن ده ناحیه‌ای ایجاد می‌شود. حال اگر تعداد تقسیمات را در نرم‌افزار میمیکس بیست در نظر بگیریم، بدیهی است همه استخوان دارای بیست عدد چگالی مختلف خواهد بود که در سراسر استخوان توزیع شده است. پر واضح است که هر چه تعداد تقسیمات بازه چگالی بیشتر باشد، مدل‌سازی ناهمگنی استخوان دقیقتر خواهد بود. اکنون این سوال مطرح می‌شود که تا چه اندازه باید تعداد این تقسیمات را بالا برد تا فرکانس‌های طبیعی استخوان با یک مقدار خطای قابل قبول (مثلا کمتر از ۵ درصد) به فرکانس‌های حاصل از تست مودال استخوان نزدیک شود. از آنجایی که بالا بردن دقت ناهمگنی ماده استخوان، هزینه محاسبات و مدت زمان حل مدل را افزایش می دهد، تعیین اندازه دقت یاد شده بسیار مهم می‌باشد که مهمترین هدف این پژوهش است. سوال دیگری که پیش می آید این است که برای تخصیص مدول الاستیک ماده استخوان در مدل ناهمگن، کدام رابطه چگالی-الاستیسیته پیشنهاد شده، در پژوهش‌های قبلی، می‌تواند فرکانس طبیعی دقیق‌تری را برای استخوان به ارمغان بیاورد؟

در این راستا فرکانس‌های طبیعی یک نمونه استخوان تیبیای گوساله تازه ذبح شده با استفاده از تست مودال در حالت شرایط مرزی دو سر آزاد اندازه‌گیری شده‌اند و به کمک تصاویر سی‌تی تهیه شده از این نمونه، یک مدل هندسی سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار میمیکس ایجاد شده است. در تصاویر سی‌تی ، نقاطی شدت رنگ خاکستری بیشتر و نقاطی شدت رنگ خاکستری کمتری دارند. این شدت خاکستری بودن با معیار یکای هانسفیلد بیان می‌شود. تحقیقات نشان داده است که بین میزان شدت خاکستری بودن تصویر سی‌تی یعنی یکای هانسفیلد با چگالی جرمی ماده استخوان، رابطه خطی برقرار است. بنابراین با داشتن

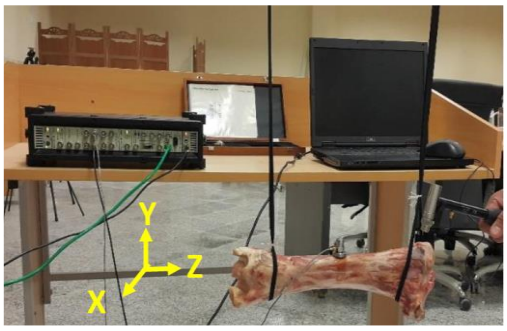
کمترین و بیشترین یکای هانسفیلد در تصویر سی‌تی استخوان می‌توان بازه تغییرات چگالی استخوان را بدست آورد. حال می‌توان این بازه را به تعداد مشخصی بخش تقسیم نمود (۵ یا ۱۰ یا ۲۰ و ...). هر چه تعداد تقسیمات بیشتر باشد توزیع ناهمگنی ماده استخوان دقیقتر خواهد بود. بدین ترتیب مدل ناهمگن گسسته استخوان ایجاد می‌شود. در مدل ناهمگن پیوسته، پس از مش بندی مدل بر اساس نوع المان اجزای محدود آن (المان تتراهدرال) با داشتن مختصات هر گره از هر المان می‌توان یکای هانسفیلد هر گره را بدست آورد. با میانگین گرفتن یکای هانسفیلد گره‌های هر المان، یک یکای هانسفیلد برای هر المان بدست آمده و به همان المان تخصیص داده می‌شود. با توجه به رابطه خطی یکای هانسفیلد با چگالی می‌توان برای هر المان یک چگالی داشت. به این ترتیب مدل ناهمگن پیوسته در واقع یک مدل ناهمگن گسسته است که تعداد تقسیمات بازه یکای هانسفیلد آن به تعداد المان های مدل مشبندی شده است که می‌تواند تا چند صد هزار هم برسد. همچنین به کمک روابط چگالی–الاستیسیته پیشنهاد شده در تحقیقات پیشین، در نرم‌افزار میمیکس، مدول الاستیک هر زیر بازه تعیین و به آن بازه اختصاص یافته است. با تغییر تعداد تقسیمات زیر بازه‌ها در مدل اجزای محدود، دقت ناهمگنی استخوان بر فرکانس طبیعی، بررسی شده است. برای مقایسه مدل‌های ناهمگن استخوان با مدل همگن، استخوان با خواص ماده همگن پیشنهاد شده در پژوهش‌های پیشین، مدل‌سازی شده و فرکانس‌های طبیعی آن محاسبه شده‌اند. پس از مدل‌سازی، پنج فرکانس اول و شکل مودهای ارتعاشی مدل‌های استخوان همگن، ناهمگن گسسته و ناهمگن پیوسته تعیین و با مقادیر حاصل از تست مودال آزمایشگاهی نمونه واقعی استخوان مقایسه شده‌اند.

روش

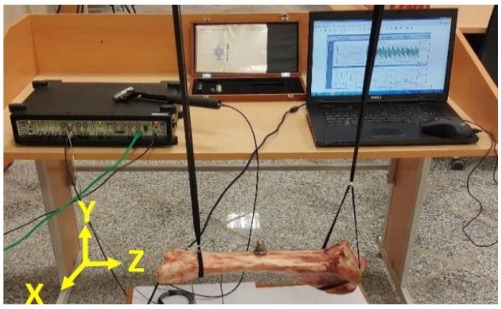
یک اســـتخوان تیبیا بدون هیچ گونه بافت نرم، از گوســـاله نر ۶ ماهه، سالم و تازه ذبح شده از کشتارگاه تهیه شده و مورد تست مودال قرار گرفته اســـت. در این بخش ابتدا چیدمان و روش تست مودال استخوان توضیح داده می شود. سپس مشخصات مدل اجزای محدود، هندسه و خواص آن ارائه می‌گردد.

تست مودال

نمونه استخوان تیبیا با استفاده از دو نوار ارتجاعی تعلیق شده و آزمایش ضربه چکش به کمک چکش B&K 8206 ، شتاب‌سنج DJB A/120/V و دیتالاگر IDAE Frame Type 3560C B&K انجام شده است. شتاب‌سنج‌ها به کمک چسب ۱۲۳ میتراپل مدل BK-4002 روی سطح تمیز شده استخوان چسبانده شده‌اند. استخوان تیبیا در دو وضعیت قرارگیری قدامی–خلفی و جانبی–میانی توسط نوارهای ارتجاعی آویزان شده و به کمک چکش ضربه در سه جهت مختلف قائم Y، افقی X و طولی Z در موقعیت‌های پروگزیمال و دیستال استخوان مورد ضربه قرار گرفته است. در هر یک از حالت‌های تست، موقعیت نصب شتاب‌سنج بین سه نقطه مختلف پروگزیمال، دیستال و مدیال تغییر کرده است. شکل (۱) چیدمان آزمایش را در دو وضعیت مختلف قرارگیری استخوان نشان می‌دهد.



(الف)

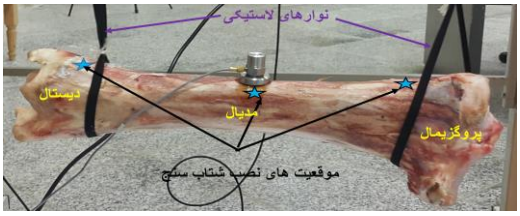


(ب)

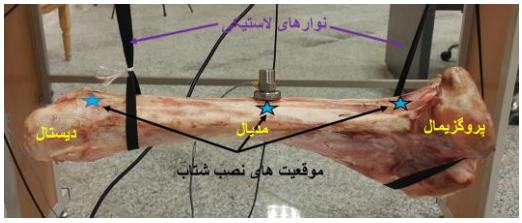
شکل ۱ چیدمان تست مودال در دو وضعیت قرارگیری مختلف استخوان، (الف) وضعیت قدامی–خلفی و (ب) وضعیت جانبی– میانی

شکل (۲) موقعیت شتاب‌سنج نصب شده بر روی استخوان را نشان می‌دهد. در مجموع ۳۶ آزمایش مودال در نقاط مختلف ضربه، جهات مختلف ضربه و نقاط متفاوت نصب شتاب‌سنج،

انجام شده است. در هر یک از آزمایش‌ها، پنج ضربه چکش موفق اعمال و میانگین‌گیری شده است. سپس با نرم‌افزار پالس لب‌شاپ (PULSE Labshop)، نمودارهای توابع پاسخ فرکانسی و اختلاف فاز بدست آمده و پنج فرکانس طبیعی اول قابل شناسایی استخوان تیبیا با روش قله‌یابی (peak picking) محاسبه شده است. به طور کلی در نمودار توابع پاسخ فرکانسی ملاحظه می شود که در برخی از فرکانس‌ها، دامنه ارتعاشات مشخصا بیشتر از دامنه ارتعاشات نقاط مجاور خود می‌باشد. این فرکانس‌ها نشان دهنده فرکانس‌های طبیعی و حالت تشدید سیستم ارتعاشی است. روش قله‌یابی روشی ساده برای شناسایی پارامترهای مودال شامل فرکانس‌های طبیعی، نسبت میرایی و شکل مودهای ارتعاشی است. اگر چه این روش تقریبی است ولی برای سیستم‌های ارتعاشی که فرکانس‌های طبیعی آنها کاملا تفکیک شده و از هم فاصله دارند، با تقریب خوبی قابل استفاده است [18]. از آنجایی که هدف این پژوهش بررسی اثرات میرایی استخوان نبوده است تنها با پیدا کردن قله‌ها در نمودارهای توابع پاسخ فرکانسی، و به کمک نمودارهای اختلاف فاز و اینکه در فرکانس تشدید دامنه‌های تشدید و فاز آنها چگونه هستند، پنج فرکانس‌طبیعی اول قابل شناسایی استخوان تعیین شده‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۲ موقعیت نصب شتاب سنج بر روی استخوان: (الف) وضعیت قدامی-خلفی، (ب) وضعیت جانبی-میانی

مدل‌سازی

امروزه به کمک تصاویر حاصل از تصویربرداری پزشکی همچون سی‌تی‌اسکن و ام‌آرآی و با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف طراحی به کمک کامپیوتر، ایجاد مدل‌های هندسی از اعضای بدن به صورت چشمگیری توسعه یافته است. تهیه مدل هندسی از استخوان به کمک تصاویر سی‌تی‌اسکن نه تنها مدلی با هندسه بسیار دقیق از استخوان به دست می دهد بلکه ساختار ناهمگن آن را به خوبی به تصویر می‌کشد.

هندسه مدل

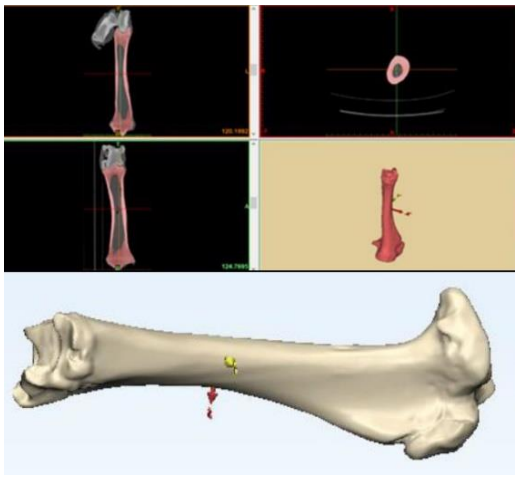
پس از آماده سازی، استخوان تیبیا با استفاده از دستگاه GE Hi-Speed Single Slice CT Scan Machine در مرکز تصویربرداری پزشکی جام جم، اسکن شده است. در تصویربرداری، ضخامت برش ها ۱ میلیمتر و رزولوشن پیکسل‌ها ۱۰۲۴ ✕ ۱۲۸۰ بوده است. شکل (۳) تصویر سی‌تی‌اسکن استخوان تیبیا را در دستگاه تصویربرداری نشان می‌دهد.

با استفاده از تصاویر سی‌تی‌اسکن و نرم‌افزار میمیکس با جداسازی و آستانه‌یابی مناسب برای یکای هانسفیلد، یک مدل هندسی سه بعدی از نمونه ایجاد شده است. شکل (۴) مدل هندسی ایجاد شده در نرم‌افزار میمیکس را نشان می‌دهد.

به دلیل کاهش هزینه محاسبات و زمان حل مدل، در این پژوهش کانال میانی مغز زرد استخوان، خالی فرض نشده است. همچنین در نواحی پروگسیمال و دیستال استخوان که بافت اسفنجی قالب است، اثر مغز قرمز در نظر گرفته نشده است. به عبارت دیگر خواص تمام بخش‌های استخوان بر حسب یکای هانسفیلد در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ تصویر سی‌تی‌اسکن استخوان تیبیا



شکل ۴ مدل هندسی سه بعدی استخوان تیبیا در نرم‌افزار میمیکس

خواص مکانیکی

مکبروم و همکاران [19] نشان دادند که تصاویر سی‌تی‌اسکن اطلاعات دقیقی در مورد خواص استخوان ارائه می‌دهد که می‌تواند در مدل‌سازی استخوان مورد استفاده واقع شود. چگالی رادیوگرافی یا شدت خاکستری بودن این تصاویر که با اعداد سی‌تی یا یکای هانسفیلد (HU) مشخص می‌شود، می‌تواند به طور خطی با تراکم بافت در بافت‌های زنده ارتباط داشته باشد. رائو و همکاران [20] رابطه‌ی (۱)، تیلور و همکاران [12] رابطه‌ی (۲) و شولز و همکاران [13] رابطه‌ی (۳) را برای ارتباط چگالی موثر ماده استخوان با یکای هانسفیلد که از تصاویر سی‌تی بدست آمده، پیشنهاد نموده‌اند. که در آن ρ_{eff} چگالی موثر (نسبت جرم نمونه تر به حجم نمونه همراه با مغز استخوان) می‌باشند.

$$\rho_{eff}(kg/m^3) = 0.523HU + 1000 \quad (۱)$$
$$\rho_{eff}(kg/m^3) = 0.464HU + 1000 \quad (۲)$$
$$\rho_{eff}(kg/m^3) = 0.635HU + 1000 \quad (۳)$$

لازم به ذکر است که برای محاسبه ضرایب در معادلات (۲) و (۳) از دو مقدار چگالی، یکی مقدار ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای آب در یکای هانسفیلد صفر و دیگری مقدار چگالی ماکزیمم استخوان فشرده نمونه مورد آزمایش به ازای بزرگترین مقدار یکای هانسفیلد موجود در تصاویر سی‌تی نمونه، استفاده می‌شود.

از سوی دیگر آزمایش‌های کششی، فشاری و خمشی زیادی بر روی نمونه‌های استخوانی حیوانات و انسان از جمله استخوان ران، تیبیا، مهره‌ها، لگن و غیره انجام شده است. اکثر آنها به دنبال یافتن رابطه بین مدول الاستیک استخوان و چگالی آن بوده‌اند. برخی از آنها روابط خطی و عمدتا توانی را برای مدول الاستیک استخوان بر حسب چگالی آن پیشنهاد کرده‌اند. هلگاسون و همکاران [21] یک پژوهش مروری بر روابط چگالی–الاستیسیته موجود انجام داده و به مقایسه آنها پرداخته‌اند. روابط (۴) ، (۵) و (۶) سه رابطه توانی مشهور چگالی– مدول الاستیک هستند.

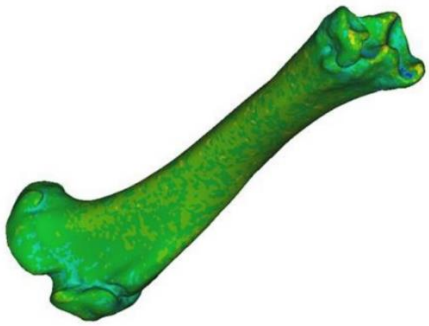
$$E(GPa) = 3.79\rho_{app}^{3} \quad (۴)\ \text{کارتر و هایس}$$
$$E(GPa) = 3.26\rho_{app}^{2.29} \quad (۵)\ \text{کلر}$$
$$E(GPa) = 6.85\rho_{app}^{1.49} \quad (۶)\ \text{مورگان}$$

که در آنها چگالی بر حسب گرم بر سانتیمترمکعب می باشد.

پس از ایجاد مدل هندسی، لازم است خواص مواد در نرم‌افزار میمیکس به مدل استخوان اختصاص داده شود. برای این منظور، استخوان به عنوان یک ماده ناهمگن به چندین ناحیه با چگالی متفاوت تقسیم می‌شود به طوری که هر ناحیه یک ماده همگن با چگالی یکنواخت خواهد بود. با داشتن کمترین و بیشترین یکای هانسفیلد در تصویر سی‌تی استخوان می‌توان بازه تغییرات چگالی استخوان را بدست آورد. حال می‌توان این بازه را به تعداد مشخصی ناحیه تقسیم نمود. هر چه تعداد تقسیمات بیشتر باشد توزیع ناهمگنی ماده استخوان دقیقتر خواهد بود. بدین ترتیب مدل ناهمگن گسسته استخوان ایجاد می‌شود. اکنون سوال کلیدی این است که چه تعداد از این تقسیم بندی‌ها مناسب است؟ برای پاسخ به این سوال، بازه حداقل و حداکثر چگالی به ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ناحیه مساوی تقسیم شده و بر اساس این تقسیم بندی‌ها مدل‌های مختلف استخوان ناهمگن تهیه گردیده است.

برای اختصاص خواص استخوان ناهمگن مانند چگالی و مدول الاستیک به مدل ، لازم است روابط چگالی– هانسفیلد و چگالی– الاستیسیته معرفی شوند. در این مطالعه از سه رابطه چگالی–هانسفیلد پیشنهاد شده توسط رائو، تیلور و شولز استفاده شده است. پس از انتقال مدل‌ها به نرم‌افزار آباکوس، با معلوم بودن حجم هر المان از مدل در نرم‌افزار آباکوس و چگالی آن که از نرم‌افزار میمیکس منتقل شده است، وزن مدل‌ها در نرم‌افزار آباکوس قابل تعیین است. وزن تخمین زده شده مدل بر پایه رابطه رائو، تیلور و شولز به ترتیب ۲۵۲/۲، ۲۶۸/۶ و ۲۵۳/۴ گرم و وزن

واقعی استخوان ۲۷۱ گرم می‌باشد. با مقایسه وزن مدل با وزن نمونه آزمایشگاهی، مشخص شد که رابطه تیلور، با ۰/۹ درصد خطا، وزن دقیق‌تری را نسبت به روابط دیگر پیش‌بینی می‌کند. علاوه بر این، سه مدل ناهمگن بر اساس سه رابطه چگالی- الاستیسیته متفاوت کارتر–هایس، کلر و مورگان توسعه داده شده است. در شکل ۵ مدل هندسی اختصاص داده شده با چهل ناحیه با توجه به رابطه چگالی–الاستیسیته کارتر و هایس نشان داده شده است. مناطق آبی رنگ دارای کمترین و نارنجی رنگ دارای بیشترین مقادیر یکای هانسفیلد (کمترین و بیشترین چگالی و مدول الاستیک) هستند.



شکل ۵ مدل ناهمگن استخوان با تخصیص چهل ناحیه مجزا برای چگالی و مدول الاستیک

برای مقایسه مدل‌های ناهمگن استخوان با مدل همگن، مدل هندسی ایجاد شده در نرم‌افزار میمیکس، بدون تقسیم بندی و تخصیص مواد، مستقیماً وارد نرم‌افزار آباکوس شده و خواص آن براساس داده‌های موجود در پیشینه پژوهش مطابق جدول (۱) تخصیص داده شده‌اند (مدل همگن). لازم به ذکر است به دلیل آنکه باید نمونه تحت تست مودال قرار می‌گرفت، عملا امکان شکستن نمونه به تکه‌های کوچک برای تعیین آزمایشگاهی چگالی این قطعات و سپس میانگین گیری از آنها، میسر نشده و از داده‌های موجود در پژوهش‌های قبلی استفاده شده است.

جدول ۱ خواص مادی استخوان همگن

چگالی(گرم/ سانتی مترمکعب)	نسبت پواسون	مدول الاستیک (گیگاپاسکال)
۱/۶۷ [25]	۰/۳ [24]	۱۹/۸ [24]

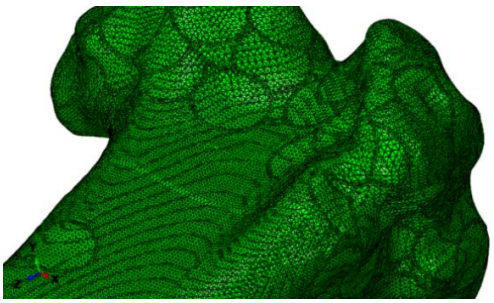
مدل سازی اجزای محدود

پس از ناحیه‌بندی و اختصاص خواص به بخش‌های تقسیم شده مدل در نرم‌افزارمیمیکس، مدل وارد نرم‌افزار آباکوس شده و بر اساس همان بخش بندی‌ها در نرم‌افزار میمیکس، به آباکوس منتقل می‌شود. مقادیر چگالی و مدول الاستیک هر بخش به دست آمده از نرم‌افزار میمیکس به صورت خودکار به قسمت‌های مختلف مدل در آباکوس اختصاص داده شده است (مدل ناهمگن گسسته). لازم به ذکر است که در این مدل ناهمگن چند ناحیه‌ای که نویسندگان آن را مدل ناهمگن گسته نامیده‌اند، هنگام انتقال مدل از نرم‌افزار میمیکس به آباکوس تمام ناحیه‌بندی به طور خودکار با حفظ خواص چگالی و مدول الاستیک خود به آباکوس منتقل می‌گردد و نیازی به تخصیص خواص ماده در نرم‌افزار آباکوس نیست.

با شبکه‌بندی مدل در آباکوس با المان‌های چهار وجهی مرتبه دوم از نوع C3D10، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای استخوان تعیین گردیده است. حل این مدل برای تعیین ۱۲ فرکانس اول (شامل ۶ مود جسم صلب و ۶ فرکانس اول غیر صفر) و شکل مودهای ارتعاشی مدل برای هر یک از سه رابطه چگالی– الاستیسیته یاد شده با رایانه (۱۶ هسته پردازنده، با حافظه ۶۴ گیگابایت) حدود یک ساعت زمان صرف شده است. برای بررسی حساسیت مدل به مش و دستیابی به تعداد المان بهینه مدل اجزای محدود، مدل برای نه اندازه مختلف المان، حل گردیده و سه فرکانس طبیعی اول استخوان در هر حالت محاسبه شده است. در شکل (۶) نمودار همگرایی مش مدل برای سه فرکانس اول استخوان ناهمگن ۴۰ ناحیه‌ای نشان داده شده است. پس از تحلیل حساسیت شبکه المانی، اندازه بهینه مشبندی مشخص شده است. تعداد المان‌های بهینه ۴۳۲۷۸۲ است. مدل اجزای محدود استخوان ناهمگن در آباکوس در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۶ نمودار حساسیت به مش مدل برای سه فرکانس اول استخوان ناهمگن



شکل ۷ مدل اجزای محدود ناهمگن استخوان تیبیا

برای پاسخ به این سوال که تعداد تقسیمات ماده استخوان در مدل ناهمگن چه تأثیری بر فرکانس‌های طبیعی آن می‌گذارد، یک مدل ناهمگن شامل ۴۳۲۷۸۲ ناحیه (به تعداد المان‌های مدل) ایجاد شده است (مدل ناهمگن پیوسته). برای این منظور ابتدا یک فایل متنی از یکای هانسفیلد مربوط به حدود ۴ میلیون نقطه از مدل استخوان به همراه مختصات آنها از نرم‌افزار میمیکس استخراج شده است. سپس به کمک نرم‌افزار متلب و بر اساس رابطه چگالی–هانسفیلد تیلور و سه رابطه چگالی– الاستیسیته کارتر–هایس، کلر و مورگان، مقادیر چگالی و مدول الاستیک این ۴ میلیون نقطه بدست آورده شده است. از طرفی با ورود مدل هندسی به نرم‌افزار آباکوس و شبکه‌بندی آن به تعداد ۴۳۲۷۸۲ المان چهار وجهی مرتبه دوم، مختصات تعدادی از گره‌های مدل (۲۱۵۷۱۳ گره) در آباکوس اخذ شده و در فایل اکسل ذخیره گردیده است. سپس با برنامه نویسی در متلب مختصات این گره‌ها با مختصات نقاط هانسفیلد دار که قبلا از نرم‌افزار میمیکس استخراج شده است مقایسه شده و برای هر گره، یکای هانسفیلد نزدیکترین نقطه منظور گردیده است. بدین ترتیب تمام گره‌های مدل، دارای یکای هانسفیلد، چگالی و مدول الاستیسیته مشخص هستند. پس از آن برای هر المان، چگالی و مدول الاستیک با میانگین‌گیری مقادیر چگالی و مدول الاستیسیته گره‌های آن المان، معلوم گردیده و بنابراین هر المان از مدل مش‌بندی شده با خواص چگالی و مدول الاستیک مشخص خود به عنوان یک بخش در آباکوس تعریف شده است.

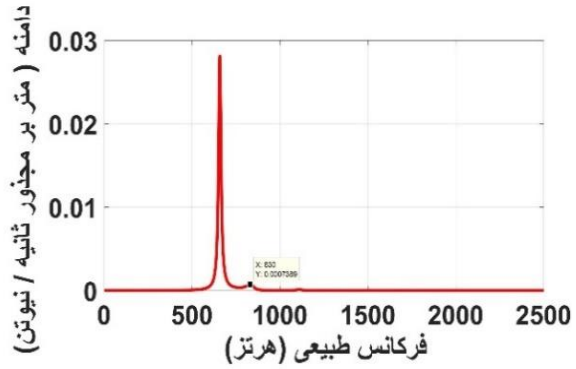
در این تحلیل لازم است برای هر المان، نرم‌افزار آباکوس، متلب را فرا خوانده و خواص آن المان را از متلب بخواند که این موضوع باعث طولانی شدن حل این مدل ناهمگن پیوسته شده است. حل این مدل برای تعیین ۱۲ فرکانس اول (شامل ۶ مود جسم صلب و ۶ فرکانس اول غیر صفر) و شکل مودهای ارتعاشی مدل برای هر یک از سه رابطه چگالی–الاستیسیته یاد شده با رایانه (۱۶ هسته پردازنده، با حافظه ۶۴ گیگابایت) حدود ۷۲ ساعت زمان برده است.

نتایج

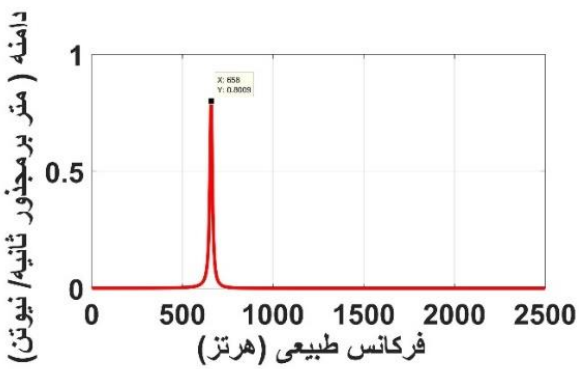
در این بخش ابتدا نتایج تست مودال نمونه استخوان تیبیا و سپس نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود استخوان ارائه می‌شود.

نتایج تست مودال

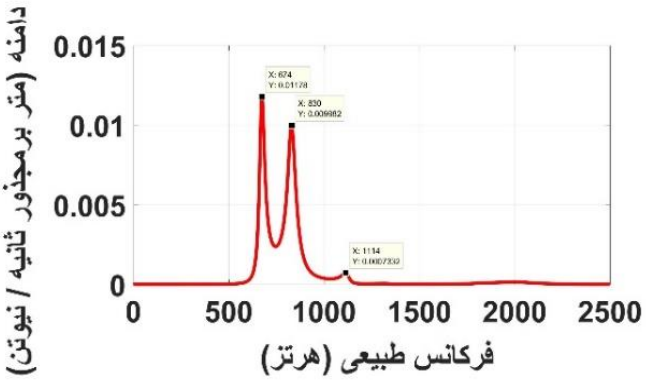
پس از تست مودال استخوان، تمام ۳۶ نمودار پاسخ فرکانسی به نرم‌افزار متلب منتقل شده و رسم گردیده‌اند. از بین ۳۶ حالت تست، تعدای مشابه هم هستند. (مثلا اعمال ضربه چکش در راستایY در وضعیت قرارگیری قدامی–خلفی، مشابه اعمال ضربه چکش در راستای X در وضعیت قرارگیری جانبی– میانی است). بنابراین تعدادی از نمودارهای پاسخ فرکانسی شبیه هم خواهند بود. شکل (۸) شش نمونه از توابع پاسخ فرکانسی غیرتکراری استخوان را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار متلب ترسیم شده‌اند. فرکانس‌های طبیعی استخوان بر حسب هرتز در ۳۶ حالت مختلف تست که از نمودارهای توابع پاسخ فرکانسی بدست آمده است، در جدول (۲) ارائه شده است. با میانگین‌گیری فرکانس‌های طبیعی که شکل مود ارتعاشی یکسانی دارند، پنج فرکانس اول قابل شناسایی استخوان بدست می‌آیند که در جدول (۳) آمده است.



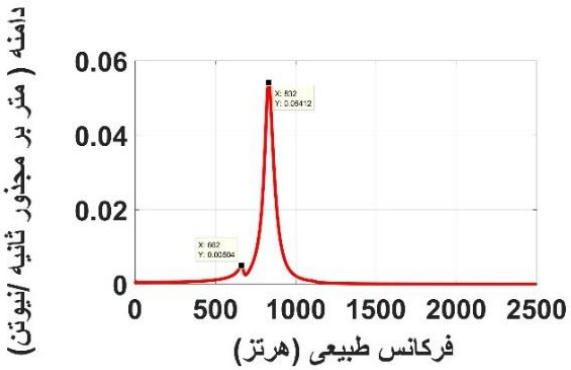
وضعیت قدامی- خلفی و ضربه در راستای محورY



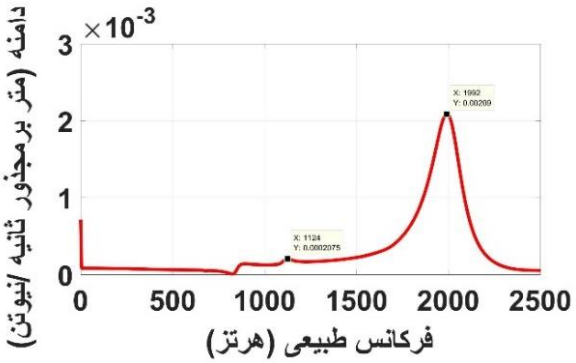
وضعیت جانبی-میانی و ضربه در راستای محورY



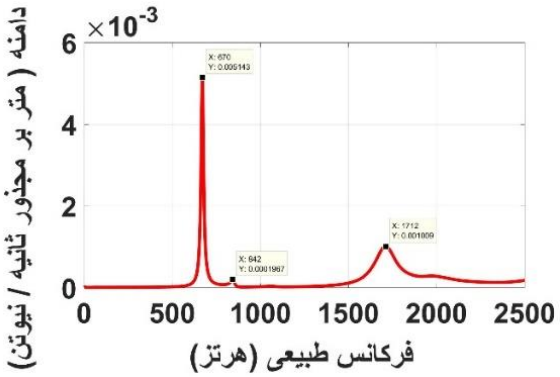
وضعیت قدامی-خلفی(ضربه در راستای محورX)



وضعیت جانبی-میانی و ضربه در راستای محور X



وضعیت قدامی- خلفی و ضربه در راستای محورZ



وضعیت جانبی-میانی و ضربه در راستای محورZ

شکل ۸ توابع پاسخ فرکانسی نمونه بر حسب جهات مختلف اعمال ضربه چکش

جدول ۲ فرکانس‌های قابل شناسایی استخوان بر حسب هرتز در ۳۶ حالت مختلف تست مودال

وضعیت نمونه	راستای ضربه چکش	پروگزیمال (ضربه پروگزیمال)	پروگزیمال (ضربه دیستال)	مدیال (ضربه پروگزیمال)	مدیال (ضربه دیستال)	دیستال (ضربه پروگزیمال)	دیستال (ضربه دیستال)
قدامی- خلفی	محور Y	۶۶۲, ۸۳۰	۶۶۲, ۸۳۰	۶۶۴, ۸۳۲	۶۶۴, ۸۳۲	۶۶۲, ۸۳۲	۶۶۲, ۸۳۲
	محور X	۶۷۴, ۸۳۰, ۱۱۱۴	۶۷۴, ۸۳۰, ۱۱۱۴	۶۷۴, ۸۳۰, ۱۱۱۴	۶۷۴, ۸۳۰, ۱۱۱۴	۶۷۴, ۸۳۰, ۱۱۱۴	۶۷۴, ۸۳۰, ۱۱۱۴
	محور Z	۱۱۲۴, ۱۹۹۲	۱۱۲۴, ۱۹۹۲	۱۱۲۶, ۱۹۹۲	۱۱۲۴, ۱۹۹۲	۱۱۲۶, ۱۹۹۲	۱۱۲۶, ۱۹۹۲
جانبی- میانی	محور Y	۶۵۸	۶۵۸	۶۵۸	۶۵۸	۶۵۸	۶۵۸
	محور X	۶۵۸, ۸۳۲	۶۵۸, ۸۳۲	۶۵۸, ۸۳۴	۶۵۸, ۸۳۲	۶۵۸, ۸۳۴	۶۵۸, ۸۳۳
	محور Z	۶۷۰, ۸۴۶, ۱۷۱۲	۶۷۰, ۸۴۴, ۱۷۱۲	۶۷۰, ۸۴۲, ۱۷۱۰	۶۷۰, ۸۴۴, ۱۷۱۲	۶۷۰, ۸۴۴, ۱۷۱۰	۶۷۰, ۸۴۴, ۱۷۱۰

جدول ۳ میانگین پنج فرکانس اول قابل شناسایی استخوان بر حسب هرتز

وضعیت قرارگیری نمونه	جهت ضربه چکش	فرکانس اول	فرکانس دوم	فرکانس سوم	فرکانس چهارم	فرکانس پنجم
قدامی- خلفی	محور Y	۶۶۳	۸۳۲	.....	.....	.....
	محورX	۶۷۴	۸۳۰	۱۱۱۴	.....	.....
	محورZ	.....	.....	۱۱۲۵	.....	۱۹۹۲
جانبی- میانی	محور Y	۶۵۸	.....	.....	.....	.....
	محورX	۶۵۸	۸۳۳	.....	.....	.....
	محورZ	۶۷۰	۸۴۴	.....	۱۷۱۱	.....
مقدار میانگین و انحراف معیار		۶۶۵±۷/۲	۸۳۵±۶/۳	۱۱۲۰± ۷/۸	۱۷۱۱	۱۹۹۲

جدول ۴ مقادیر حداکثر و حداقل یکای هانسفیلد، چگالی و مدول الاستیک نواحی مختلف استخوان

		حداقل	حداکثر
یکای هانسفیلد استخوان		-۱۰۱۸	۱۹۷۰
چگالی استخوان (کیلوگرم بر مترمکعب)	رابطه رائو	۴۶۷/۶	۲۰۳۰/۳
	رابطه تیلور	۵۲۷/۷	۱۹۱۴/۱
	رابطه شولز	۳۵۳/۶	۲۲۵۱/۰
مدول الاستیک استخوان (گیگا پاسکال) طبق رابطه چگالی – الاستیسیته تیلور	رابطه کارتر و هایس	۰/۶	۲۶/۶
	رابطه کلر	۰/۸	۱۴/۴
	رابطه مورگان	۲/۶	۱۸/۰

نتایج روابط یکای هانسفیلد با چگالی و مدول الاستیک

با استفاده از تصاویر سی‌تی استخوان تیبیا، مقادیر حداقل و حداکثر یکای هانسفیلد به ترتیب ۱۰۱۸- و ۱۹۷۰ تعیین شده است. به کمک روابط چگالی – هانسفیلد و چگالی–الاستیسیته ارائه شده، مقادیر حداکثر و حداقل چگالی و مدول الاستیک نواحی مختلف استخوان تعیین شده که در جدول (۴) آمده است.

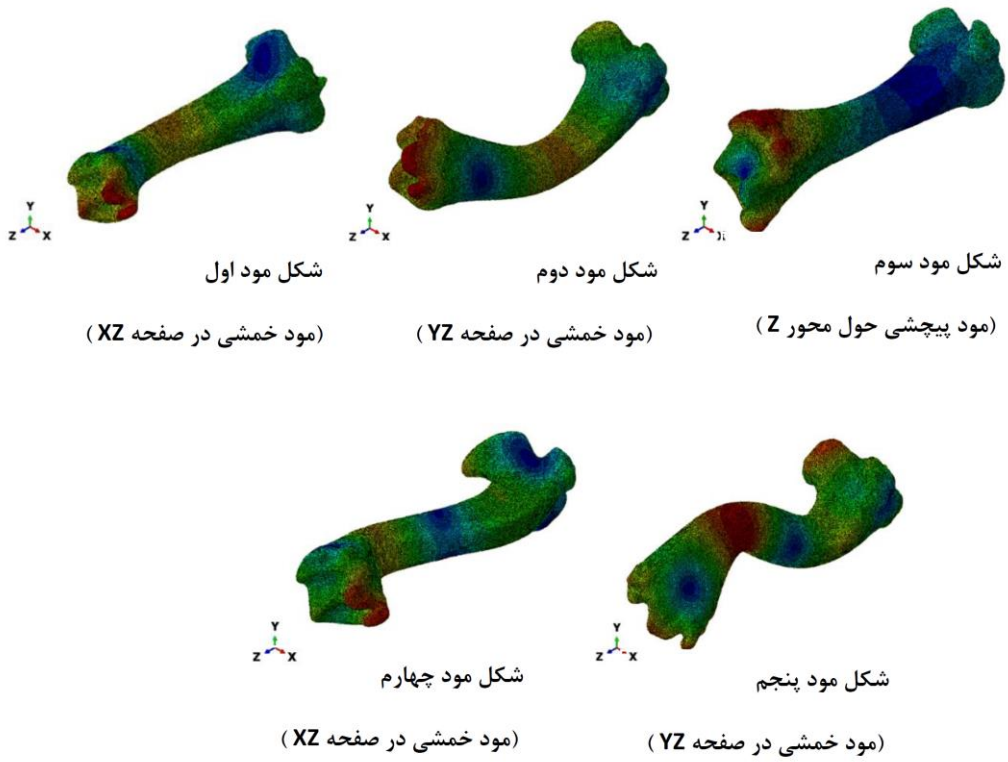
نتایج مدل‌سازی اجزای محدود

پس از حل هر یک از مدل‌های اجزا محدود همگن، ناهمگن گسسته و ناهمگن پیوسته، ۱۲ فرکانس اول (شامل ۶ مود جسم صلب و ۶ فرکانس اول غیر صفر) بدست آمده است. پنج فرکانس اول غیر صفر و میزان خطا نسبت به نتایج تست مودال هر یک از مدل‌های همگن، ناهمگن گسسته و ناهمگن پیوسته در جدول (۵) آمده است. همچنین شکل پنج مود ارتعاشی اول استخوان در

شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که مقادیر فرکانس‌های طبیعی بدست آمده مطابق با رابطه چگالی-الاستیسیته کارتر و هایس، به فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از تست مودال نزدیک تر است. همچنین، پنج فرکانس اول غیر صفر مدل ناهمگن گسسته بر اساس تعداد بخش‌های مدل، در جدول (۶) نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که وقتی تعداد ناحیه‌های مدل از ۲۰ ناحیه فراتر می‌رود، تغییرات کمی در فرکانس‌های مدل بوجود آمده و نتایج به هم نزدیک می‌شوند.

جدول ۵ پنج فرکانس اول و میزان خطا با نتایج آزمایشگاهی هر یک از مدل‌های همگن، ناهمگن گسسته و پیوسته

مدل استخوان	رابطه چگالی - الاستیسیته	فرکانس‌های طبیعی استخوان (هرتز)					درصد خطای مدل با نتایج آزمایشگاهی				
		فرکانس ۱	فرکانس ۲	فرکانس ۳	فرکانس ۴	فرکانس ۵	فرکانس ۱	فرکانس ۲	فرکانس ۳	فرکانس ۴	فرکانس ۵
همگن	.....	۷۹۵	۹۹۵	۱۴۹۲	۲۵۰۲	۲۹۴۴	۱/۶	۱/۳	۳۳/۲	۴۶/۴	۴۷/۸
ناهمگن گسسته (۴۰ بخش)	کارتر و هایس	۶۷۲	۸۴۷	۱۱۲۹	۱۷۱۷	۱۹۹۹	۱/۱	۱/۴	/۸	۰/۴	۰/۴
	کلر	۶۸۳	۸۵۷	۱۱۵۱	۱۹۵۵	۲۲۲۹	۲/۷	۲/۶	۲/۸	۱۴/۳	۱۱/۹
	مورگان	۶۸۸	۸۶۴	۱۲۲۵	۲۳۲۸	۲۵۳۷	۳/۵	۳/۵	۹/۴	۳۶/۱	۲۷/۴
ناهمگن پیوسته (۴۳۲۷۸۲ بخش)	کارتر و هایس	۶۷۰	۸۴۵	۱۱۲۷	۱۷۱۵	۱۹۹۵	۰/۸	۱/۲	۰/۶	۰/۲	۰/۲
	کلر	۶۸۱	۸۵۶	۱۱۴۹	۱۹۵۲	۲۲۲۴	۲/۴	۲/۵	۲/۶	۱۴/۱	۱۱/۶
		۶۸۵	۸۶۰	۱۲۲۰	۲۳۲۲	۲۵۳۰	۳/۰	۳/۰	۸/۹	۳۵/۷	۲۷/۰
تست مودال آزمایشگاهی		۶۶۵	۸۳۵	۱۱۲۰	۱۷۱۱	۱۹۹۲					



شکل ۹ پنج شکل مود اول استخوان تیبیا

جدول ۶ پنج فرکانس اول غیر صفر مدل ناهمگن گسسته بر اساس تعداد نواحی مدل ناهمگن

مدل استخوان	فرکانس‌های طبیعی استخوان (هرتز)					درصد خطای مدل با نتایج آزمایشگاهی				
	فرکانس ۱	فرکانس ۲	فرکانس ۳	فرکانس ۴	فرکانس ۵	فرکانس ۱	فرکانس ۲	فرکانس ۳	فرکانس ۴	فرکانس ۵
ایزوتروپ ناهمگن گسسته (۵ بخش)	۶۸۱	۸۶۰	۱۱۵۱	۱۷۵۸	۲۰۴۳	۲/۴	۳/.	۲/۸	۲/۸	۲/۶
ایزوتروپ ناهمگن گسسته (۱۰ بخش)	۶۷۵	۸۵۳	۱۱۴۲	۱۷۳۹	۲۰۲۳	۱/۵	۲/۲	۲/۰	۱/۶	۱/۶
ایزوتروپ ناهمگن گسسته (۲۰ بخش)	۶۷۲	۸۴۸	۱۱۳۱	۱۷۲۰	۲۰۰۱	۱/۱	۱/۶	۱/۰	۰/۵	۰/۵
ایزوتروپ ناهمگن گسسته (۴۰ بخش)	۶۷۲	۸۴۷	۱۱۲۹	۱۷۱۷	۱۹۹۹	۱/۱	۱/۴	۱/۰	۰/۴	۰/۴
ایزوتروپ ناهمگن پیوسته (۴۳۲۷۸۲ بخش)	۶۷۰	۸۴۵	۱۱۲۷	۱۷۱۵	۱۹۹۵	۰/۸	۱/۲	۰/۶	۰/۲	۰/۲
تست مودال	۶۶۵	۸۳۵	۱۱۲۰	۱۷۱۱	۱۹۹۲					

بحث روی نتایج

در این تحقیق به مطالعه اثر ناهمگنی بافت استخوان بر روی نتایج مدل اجزای محدود، برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی پرداخته شده است. برای این منظور با تهیه استخوان تیبیای گوساله و جداکردن بافت‌های نرم و چربی متصل به آن، فرکانس‌های طبیعی به کمک تست مودال و در وضعیت دو انتهای آزاد تعیین گردید. با تهیه تصاویر سی‌تی، هندسه و توزیع چگالی بر حسب یکای هانسفیلد تهیه شده و بر اساس این هندسه، مدل اجزای محدودی با در نظر گرفتن اثرات ناهمگنی ماده استخوان ایجاد شده است. به کمک این مدل و با تحلیل حساسیت، تعداد المان‌های بهینه برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی به دست آمدند. برای مدل‌سازی ناهمگنی، روابط پیشنهادی پژوهش‌های قبلی برای رابطه چگالی-هانسفیلد در مدل اعمال گردیدند. این ناهمگنی با فرض تغییر نقطه‌ای چگالی بر حسب یکای هانسفیلد به عنوان یک مدل ناهمگن پیوسته اعمال شد. با مقایسه وزن نمونه استخوان با مدل اجزای محدود، رابطه چگالی-هانسفیلد پیشنهاد شده توسط تیلور نزدیک‌ترین وزن را برای مدل اجزای محدود استخوان پیش‌بینی می‌کند. سپس چهار مدل ناهمگن گسسته، با بخش بندی بازه تغییرات چگالی به ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ زیربازه تهیه گردید. تغییرات مدول الاستیک بر حسب چگالی به کمک سه رابطه پیشنهادی به مدل همگن پیوسته و مدل‌های ناهمگن گسسته اعمال شد. با مراجعه به جدول (۵) مشاهده می‌گردد که پنج فرکانس طبیعی اول مدل استخوان همگن بین ۲۰ تا ۵۰ درصد با فرکانس‌های تست مودال اختلاف دارند. این موضوع موید آن است که در مدل‌سازی اجزای محدود ارتعاشات استخوان، مدل‌های همگن توصیه نمی‌شود. به علاوه با مقایسه فرکانس‌های طبیعی مدل‌های ناهمگن گسسته استخوان با مدل ناهمگن پیوسته مشهود است که یک مدل ناهمگن گسسته ۲۰ ناحیه‌ای می‌تواند به جای یک مدل ناهمگن پیوسته ۴۳۲۷۸۲ ناحیه‌ای پر هزینه، مورد استفاده قرار گیرد. با مقایسه نتایج جدول (۵) برای سه رابطه چگالی-الاستیسیته مورد استفاده در مدل‌های ناهمگن استخوان، ملاحظه می‌شود که رابطه چگالی الاستیسیته ارائه شده توسط کارتر و هایس نسبت به روابط پیشنهادی کلر و مورگان، نزدیکترین فرکانس‌های طبیعی را به مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. مقایسه نتایج مدل‌های ناهمگن با نتایج تجربی نشان می‌دهد که تفاوت بسیار کمی بین مدل‌های ناهمگن گسسته۴۰ ناحیه‌ای و پیوسته ۴۳۲۷۸۲ ناحیه‌ای وجود دارد. نتایج تأکید می‌کنند که برای یک مدل ناهمگن گسسته از ۱۰ ناحیه بالاتر، فرکانس‌های طبیعی به سرعت همگرا می‌شوند. در این تحقیق مشاهده گردید که برای پنج فرکانس طبیعی اول، یک مدل ناهمگن گسسته با ۲۰ ناحیه، نتایج به مقادیر تجربی نزدیک می‌شود. بنابراین در مدل‌سازی اجزای محدود ارتعاشات استخوان می‌توان به جای استفاده از

مدل‌های همگن غیر دقیق یا مدل‌های ناهمگن پیوسته دقیق ولی پر هزینه، از مدل‌های ناهمگن گسسته ۲۰ ناحیه‌ای دقیق و کم هزینه استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد اگر چه استفاده از مدل‌های ناهمگن پیوسته می‌تواند احتمالا نتایج دقیق‌تری در تحلیل‌های استاتیکی همچون تحلیل تنش و کرنش، رشد ترک، خستگی و شکست استخوانی به دست دهد ولی در تحلیل‌های ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی استخوان، یک مدل ساده‌تر ناهمگن گسسته با ۲۰ ناحیه، می‌تواند فرکانس‌های طبیعی نزدیک با مقادیر تجربی را با صرف هزینه کمتر و مدت زمان کوتاهتر با خطای کمتر از یک درصد به دست دهد. به‌علاوه این مدل‌های گسسته می‌تواند در آینده، با متصل شدن به نرم افزارهای سی‌تی اسکن، بلافاصله بعد از سی‌تی، مدل گسسته استخوان را ایجاد کرده و در زمان کوتاهی فرکانس‌های طبیعی استخوان را محاسبه نماید. این موضوع می‌تواند در تشخیص ضایعات پوکی استخوان راهگشا باشد.

در این پژوهش در تست مودال ، نسخه نرم افزار پالس لب شاپ در دسترس، امکان گرفتن فایل هندسه استخوان، جهت نشان دادن شکل مودهای ارتعاشی استخوان را نداشت. لذا استفاده از نسخه‌های جدیدتر این نرم‌افزار می‌تواند با نشان دادن شکل مود طبیعی استخوان، سرعت و دقت تعیین فرکانس‌های طبیعی را افزایش دهد. همچنین امکان ساخت تکیه گاه مناسب برای گیردار یا مفصل کردن یک سر یا دو سر استخوان تیبیا میسر نشد. در این صورت امکان تست و سپس مدل‌سازی تیبیا تحت شرایط مرزی یک انتها و یا دو انتهای گیردار یا مفصل فراهم می‌گردید.

یکی از محدودیت‌های این پژوهش در نظر نگرفتن کانال مغز زرد استخوان و نواحی محتوی مغز قرمز است. اگر چه در این تحقیق کانال استخوان توپر فرض شده است، لیکن به دلیل پایین بودن یکای هانسفیلد نواحی مغز زرد و قرمز استخوان، چگالی این نواحی نیز پایین‌تر از قسمت‌های استخوانی آن بر اساس رابطه چگالی–الاستیسیته تیلور محاسبه شده است که دقیقا برابر چگالی واقعی مغز زرد یا قرمز استخوان نیست. این موضوع می‌تواند محل تولید خطا باشد. با خالی کردن کانال مغز زرد و جایگزینی آن با توده مغز زرد و اعمال چگالی و مدول الاستیک مربوط به مغز زرد، می‌توان مقدار این خطا را بررسی نمود. البته از آنجا که این بخش به صورت همگن می‌باشد تأثیر آن در نتایج به طور یکسان بوده و نتیجه این تحقیق همچنان می‌تواند راهگشا باشد. محدودیت دیگر این پژوهش این است که برای تمام قسمت های فشرده و اسفنجی استخوان از یک رابطه چگالی-الاستیسیته واحد استفاده شده است. می‌توان با تفکیک قسمت‌های فشرده و اسفنجی استخوان، به هر قسمت رابطه چگالی– الاستیسته جداگانه‌ای تخصیص داد و دقت نتایج را بررسی نمود. در این پژوهش تنها اثرات ناهمگنی استخوان بر فرکانس‌های طبیعی آن مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر ناهمسانگردی ماده استخوان بر فرکانس‌های طبیعی بررسی نشده است.

به عنوان پژوهش بعدی می‌توان بررسی کرد که اثرات ناهمگنی بر رفتار ارتعاشی استخوان بیشتر است یا اثرات ناهمسانگردی آن. به علاوه ممکن است در فرکانس‌های بالاتر مودهای ترکیبی ظاهر شوند. مطالعه تأثیر مغز زرد استخوان، تفکیک بافت فشرده و اسفنجی، ناهمسانگردی و مودهای ارتعاشی ترکیبی در ادامه این تحقیق پیش‌بینی شده است.

واژه نامه

یکای هانسفیلد	Bone Hounsfield Unite
بازسازی مجدد استخوان	Remodeling
تست ضربه چکش	Hmmer impact test
ارتعاش سنج لیزری	Laser Vibrometer
قدامی- خلفی	Anterior-posterior
جانبی- میانی	Lateral-medial
جداسازی	Segmentation
آستانه‌یابی	Thresholding
چگالی موثر	Effective density
چگالی ظاهری	Appearance density

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] T. Kono, Y. Ayukawa, Y. Moriyama, K. Kurata, K. H. Hiroshi Takamatsu and K. Koyano, "The effect of low-magnitude, high-frequency vibration stimuli on the bone healing of rat incisor extraction socket", *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 134, no. 9, pp. 091001-091006, (2012).

[2] R. Uchida, K. Nakata, F. Kawano F., Y. Yonetani, I. Ogasawara, N. Nakai, T. Mae, T. Matsuo, Y. Tachibana, H. Yokoi, H. Yoshikawa, "Vibration acceleration promotes bone formation in rodent models", *PLOS One*, vol. 12, no. 3, e0172614, (2017).

[3] E. Lau, S. Al-Dujaili, A. Guenther, D. Liu, L. Wang and L. You, "Effect of low-magnitude, high-frequency vibration on osteocytes in the regulation of osteoclasts", *Bone*, vol. 46, no. 6, pp. 1508–1515, (2010).

[4] N.J. Cairns, M.J. Pearcy, J. Smeathers and C. Adam, "Ability of modal analysis to detect osseointegration of implants in transfemoral amputees: a physical model study", *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 51, pp. 39–47, (2013).

[5] L.X. Guo, M. Zhang, J.L. Li., Y.M. Zhang, Z.W. Wang and E.C. Teo, "Influence Prediction of Tissue Injury on Frequency Variations of the Lumbar Spine under Vibration", *OMICS A Journal of Integrative Biology*, vol. 13, no. 6, pp. 521-526, (2009).

[6] L.X. Guo, M. Zhang, and Ming Zhang, "Finite Element Modeling and Modal Analysis of the Human Spine Vibration Configuration", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58, no. 10, pp. 2987-2990, (2011).

[7] L. Verdenelli, R. Rossetti, P. Chiariotti, M. Martarelli and L. Scalise, "Experimental and numerical dynamic characterization of a human tibia", *Journal of Physics: Conference Series*, 1149 (2018) 012029, AIVELA, (2018).

[8] S.L. Lin, S.Y. Lee, L.Y. Lee, W.T. Chiu, C.T. Lin and H.M. Huang, "Vibrational analysis of mandible trauma: experimental and numerical approaches", *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 44, no. 9, pp. 785–792, (2006).

[9] L.C. Pastrava, J. Devos, G. Van der Perrea and S.V.N. Jaecques, "A finite element analysis of the vibrational behaviour of the intra-operatively manufactured prosthesis–femur system", *Medical Engineering & Physics*, vol. 31, no. 4, pp. 489–494, (2009).

[10] M.C. Hobatho, R. Darmana, P. Pastor, J. Barrau, S. Laroze and J. Morucci, "Development of a three-dimensional finite element model of a human tibia using experimental modal analysis", *Journal of Biomechanics*, vol. 24, no. 6, pp. 371-383, (1991).

[11] B. Bediz, H. Nevzat Özgüven and F. Korkusuz, "Measuring Structural Dynamic Properties of Human Tibia by Modal Testing", *Proceedings of the 26th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, February 4-7, (2008).

[12] W.R. Taylor, E. Roland, H. Ploeg, D. Hertig, R. Klabunde, M.D. Warner and S.E. Clift, "Determination of Orthotropic Bone Elastic Constants Using FEA and Modal Analysis", *Journal of Biomechanics*, vol. 35, no. 6, pp. 767–773, (2002).

[13] R. Scholz, F. Hoffmann, S. von Sachsen, W. G. Drossel, C. Klöhn and C. Voigt, "Validation of density–elasticity relationships for finite element modeling of human pelvic bone by modal analysis", *Journal of Biomechanics*, vol. 46, no. 15, pp. 2667-2673, (2013).

[14] E.F. Morgan, H.H. Bayraktar and T.M. Keaveny, "Trabecular bone modulus–density relationships depend on anatomic site", *Journal of Biomechanics*, vol. 36, no. 7, pp. 897-904, (2003).

[15] M. Werner, M. Quickert and H. Kunze and C. Voigt, "Applying modal Analysis for comparing various FE models of human pelvic bone", *16th International Congress on Sound and Vibration*, Kraków, Poland, 5–9 July, (2009).

[16] P. Henys and L. Capek, "Computational modal analysis of a composite pelvic bone: convergence and validation studies", *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 22, no. 9, pp. 916-924, (2019).

[17] A.O. Moghaddam, M.J. Mahjoob and A. Nazarian, "Assigning Material Properties to Finite Element Models of Bone: A New Approach Based on Dynamic Behavior", *The 7th International Conference on Computational Methods*, University of California at Berkeley, 1-4 August, (2016).

[18] D.J. Ewins, Modal Testing: Theory, Practice and Application, second edition, Wiley, pp. 303- 320, 2000.

[19] R.J. McBroom, W.C. Hayes, W.T. Edwards, R.P. Goldberg, and A.A.D. White, "Prediction of vertebral body compressive fracture using quantitative computed tomography", *Journal of Bone and Joint Surgery American*, vol. 67, no. 8, pp. 1206–1214, (1985).

[20] J.Y. Rho, M.C. Hobatho and R.B. Ashman, "Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone", *Medical Engineering & Physics*, vol. 17, no. 5, pp. 347-355, (1995).

[21] B. Helgason, E. Perilli, E. Schileo, F. Taddei, S. Brynjolfsson and M. Viceconti, "Mathematical relationships between bone density and mechanical properties: A literature review", *Clinical Biomechanics*, vol. 23, no. 2, pp. 135–146, (2008).

[22] D.R. Carter and W.C. Hayes, "The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure", *The Journal of Bone & Joint Surgery*, vol. 59, no. 7, pp. 954-962, (1977).

[23] T.S. Keller, "Predicting the compressive mechanical behavior of bone", J*ournal of Biomechanics*, vol. 27, no. 9, pp. 1159-1168, (1994).

[24] D. Zhang, D.D. Arola and J.A. Rouland, "Evaluating the elastic modulus of bone using electronic speckle pattern interferometry", *Experimental Techniques*, vol. 25, no. 5, pp. 32-34, (2001).

[25] S.D.M. Jones, M.A. Price and R.T. Berg, "The Density of Bovine Limb Bones", *Canadian Journal of Animal Science*, vol. 58, no.1, pp. 105-106, (1978).

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

Optimization of Dimensional Accuracy of Mold Steel in Wirecut Process based on Response Surface Method

Research Article

Masoud Seydi[1], Farshad Rabiei[2], Zahra Seydi[3]

DOI:

1. Introduction

Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) is an electrothermal process that uses a conductive wire with a diameter of 0.05 to 0.30 mm as an electrode. The dielectric liquid is placed between the wire electrode and the workpiece in order to create a fixed gap of 10-100 micrometers. When sufficient voltage is applied, the dielectric liquid acts as an ionizing medium for the electrode. The workpiece is eroded due to the separate sparks that occur between the workpiece and the wire and is removed from the machining area by the dielectric fluid flow. Figure 1 shows the wirecut process schematic.

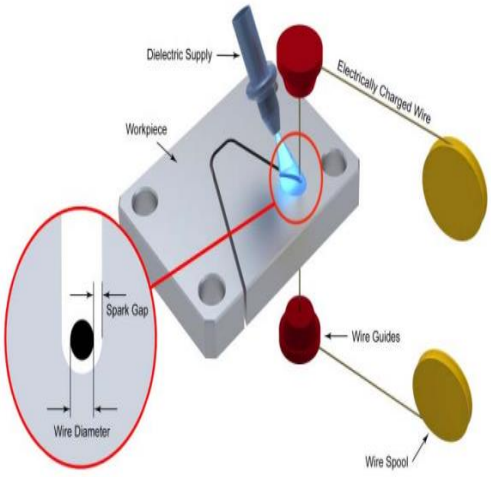


Figure 1. Schematic of the wirecut process

One of the advantages of this process is that the wire does not come into contact with the workpiece during the process, so the physical pressure similar to grinding and milling processes is not applied to the workpiece. This process eliminates mechanical stress, noise, and vibration during machining and can produce various materials with a thickness of 300 mm. Wirecut is a suitable option for making molds and industrial parts due to its high dimensional accuracy and favorable surface quality. Proper dimensional accuracy leads to improvement of fatigue strength, wear resistance, and corrosion resistance; so any effort to improve dimensional accuracy in this process can be a big step in the direction of producing precise and strong industrial parts.

The performance of the wirecut machine depends completely on machining parameters. It is very difficult to obtain the relationship between machining parameters and machining characteristics in the wire cutting process due to the multitude of parameters of the work process.

Therefore, choosing the right machining parameters can lead the process to the desired dimensional accuracy. Response procedure method is a mathematical and statistical technique that is used to model and analyze problems, where the response is affected by several variables, and its purpose is to model and optimize this response.

Using response procedure method, this study tried to optimize the dimensional accuracy, which plays an essential role in determining the position of the wirecut process. Parameters "wire speed", "wire tension", and "generator power" were selected as input parameters in this process.

2. Laboratory conditions

Mo40 steel was used as the workpiece material. First, in order to achieve uniformity in thickness, the workpiece was completely planed using a lathe machine and brought to the final dimensions of 320 x 40 mm and a thickness of 10 mm. Then it was fixed on the CHARMILLES five-axis wirecut machine (Figure 2). Parameters "wire injection speed", "wire tension" and "generator power" were selected as input parameters. Table 1 shows the range of these parameters.

* Manuscript received: January 9, 2022. Revised, January 22, 2022, Accepted, February 14, 2023.

[1] Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

[2] Corresponding author. Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran.

Email: F.rabiei@ilam.ac.ir

[3] Master's Degree, Faculty of Energy, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

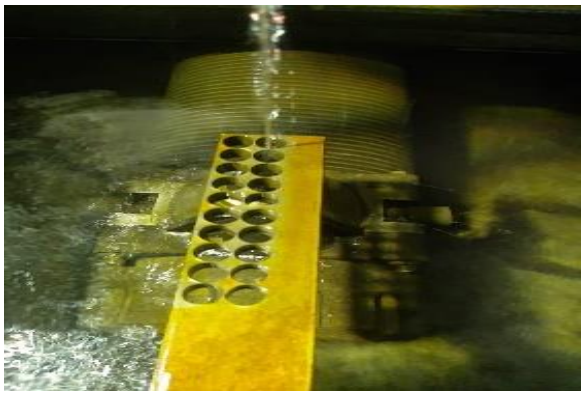


Figure 2. The five-axis wirecut machine and the work pieces on it

Table 1. Test conditions

Wire diameter (mm)	0.2
Wire material	Copper
Dielectric fluid	Distilled water
Wire injection speed (cm/s)	10-2
Wire tension (kg)	2.5-0.5
Generator power (percentage)	50-10

Wire speed and wire tension are parameters of wire movement control. The wire feeding speed indicates the length of the wire that is unrolled from the reel in a unit of time. Unnecessary increase of this parameter leads to an increase in wire consumption, on the other hand, being too low will lead to an increase in the possibility of wire breakage.

To create stable machining accuracy, a certain amount of tension in the wire is required to limit deviation of the path, bending, and vibration. In order to optimize the mentioned parameters using response procedure method, 20 experiments were performed according to Table 2. For each test, a cylinder with a base diameter of 10 mm and a height of 10 mm was cut from the workpiece.

Factors "traction", "speed" and "power" are considered as input variables and dimensional accuracy is response variable. Building response procedure models in response procedure designs is an iterative process. As soon as an approximate model is obtained, it is tested by the goodness of fit method to see if the answer is satisfactory. If the answer is not confirmed, the estimation process starts again and more tests are performed. The relevant results are presented in the form of analysis of variance table. As can be seen, the P-value of the interaction between the factors is less than 0.05, and the validity of the model is confirmed.

Figure 3 shows the Pareto chart related to the impact of the main, reciprocal, and square parameters on the output parameter (dimensional accuracy). Based on this diagram, with a confidence factor of 0.95, the mutual impacts of the factors have the greatest impacts; BC: interaction of speed and power, AC: interaction of tension and power, and AB: interaction of tension and speed. In this graph, any bar that crosses the vertical line of 2.228 indicates that it affects the response variable. The mentioned number is calculated based on the confidence factor of 95%. The Pareto chart seeks to identify the factors whose total impact on the response variable constitutes more than 80% of the impacts. In other words, it seeks to determine 20% of the factors whose share in the changes of the response variable is 80%. In this research, the factors are: The interaction of speed and power, the interaction of tension and power, and the interaction of tension and speed.

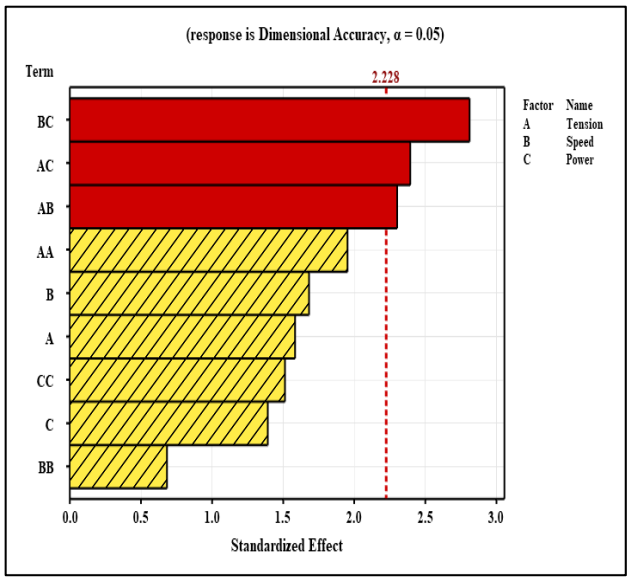


Figure 3. Pareto standard effects

3. Conclusion

Achieving high dimensional accuracy in making cutting molds is very important. Wirecut process is one of the common processes for making these molds. This study tried to analyze, model, and optimize the value of dimensional accuracy based on wire speed, wire tension and generator power, using variance analysis and response procedure method. The results show that the mutual impacts of parameters have the greatest impact on dimensional accuracy.

The optimal value of the parameters and the corresponding dimensional accuracy were extracted based on the response procedure method. Therefore, for the tension values of 1.3485 kg, wire speed of 10 cm/s and power of 46.7677%, the accuracy value reaches its maximum value. For validating the results of the model, these values were tested, which had a 0.2% error compared to the predicted value.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ،۳۵، ۱۴۰۲. (۹۷-۱۰۶)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

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

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

بهینه‌سازی دقت ابعادی فولادِ قالب در فرایند وایرکات مبتنی بر روش سطح پاسخ

مقاله پژوهشی

مسعود صیدی[۱] فرشاد ربیعی[۲] زهرا صیدی[۳]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80447.1154

چکیده *یکی از قطعات صنعتی که نیازمند دقت ساخت بسیار بالایی می‌باشد قالب‌های صنعتی و خصوصاً قالب‌های برش می‌باشد. در این قالب‌ها میزان لقی سنبه و ماتریس برابر ۰,۱ ضخامت ورق است از این رو دقت ساخت این قالب‌ها بسیار دارای اهمیت می‌باشد. امروزه از فرایند وایرکات در ساخت این قالب‌ها به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرایند، بدلیل عدم تماس ابزار با قطعه‌کار، تنش‌های مکانیکی وجود ندارد و قطعات تولیدی دارای دقت بالایی هستند. با این وجود، جهت دستیابی به دقت بالای مورد نیاز در ساخت قالب‌های برش، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از روش رویه پاسخ، مقدار دقت ابعادی بر اساس سه پارامتر سرعت سیم، کشش سیم و توان ژنراتور برای قطعه‌کار فولادی Mo40 مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این روش، در ابتدا میزان اهمیت هر یک از پارامترها بر دقت ابعادی بر اساس آنالیز واریانس مشخص گردید. سپس با استخراج معادله منطبق بر تست‌های انجام شده، مقدار بهینه دقت ابعادی بر اساس پارامترهای مذکور استخراج گردید. نتایج نشان داد که به ازای مقادیر کشش۱,۳۴۸۵ کیلوگرم، سرعت سیم۱۰ سانتیمتر بر ثانیه و توان ۴۶,۷۶۷۷ درصد مقدار دقت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در نهایت این مقادیر به صورت تجربی مورد تست قرار گرفت و مقدار ۰,۲ درصد خطا نسبت به مقدار پیش‌بینی‌شده ثبت گردید. از این رو می‌توان با استفاده از روش رویه پاسخ، مقدار دقت ابعادی را در فرایند وایرکات قالب‌های صنعتی فولادی پیش بینی و بهینه سازی کرد.*

واژه‌های کلیدی وایرکات، سرعت تزریق سیم، کشش سیم، توان ژنراتور، روش سطح پاسخ، دقت ابعادی، بهینه‌سازی.

Optimization of Dimensional Accuracy of Mold Steel in Wire Cut Process Based on Response Surface Method

Masoud Seidi Farshad Rabiei Zahra Seydi

Abstract *One of the industrial parts that requires very high manufacturing accuracy is industrial molds and especially cutting molds. In these molds, the clearance of the dies is equal to 0.1 of the thickness of the sheet, so the accuracy of making these molds is very important. Today, the wirecut process is widely used in making these molds. In the process, due to the lack of contact between the tool and the work piece, there is no mechanical tension and the produced parts have high precision. Nevertheless, in order to achieve the high precision required in the production of cutting molds, various methods are used. In this research, using the response surface method, the dimensional accuracy value has been investigated based on three parameters of wire speed, wire tension and generator power for Mo40 steel workpiece. Based on this method, at first, the importance of each parameter on dimensional accuracy was determined by analysis of variance. Then, by deriving the equation according to the conducted tests, the optimal value of dimensional accuracy was extracted based on the mentioned parameters. The results showed that for tension values of 1.3485 kg, wire speed of 10 cm/s and power of 46.7677%, the accuracy value reaches its maximum value. Finally, these values were experimentally tested and a 0.2 % error was recorded. Therefore, by using the method of the response procedure, the amount of dimensional accuracy can be predict and optimize in the wirecut process of industrial steel molds.*

Key Words Wire Cut, Wire Feed Speed, Wire Tension, Generator Power, ،Response Surface Method, Dimensional Accuracy, Optimizatio.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۱/۲۵می‌باشد.

Email: M.seidi@ilam.ac.ir

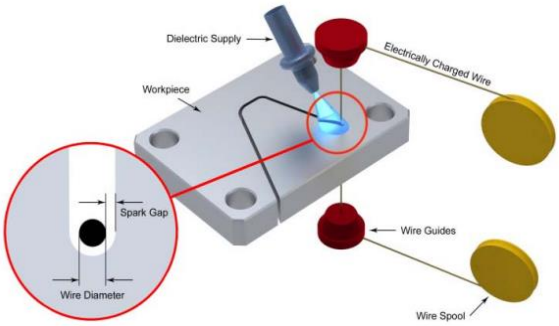
(۱) استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

(۲) استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

(۳) کارشناس ارشد، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

مقدمه

فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیم (WEDM) یک فرایند الکترونرمال است که از یک سیم رسانا با قطر ۰,۰۵ تا ۰,۳۰ میلی‌متر به عنوان الکترود استفاده می‌کند. مایع دی‌الکتریک به منظور ایجاد یک شکاف ثابت۱۰۰ –۱۰ میکرومتر، بین الکترود سیمی و قطعه‌کار قرارگرفته است [1]. زمانی که ولتاژ کافی اعمال می‌شود مایع دی‌الکتریک به‌عنوان یک محیط یونیزه‌کننده برای الکترود عمل می‌کند. قطعه‌کار در اثر جرقه‌های مجزا که بین قطعه‌کار و سیم اتفاق می‌افتد، فرسایش یافته و به وسیله جریان سیال دی‌الکتریک، از منطقه ماشین‌کاری دفع می‌گردد [2,3]. شماتیک فرایند وایرکات در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ شماتیک فرایند وایرکات [4]

یکی از مزایای این فرآیند عدم برخوردِ سیم در طول فرآیند با قطعه‌کار است، بنابراین فشار فیزیکی مشابه فرایندهای سنگزنی و فرز بر روی قطعه‌کار وارد نمی‌شود از این رو این فرآیند تنش‌های مکانیکی، صدا و لرزش را در حین ماشین‌کاری حذف کرده و می‌تواند مواد مختلفی را با ضخامت ۳۰۰ میلی‌متر تولید کند [5-7]. وایرکات به دلیل داشتن دقت ابعادی بالا و کیفیت سطحی مطلوب گزینه‌ای مناسب برای ساخت قالب‌ها و قطعات صنعتی می‌باشد. دقت ابعادی مناسب منجر به بهبود استحکام خستگی، مقاومت در برابر سایش و مقاومت در برابر خوردگی می‌شود بنابراین هرگونه تلاش برای بهبود دقت ابعادی در این فرایند می‌تواند گامی بزرگ در جهت تولید قطعات دقیق و مستحکم صنعتی باشد [8-11].

تحقیقات متعددی برای افزایش دقت ابعادی قطعات تولید شده با استفاده از فرایند وایرکات، انجام شده است. هارش نیر و همکاران اثر تغییر پارامترهای مختلف را بر دقت ابعادی، نرخ حذف مواد، عرض کرف و زبری سطح قطعه‌کار اینکونل ۷۱۸، با ا ستفاده از فرایند وایرکات برر سی کردند. پارامترهای ورودی در این پژوهش سرعت سیم، کشش سیم و نرخ فلاشینگ بود. نتایج نشان داد دقت ابعادی سوراخ‌های ماشین‌کاری شده با افزایش کشش سیم کاهش می‌یابد [12].

زهور و همکاران دقت ابعادی و زبری سطح فرایند وایرکات در آلیاژ اینکونل ۷۱۸، را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کردند. در این مطالعه کشش سیم، زمان روشنی پالس، زمان خامو شی پالس، ولتاژ سروو و تغذیه سیم به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. نتایج نشان داد دقت ابعادی به زمان روشنی پالس، ولتاژ سروو و تغذیه‌ی سیم وابسته است [13].

مانجوناتا و راویندرا آزمایش‌هایی برای ماشین‌کاری به روش وایرکات، در قطعه‌کارهای SKD11/D2A2، کاربید تنگستن و مواد فولادی ملایم با استفاده از سیم برنجی با قطر ۰,۲۵ میلی‌متر انجام دادند. پارامترهای ورودی در طول آزمایش شامل ولتاژ سروو، فاصله افست، سرعت ماشین‌کاری، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بود. داده‌ها برای ضخامت‌های مختلف و برای مواد مختلف با ضخامت یکسان استخراج و دقت ابعادی و زبری سطح مربوطه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد دقت ابعادی به دلیل افزایش ولتاژ سروو و تعداد پاس‌ها افزایش یافته است [14].

سی و همکاران به بهبود دقت ابعادی و کاهش زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده به روش وایرکات پرداختند. آنها دریافتند با استفاده از روش تاگوچی در این فرایند، می‌توان قطعاتی با دقت ابعادی بالا و با ابعاد متوسط ۰,۶۶۰۱ اینچ تولید کرد، در حالی که بعد مورد نظر ۰,۶۶۰۰ اینچ گزارش شد [4].

کانلایاسیری و جاتاکول دقت ابعادی و زبری سطح را با استفاده از تابع مطلوبیت بهینه‌سازی کردند. سرعت برش، جریان پیک و فاصله افست متغیرهای ورودی در این مطالعه بودند. آنها تأثیر معنادار جریان پیک و فاصله افست را بر دقت ابعادی گزارش دادند. همچنین عدم وابستگی دقت ابعادی به سرعت برش، تأیید شد [15].

آدستا و همکاران دقت ابعادی فولاد ضدزنگ را در فرایند وایرکات بررسی کردند. آنها از هوای فشرده به عنوان سیال دی-الکتریک و از الکترود با جنس تنگستن، برای انجام فرایند استفاده کردند. دقت ابعادی از طریق اختلاف عرض دهانه شکاف‌های

ماشین‌کاری شده تعیین شد. تحلیل واریانس نشان داد ولتاژ شکاف و کشش سیم اثر زیادی بر دقت ابعادی دارند، دلیل این امر تأثیر پارامترهای ذکر شده بر ارتعاش سیم در طول عملیات ماشین‌کاری گزارش شد [16].

چوداری و همکاران تأثیر تغییر پارامترهای ورودی بر بهینه-سازی دقت ابعادی در ساخت چرخ‌دنده‌های مینیاتوری به روش وایرکات را بررسی کردند. یک مدل ریاضی با استفاده از روش تاگوچی استخراج شد. تحلیل تاپسیس و واریانس نشان داد زمان روشنی پالس قابل توجه‌ترین پارامتر برای دقت ابعادی خوب است. پارامترهای سیال دی‌الکتریک، جریان، زمان خاموشی پالس و کشش سیم به ترتیب سایر عوامل موثر بر دقت ابعادی در ساخت چرخ‌دنده‌های مینیاتوری گزارش شدند [17].

چاکرابورتی وهمکاران به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر دقت ابعادی گوشه‌ها و زبری سطح، فرایند وایرکات دارای دی-الکتریک ترکیب شده با پودر پرداختند. تجزیه و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش بیانگر تأثیر قابل توجه غلظت پودر بر دقت در گوشه‌ها و زبری سطح می‌باشد. سایر عوامل موثر در این تحقیق، به ترتیب زمان روشنی پالس و حداکثر جریان گزارش شد [18].

آبیار و همکاران تأثیر فرکانس تخلیه، ولتاژ متوسط گپ و سرعت پیشروی را بر دقت در گوشه‌ها مورد بررسی قراردادند. بهینه‌سازی پارامترها توانست میزان خطا را ۱۲٪ کاهش دهد. همچنین نتایج مشخص کرد که مرحله خشن‌کاری موثرترین قسمت برش است و خطاهای ابعادی بیشتر ناشی از مرحله خشن‌کاری است [19].

اسلام و همکاران تأثیر شش پارامتر ورودی فرایند وایرکات را بر خطاهای ابعادی خطی، خطاهای صافی، و خطاهای عمودی سطوح گوشه مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند کشش سیم بیشترین تأثیر را بر میزان دقت ابعادی در سه بعد دارد [20].

سوداکارا و همکاران با استفاده از روش تاگوچی به بهینه‌سازی انحراف ابعادی برحسب پارامترهای ورودی در فرایند وایرکات پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، فشار دی‌الکتریک و جریان پیک تأثیرگزارترین عوامل بر میزان دقت ابعادی در این فرایند هستند [21].

شارما و همکاران تأثیر پارامترهای ورودی را بر دقت ابعادی و سرعت برش در فرایند وایرکات بررسی کردند. نتایج مدل‌سازی به روش سطح پاسخ تأثیر چشمگیر زمان روشنی پالس و ولتاژ سروو را بر انحراف ابعادی تایید کرد [22].

آریا و سینگ به بهینه‌سازی پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، جریان اوج و ولتاژ سروو ر انحراف ابعادی و نرخ برش در فرایند وایرکات پرداختند. نتایج تحلیل واریانس در این پژوهش نشان داد زمان روشنی پالس تأثیرگزارترین پارامتر بر انحراف ابعادی است [23].

قاسم‌پور و همکاران با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA)، سعی کردند انحراف هندسی قطعات تولید شده توسط وایرکات را به حداقل برسانند. پارامترهای ورودی در این مطالعه شامل سرعت سیم، زمان پالس و نرخ تغذیه بود. این مطالعه دیدگاه جدیدی برای بهینه‌سازی دقت ابعادی در فرایند وایرکات ارائه کرد [24].

گارگ و شارما با استفاده از روش رویه پاسخ و تحلیل واریانس به بهینه‌سازی دقت ابعادی در فرایند وایرکات پرداختند. آنها گزارش دادند با افزایش زمان روشنی پالس و جریان پیک، انرژی تخلیه شدید برای مدت زمان طولانی‌تری به قطعه‌کار برخورد می‌کند. این مورد فشار و نیروهای رانش بیشتری بر روی سیم وارد می‌کند که باعث افزایش انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی شده آن و در نتیجه افزایش انحراف ابعادی می‌شود [25].

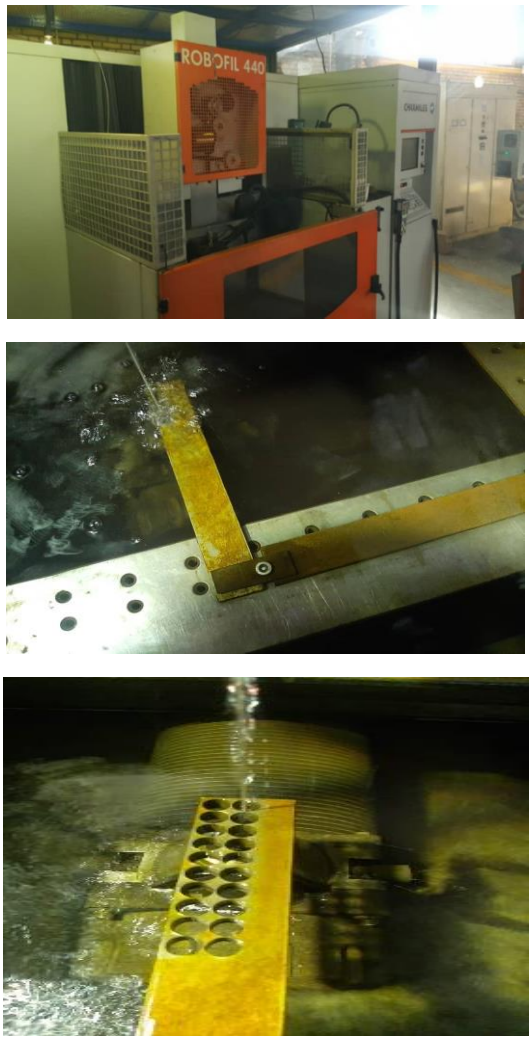
از آنجا که کلیرانس و تلرانس‌های ابعادی از پارامترهای بسیار مهم برای عملکرد صحیح قالب در تولید قطعه‌ای دقیق محسوب می‌شوند، لذا تولید قالبی که قرار است دقت ابعادی بالایی داشته باشد نیاز به ماشین‌کاری با دقت بالا دارد، همین امر سبب کاربرد وسیع وایرکات در صنایع قالب‌سازی شده است. عملکرد ماشین وایرکات کاملاً به پارامترهای ماشین‌کاری وابسته است. به دست آوردن رابطه میان پارامترهـای ماشین‌کاری و خـصوصیات ماشین‌کاری در فرآینـد وایرکات به دلیل تعدد پارامترهای فرآیندی کاری بسیار دشوار است. بنابراین انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری مناسب می‌تواند فرایند را به سمت دقت ابعادی مطلوب سوق دهد. روش رویه پاسخ از جمله تکنیک‌های ریاضی

و آماری می‌باشد که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، استفاده می‌گردد و هدف آن مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ است. این روش می‌تواند نمودارهای خروجی مناسبی را جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر ارائه دهد [29-26]. در این تحقیق تلاش شده تا دقت ابعادی که نقشی اساسی در تعیین جایگاه فرایند وایرکات دارد، با استفاده از روش رویه پاسخ بهینه‌سازی شود. سه پارامتر سرعت سیم، کشش سیم و توان ژنراتور به عنوان پارامترهای ورودی در این فرایند انتخاب شدند.

شرایط آزمایشگاهی

یکی از اصلی‌ترین فولادهای مورد استفاده در ساخت قالب‌ها، فولاد کم‌آلیاژ مولیبدنی Mo40 است که در استاندارد AISI به آن فولاد ۴۱۴۰ گفته می‌شود. این آلیاژ به دلیل وجود کروم ترد و شکننده است. برای حذف تردی به آن حدود ۰,۲ درصد نیکل اضافه می‌شود. نکته قابل‌توجه در این فولادها مقاومت آن‌ها تا حرارت ۵۰۰–۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. کربن، کرم، منگنز، مولیبدن و سیلسیم عناصر آلیاژی مورد استفاده در این فولادها می‌باشند. این فولادها دارای نسبت استحکام به وزن بالایی می‌باشند، زیرا عملیات آستینه کردن و بعد کوئنچ و سپس تمپر کردن روی آن‌ها انجام می‌شود. در این پژوهش از فولاد Mo40 به عنوان ماده قطعه‌کار استفاده شد. ابتدا جهت یکنواختی در ضخامت با استفاده از دستگاه صفحه تراش، قطعه کار کاملاً کف‌تراشی شد و به ابعاد نهایی ۳۲۰ در ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر رسانده شد. سپس بر روی دستگاه وایرکات پنج محور CHARMILLES شکل (۲) تثبیت شد. سه پارامتر سرعت تزریق سیم، کشش سیم و توان ژنراتور به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شد. محدوده این پارامترها در جدول (۱) نشان داده شده است.

سرعت سیم و کشش سیم هر دو از پارامترهای کنترل حرکت سیم می‌باشند. سرعت تغذیه سیم نشان دهنده طولی از سیم است که در واحد زمان از قرقره باز می‌شود. افزایش غیرضروری این پارامتر موجب افزایش سیم مصرفی می‌شود از طرفی پایین بودن بیش از حد آن منجر به افزایش احتمال پارگی سیم خواهد شد.



شکل ۲ دستگاه وایرکات پنج محوره و قید و بند قطعه‌کار بر روی آن

جدول ۱ شرایط انجام آزمایش

قطر سیم (میلیمتر)	۰,۲
جنس سیم	مس
سیال دی الکتریک	آب مقطر
سرعت تزریق سیم (سانتیمتر بر ثانیه)	۲–۱۰
کشش سیم (کیلوگرم)	۰,۵–۲,۵
توان ژنراتور (درصد)	۱۰–۵۰

با توجه به لقی‌های موجود در مسیر حرکت سیم، انتخاب مقدار مناسب برای این پارامتر در کاهش ارتعاشات سیم بسیار موثر است. کشش سیم نیز نیرویی طولی است که از طرف ماشین به سیم اعمال می‌شود تا آن را به صورت یک خط مستقیم نگه دارد. به دلیل وجود نیروهای فرآیندی و انعطاف پذیری سیم همواره امکان انحراف و خیز سیم وجود دارد که به وسیله

این پارامتر می‌توان تأثیر آن را کاهش داد. اگر کشش مناسب روی سیم اعمال شود انحراف از مسیر، ارتعاش و تغییرشکل بطور موثری کاهش یافته و در نتیجه خطای ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. برای ایجاد دقت ماشین‌کاری پایدار یک مقدار مشخصی از کشش در سیم برای محدود کردن انحراف مسیر، خمش وارتعاش الزامی است. در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی پارامترهای ذکر شده با استفاده از روش رویه پاسخ، ۲۰ آزمایش مطابق با جدول (۲) انجام شد. برای هر تست، یک استوانه به قطر قاعده ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر از قطعه‌کار برش‌کاری شد.

در جدول (۲) بر اساس روش رویه پاسخ، یک طرح آزمایش تهیه شده است. روش رویه پاسخ، به عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش، در حقیقت یک نوع مدل‌سازی محسوب می‌شود که به دنبال ارایه مدلی جهت برقراری رابطه بین متغیر پاسخ و فاکتورها می‌باشد. به عبارت دیگر رویه پاسخ، متشکل از ابزارهای آماری است. هدف در طرح‌های رویه پاسخ، بهینه‌سازی متغیر پاسخ، که تحت تأثیر فاکتورها می‌باشد، با انجام کمترین تعداد آزمایش است. در روش رویه پاسخ تلاش بر این است که با استفاده از یک طرح آزمایش مناسب، راهی برای تخمین اثرات متقابل، اثرات درجه دوّم و حتی شکل موضعی رویه پاسخ مورد بررسی قرار گیرد. یک آزمایش یک سری از آزمون‌هاست که اجرا نامیده می‌شود که ترتیب استاندارد و ترتیب اجرا در ستون-های جدول (۲) نشان داده شده‌است. در هر آزمایش تغییرات در فاکتورها به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند. همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ آزمایشات بر اساس سطح پاسخ

ترتیب استاندارد	ترتیب اجرا	کشش (کیلوگرم)	سرعت (سانتیمتر بر ثانیه)	توان (درصد)	مقدار اندازه گیری شده قطر دایره ۱۰ میلیمتری	میزان خطا از دایره ۱۰ میلیمتری (میکرومتر)
6	1	2/5	2	50	9/914	۷۶
1	2	0/5	2	10	9/965	۳۵
20	3	1/5	6	30	9/983	۱۷
4	4	2/5	10	10	9/983	۱۷
12	5	1/5	10	30	9/987	۱۳
19	6	1/5	6	30	9/983	۱۷
۱۷	30	1/5	6	30	9/983	۱۷
7	8	2/5	10	50	9/993	۷
9	9	0/5	6	30	9/975	۲۵
11	10	1/5	2	30	9/994	۶
2	11	2/5	2	10	9/963	۳۷
10	12	2/5	6	30	9/976	۲۴
14	13	1/5	6	50	9/982	۱۸
15	14	1/5	6	30	9/991	۹
8	15	2/5	10	50	9/993	۷
5	16	0/5	2	50	9/973	۲۷
18	17	1/5	6	30	9/984	۱۶
3	18	0/5	10	10	9/964	۳۶
16	19	1/5	6	30	9/987	۱۳
13	20	1/5	6	10	9/974	۲۶

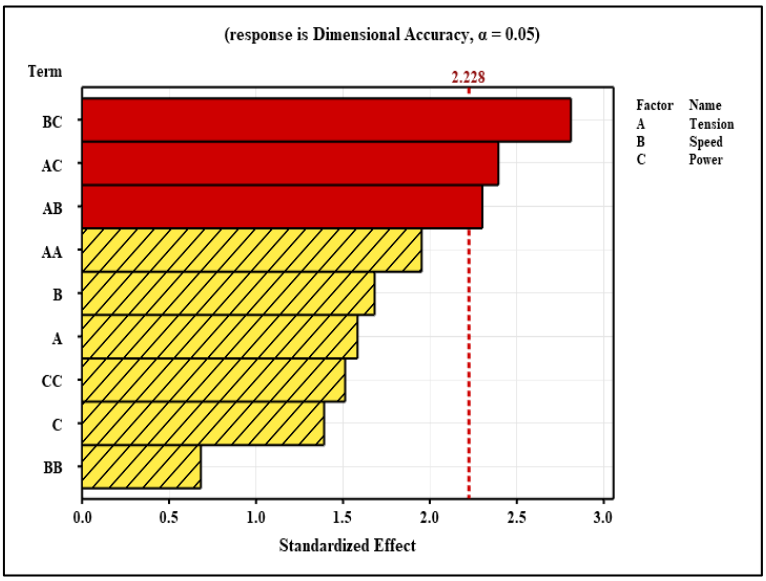
در این تحقیق، سه فاکتور: ۱. کشش، ۲. سرعت و ۳. توان به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند و دقّت ابعادی به

عنوان متغیر پاسخ آورده شده است. ساخت مدل‌های رویه پاسخ در طرح‌های رویه پاسخ، یک فرایند تکراری می‌باشد. به محض اینکه یک مدل تقریبی به دست آمد، (جدول ۳ مشاهده شود) توسط روش نیکویی برازش، مورد آزمون قرار می‌گیرد که آیا جواب رضایت‌بخش است یا خیر، اگر جواب تأیید نشود تخمین فرایند دوباره شروع می‌شود و آزمایش‌های بیشتری انجام می‌شود. نتایج مربوطه در قالب جدول آنالیز واریانس در جدول (۳) آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، P-value اثرات متقابل بین فاکتورها کمتر از ۰,۰۵ هستند و شایستگی مدل هم مورد تأیید هست.

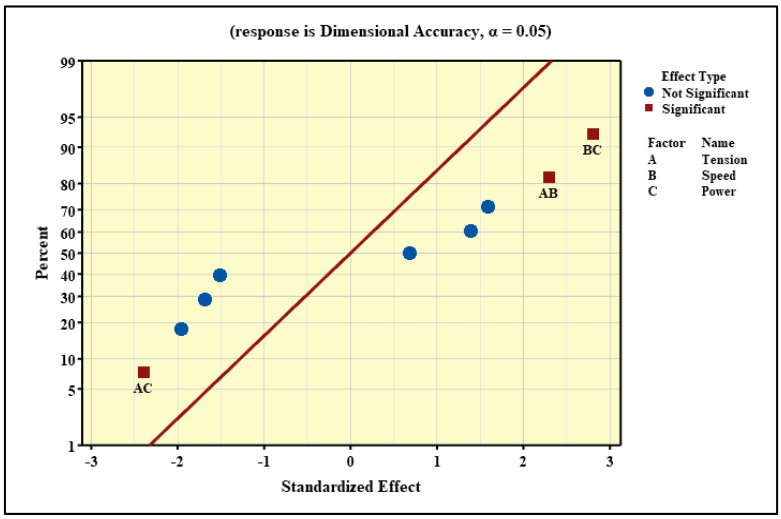
در شـــکل (۳) نمودار پارتو مربوط به میزان اثرگذاری اثرات پارامترهای ا صلی، متقابل و مربع بر روی پارامتر خروجی (دقت ابعادی) ن شان داده شده ا ست. بر ا ساس این نمودار، با ضریب اطمینان ۰,۹۵، اثرات متقابل فاکتورها دارای بیشـــترین اثرگذاری می‌باشند؛ BC: اثر متقابل سرعت و توان، AC: اثر متقابل کشش و توان و AB: اثر متقابل کشـــش و ســـرعت. در این نمودار، هر میله ای که از خط عمودی ۲,۲۲۸ عبور کند بیانگر آن ست که بر متغیر پا سخ تأثیر گذار می با شد. عدد مذکور بر ا ساس ضریب اطمینان ۹۵ در صد محا سبه شده ا ست. در حقیقت نمودار پارتو به دنبال آن اســـت عواملی را که مجموع میزان تأثیر آنها بر متغیر پاسخ بیشتر از ۸۰ درصد تأثیرات را تشکیل می دهد را مشخص کند. به عبارت دیگر به دنبال تعیین ۲۰ درضـــد از عامل هایی است که سهم آنها در تغییرات متغیر پاسخ برابر ۸۰ درصد است که در این تحقیق این عوامل عبارتند از : اثر متقابل ســـرعت و توان،: اثر متقابل کشش و توان و اثر متقابل کشش و سرعت.

جدول ۳ آنالیز واریانس

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.005049	0.000561	6.44	0.004
Linear	3	0.000567	0.000189	2.17	0.155
Tension	1	0.000219	0.000219	2.51	0.144
Speed	1	0.000246	0.000246	2.83	0.124
Power	1	0.000169	0.000169	1.94	0.194
Square	3	0.000991	0.000330	3.79	0.047
Tension*Tension	1	0.000332	0.000332	3.81	0.079
Speed*Speed	1	0.000041	0.000041	0.47	0.509
Power*Power	1	0.000199	0.000199	2.29	0.161
Way Interaction	3	0.002449	0.000816	9.37	0.003
Tension*Speed	1	0.000461	0.000461	5.29	0.044
Tension*Power	1	0.000499	0.000499	5.73	0.038
Speed*Power	1	0.000688	0.000688	7.90	0.018
Error	10	0.000871	0.000087		
Lack-of-Fit	4	0.000818	0.000205	23.24	0.001
Pure Error	6	0.000053	0.000009		
Total	19	0.005921			
Dimensional Accuracy =		9.9607 + 0.0294 Tension – 0.007 Speed + 0.001 Power - 0.01 Tension*Tension + 0.0002 Speed*Speed - 0.0002 Power*Power + 0.0023 Tension*Speed -0.00049 Tension*Power + 0.00014 Speed*Power			



شکل ۳ پارتو تأثیرات استاندارد



شکل ۴ نرمال تأثیرات استاندارد

در شکل (۴)، نمودار نرمال تأثیرات نشان داده شده است، عوامل مؤثر با نماد (■) و عوامل غیرمؤثر با نماد (●)، نشان داده شده است. در این نمودار، ضریب اطمینان برابر ۰,۹۵ است. در واقع نمودارهای ۳ و ۴ نشان می‌دهند که پارامترهای انتخاب شده در تحقیق بر روی دقت ابعادی اثرگذار هستند و از این رو بررسی و تحلیل آن‌ها جهت دستیابی به مقدار بهینه قابل توجیه است. این نمودار در حقیقت، بیان گرافیکی از آنالیز واریانس می باشد. در این نمودار مقادیر نرمالایز شده ی میزان تأثیرات به تصویر کشیده شده است و آنهایی که بیشترین تأثیر را داشته اند مشخص می کند.

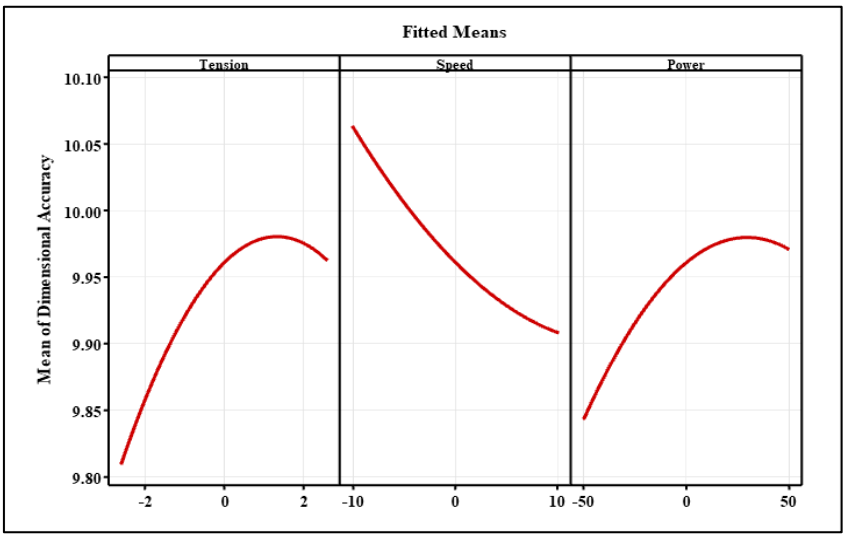
در شکل‌های (۵) و (۶)، تغییرات میانگین دقّت ابعادی با توجّه به سه فاکتور کشش، سرعت، توان و اثرات متقابل نشان داده شده است. این نمودارها تأیید دیگری از پارامترهای مؤثر بر دقت ابعادی و میزان اثرگذاری آنها می‌باشند. درشکل۵، در قسمت چپ نمودار تغییرات میانگین دقت ابعادی بر اساس تغییر در میزان کشش به تصویر کشیده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار متغیر پاسخ به ازای تغییر مقدار کشش به صورت یک تابع مقعر می باشد. در قسمت میانی نمودار تغییرات متغیر پاسخ بر بازه ی تغییرات عامل سرعت ترسیم شده است که یک تابع نزولی می باشد و در قسمت راست نمودار تغییرات متغیر

پاسخ بر اساس تغییر در مقادیر عامل توان نشان داده شده است که به صورت یک تابع مقعر می باشد.

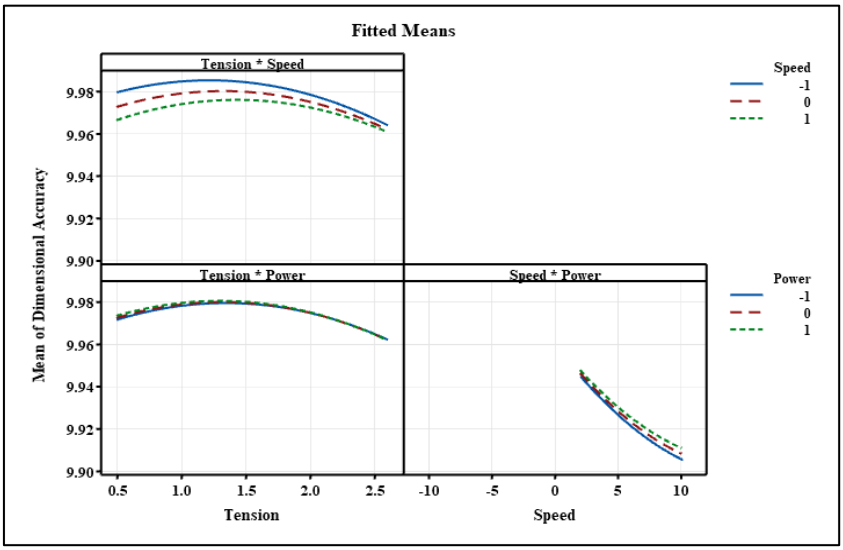
در شکل (۶)، تغییرات در میانگین متغیر پاسخ یعنی میزان دقت ابعادی را بر اساس تغییرات همزمان در دو عامل نشان داده است. کل ترکیبات انتخاب دو عامل از بین سه عامل برابر سه می باشد که به همین جهت شکل (۶) از سه نمودار تشکیل شده است. به عنوان نمونه در نمودار بالای شکل، تغییر مقدار متغیر پاسخ دقت ابعادی بر اساس تغییر همزمان در دو عامل کشش و سرعت نشان داده شده است. محور افقی این نمودار تغییر در مقدار کشش و محور عمودی تغییر در مقدار دقت ابعادی را نشان می دهد. سه نمودار با نمادهای متفاوت بیانگر مقادیر متغیر پاسخ در سه سطح عامل سرعت می باشند.

در شکل (۷)، با استفاده از نرم افزار مینی‌تب، پاسخ بهینه روش رویه پاسخ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای مقادیر کشش=۱,۳۴۸۵، سرعت=۱۰ و توان=۴۶,۷۶۷۷ مقدار دقت ابعادی ۱۰ خواهد شد. در نمودار مقدار d=1 بیانگر شایستگی جواب می‌باشد که حداکثر شایستگی را نشان می‌دهد.

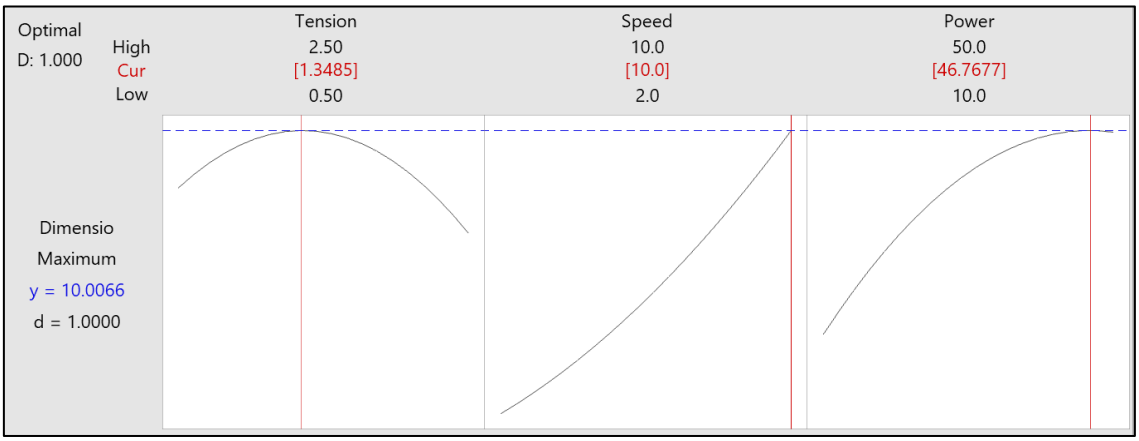
در این شکل می توان با تغییر در میزان عوامل، مقدار متغیر پاسخ را دید. شایان ذکر است که می‌توان مقادیر را غیر از مقادیر سطوح تعریف شده در نظر گرفت.



شکل ۵ اثرات پارامترهای اصلی بر دقّت ابعادی



شکل ۶ اثرات متقابل پارامترها (حاصلضرب پارامترها) بر دقّت ابعادی



شکل ۷ جواب بهینه

نتیجه‌گیری

دستیابی به دقت ابعادی بالا در ساخت قاب‌های برش بسیار حائز اهمیت است. فرایند وایرکات یکی از فرایندهای متداول جهت ساخت این قالب‌ها می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از آنالیز واریانس و روش رویه پاسخ مقدار دقت ابعادی بر اساس پارامترهای سرعت سیم، کشش سیم و توان ژنراتور تحلیه، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شود. نتایج نشان می‌دهد که اثرات متقابل پارامترها دارای بیشترین تأثیر بر دقت ابعادی هستند. در ادامه بر اساس روش رویه پاسخ، مقدار بهینه پارامترها و دقت ابعادی متناظر استخراج گردید. بر این اساس به ازای مقادیر کشش ۱,۳۴۸۵ کیلوگرم، سرعت سیم ۱۰ سانتیمتر بر ثانیه و توان ۴۶,۷۶۷۷ درصد مقدار دقت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. جهت صحت‌سنجی نتایج مدل، این مقادیر تست گردید که دارای ۰,۲ درصد خطا نسبت به مقدار پیش‌بینی شده بود.

واژه نامه

برش با سیم	Wire Cut
سرعت تغذیه سیم	Wire Feed Speed
کشش سیم	Wire Tension
توان ژنراتور	Generator Power
روش رویه پاسخ	Response Surface Method
دقت ابعادی	Dimensional Accuracy
بهینه سازی	Optimization
فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیم	Wire Cut Electro Discharge Machinibg

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A. Kumar, V. Kumar and J. Kumar, "Multi-response optimization of process parameters based on response surface methodology for pure titanium using WEDM process", *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, pp. 2645-2668, (2013).

[2] Q. Liu, Q. Zhang, M. Zhang and J. Zhang, "Review of size effects in micro electrical discharge machining", *Precision Engineering*, vol. 44, pp. 29-40, (2016).

[3] M. Hourmand, A.A. Sarhan and M.Y. Noordin, "Development of new fabrication and measurement techniques of micro-electrodes with high aspect ratio for micro EDM using typical EDM machine", *Measurement*, vol. 97, pp. 64-

78, (2017).

[4] J.C. Chen and J. Cox, "Taguchi-based optimization of surface roughness and dimensional accuracy in wire EDM process with S7 heat treated steel", *Materials and Metallurgical Engineering*, vol. 11, no. 8, Pp. 568-573, (2017).

[5] N.M. Abbas, D.G. Solomon and M.F. Bahari, "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)", *machine tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 1214-1228, (2007).

[6] A. Banu and M.Y. Ali, "Electrical discharge machining (EDM): a review", *Engineering Materials and Manufacture*, vol. 1, pp. 3-10, (2016).

[7] R. Chalisgaonkar and J. Kumar, , "Multi-response optimization and modeling of trim cut WEDM operation of commercially pure titanium (CPTi) considering multiple user's preferences", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 18, pp. 125-134, (2015).

[8] Y.H. Guu and H. Hocheng, "Improvement of fatigue life of electrical discharge machined AISI D2 tool steel by TiN coating", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 318, pp. 155-162, (2001).

[9] S. Jeelani, and M.R. Collins, "Effect of electric discharge machining on the fatigue life of Inconel 718", *International journal of fatigue*, vol. 10, no. 2, pp. 121-125, (1988).

[10] O.A. Zeid, "On the effect of electrodischarge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel", *Materials Processing Technology*, vol. 68, pp. 27-32, (1997).

[11] M. Ramulu, G. Paul and J. Patel, "EDM surface effects on the fatigue strength of a 15 vol% SiCp/Al metal matrix composite material", *Composite structures*, vol. 54, no. 1, pp. 79-86, (2001).

[12] H. Nair, A. Pramanik, A.K. Basak, C. Prakash, S. Debnath, S. Shankar and A.R. Dixit, "Experimental investigation on material removal rate, kerf width, surface roughness and the dimensional accuracy the accuracy of hole in Inconel 718 using wire electric discharge", *Process Mechanical Engineering*, vol. 1, (2022).

[13] S. Zahoor, H.A. Azam, M.P. Mughal, N. Ahmed, M. Rehman and A. Hussain, "WEDM of complex profile of IN718: multi-objective GA-based optimization of surface roughness, dimensional deviation, and cutting speed", *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, pp. 2289-2307, (2021).

[14] B.B. Manjunatha, H.V. Ravindra and N. Kuruvila, "ESTIMATION OF SURFACE ROUGHNESS AND DIMENSIONAL ACCURACY USING PROCESS PARAMETERS IN WIRE CUT EDM BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK", *International of symposium on measurement and quality control*, vol. 1, (2007).

[15] K. Kanlayasiri and P. Jattakul, "Simultaneous optimization of dimensional accuracy and surface roughness for finishing cut of wire-EDM ed K460 tool steel", *Precision engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 556-561, (2013).

[16] M.Y. Ali, A. Banu, M. Salehan, E.Y. Adesta, M. Hazza and M. Shaffiq, "Dimensional accuracy in dry micro wire electrical discharge machining", *Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 3321-3329, (2018).

[17] T. Chaudhary, A.N. Siddiquee, A.K. Chanda, S. Ahmad, I.A. Badruddin and Z.A. Khan, "Multiple Response Optimization of Dimensional Accuracy of Nimonic Alloy Miniature Gear Machined on Wire Edm Using Entropy Topsis Andpareto Anova", *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 126, no. 1, pp. 241-259, (2021).

[18] S. Chakraborty, S. Mitra and D. Bose, "Optimisation of machining performance in PMWEDM of titanium alloy using the hybrid technique (GRA-PCA)", *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 1-14, (2020).

[19] H. Abyar Firouzabadi, J. Parvizian and A. Abdullah, "Improving accuracy of curved corners in wire EDM successive cutting", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, pp. 447-459, (2015).

[20] M.N. Islam, N.H. Rafai and S.S. Subramanian, "An investigation into dimensional accuracy achievable in wire-cut electrical discharge machining", *Proceedings of the world congress on Engineering*, vol. 3, pp. 2476-2481, (2010).

[21] D. Sudhakara and G. Prasanthi, "Optimization of dimensional deviation: wire cut EDM of vanadis-4e (powder metallurgical coldworked tool steel) by Taguchi method", *Proceedings of 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR), IIT Guwahati, Assam*, India, December 12–14, (2014).

[22] N. Sharma, R. Khanna, R.D. Gupta and R. Sharma, "Modeling and multiresponse optimization on WEDM for HSLA by RSM", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, pp. 2269-2281, (2013).

[23] R. Arya and H. Singh, "Optimization of Wire-cut EDM process parameters using TLBO algorithm", *Engineering Research Express*, vol. 4, no. 3, pp. 035051, (2022).

[24] M. Ghasempour-Mouziraji, M. Hosseinzadeh, H. Hajimiri, M. Najafizadeh and E. Marzban Shirkharkolaei, "Machine learning-based optimization of geometrical accuracy in wire cut drilling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 123, no. 11, pp. 4265-4276, (2022).

[25] M.P. Garg, A. Jain and G. Bhushan, "Multi-objective optimization of process parameters in wire electric discharge machining of Ti-6-2-4-2 alloy", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 39, pp. 1465-1476, (2014).

[26] H. Abyar Firouzabadi, A. Abdullah, J. Parvizian and A. Fadai Tehrani, "Investigating the accuracy of machining corners in wirecut and determining the relationship between the error of the corner radius and the thickness of the remaining load", *The 11th conference of manufacturing and production engineering*, Iran, October 19-21, (2010). (In Persian)

[27] H. Rezaei Ashtiani, H. Khoshkish and R. Narimani, "Investigating the dimensional accuracy of the part and tool wear in EDM using different types of tool electrodes", *The 12th annual (international) conference of mechanical engineering*, Iran, May, (2006). (In Persian)

[28] M. Qureshi, V. Tahmasabi, S. Hakak Zargar, "Optimization of machining parameters on surface quality and dimensional accuracy of the hole in micro-drilling process of rice alloy by response surface method", *The 12th conference of manufacturing and production engineering*, Iran, December 29-30, (2011). (In Persian)

[29] H. Rezaei Ashtiani and H. Bisadi, "Investigating the effect of cross-sectional area of spark energy distribution on the dimensional accuracy of electrical discharge machining (EDM)", *The 9th Manufacturing and Production Engineering Conference*, Iran, February, (2010). (In Persian)

CONTENTS

Investigation of New Friction Models in Two-Dimensional Manipulation of Gastric Cancer Tissue	Moein Taheri	1
Numerical Study of Flow and Heat Transfer in Cavity Receiver Tube of a Solar Power Tower with Different Inserts under Non-uniform Heat Flux	Siavash Zeynalpour – Zahra Mehrdoost	17
Estimation of Solar Radiation in Different Climates of Iran Using Hybrid Machine Learning Methods	Nabi Jahantigh - Jamshid Piri	37
Numerical Comparison of Shell Side Thermo-Hydraulic Characteristics for Shell and Tube Heat Exchangers with Trefoil and Segmental Baffle by Genetic Algorithm	Hadi Eskandari – Iman Hashemi	55
Investigating the Effect of Tibia Bone Heterogeneity on Natural Frequency Using Modal Test and Finite Element Modeling	Hamid Dehghan Tarzjani - Mohammad Ali Nazari Mohammad Mahjoob	77
Optimization of Dimensional Accuracy of Mold Steel in Wire Cut Process Based on Response Surface Method	Masoud Seidi - Farshad Rabiei - Zahra Seydi	97

JOURNAL OF APPLIED AND COMPUTATIONAL SCIENCES IN MECHANICS

Ferdowsi University of Mashhad

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, United States
Dr. Hamid Niazmand	Professor	Ferdowsi University of Mashhad

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

ISSN 2008 - 918X

Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Investigation of New Friction Models in Two-Dimensional Manipulation of Gastric Cancer Tissue 1
Moein Taheri

Numerical Study of Flow and Heat Transfer in Cavity Receiver Tube of a Solar Power Tower with Different Inserts under Non-uniform Heat Flux 17
Siavash Zeynalpour - Zahra Mehrdoost

Estimation of Solar Radiation in Different Climates of Iran Using Hybrid Machine Learning Methods 37
Nabi Jahantigh - Jamshid Piri

Numerical Comparison of Shell Side Thermo-Hydraulic Characteristics for Shell and Tube Heat Exchangers with Trefoil and Segmental Baffle by Genetic Algorithm 55
Hadi Eskandari - Iman Hashemi

Investigating the Effect of Tibia Bone Heterogeneity on Natural Frequency Using Modal Test and Finite Element Modeling 77
Hamid Dehghan Tarzjani - Mohammad Ali Nazari
Mohammad Mahjoob

Optimization of Dimensional Accuracy of Mold Steel in Wire Cut Process Based on Response Surface Method 97
Masoud Seidi- Farshad Rabiei - Zahra Seydi

Serial No. 32

Vol. 35, No.2
Summer 2023