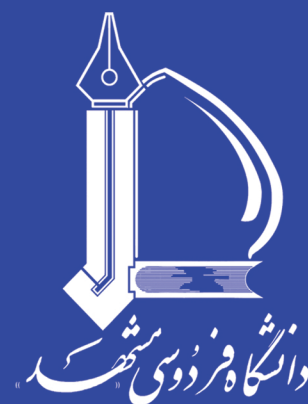


- ۱ مینیولیشن بافت سلولی سینه با هدف محاسبه مدول یانگ، با استفاده از تئوری تماسی تاتارا و میکروسکوپ نیروی اتمی
معین طاهری - حامد فرجی - پیمان کریمی
- ۱۷ بررسی تأثیر موقعیت‌های مختلف قرارگیری روزنه‌ها بر عملکرد آنتن هم محور تک‌روزنه و دو روزنه در درمان سرطان در بافت کبد به روش هایپرترمیا
بهراذ حقیقی - هادی صادقی پور - محمد شفیعی دهج
- ۳۳ امکان‌سنجی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی در واحدهای مسکونی در آب و هوای چهار شهر آبادان، بغداد، بصره و تهران از لحاظ صرفه‌جویی در انرژی
علی جبری - محمد رضا انصاری - مهدی معرفت
- ۵۱ مطالعه عددی تأثیر موانع با هندسه متفاوت بر انتقال حرارت جریان نانوسیال در یک کانال مستطیلی
کوروش جواهرده - حبیب کریمی
- ۶۵ بررسی اثر پارامترهای دستگاه فرز و مشخصات ابزار ماشین‌کاری بر زبری سطح محصولات چوبی
سعید یعقوبی - فرشاد ربیعی
- ۷۵ بررسی اثر سطح متحرک بر ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در نسبت سرعت بالا
حسن ابوالقاسمی گل افشانی - محمد جواد امیری
احسان روحی
- ۸۵ شبیه‌سازی جریان نانوسیال در عدد رینولدز پایین در یک میکروکانال با انبساط ناگهانی یکطرفه تحت اثر میدان مغناطیسی
فروزان مرادی - پدرام پورنادری
- ۱۰۱ مدل‌سازی و شبیه‌سازی رشد در نارسایی قلبی دیاستولیک
پژمان نمه‌شیری - اکبر اللهوردی زاده - بهنام داداش زاده



هیئت تحریریه:

دانشیار، دانشگاه آرام آی تی، استرالیا	دکتر اکبر آفاقی خطیبی
دانشیار، دانشگاه استرالیای جنوبی، استرالیا	دکتر کاظم ابهری
استاد، دانشگاه آرام آی تی، استرالیا	دکتر علی اکبر اکبرزاده
استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوا فضا	دکتر مسعود برومند
دانشیار، دانشگاه سوانزی، انگلستان	دکتر حامد حداد خداپرست
استاد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک	دکتر سید محمد رضا خلیلی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر احسان روحی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر محمود شریعتی
استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک	دکتر ابراهیم شیرانی چهارسوقی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر مسعود طهانی
استاد، دانشگاه کالیفرنیا، گروه بیومکانیک سلول مولکولی، آمریکا	دکتر محمد رضا کاظم پور مفرد
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر مهران کدخدایان
دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر حمید معین فرد
استاد، دانشگاه نیوکاسل، استرالیا	دکتر بهداد مقتدری
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر محمد رضا مه پیکر
استاد، دانشگاه کنسا مریتا، آمریکا	دکتر سیمین ناصری
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک	دکتر حمید نیازمند

ویراستار: الهام دهقان

ویرایش و صفحه آرایی: سیده عاطفه نوعی

کارشناس نشریه: تکتم هوشمند

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

دورنگار: ۰۵۱-۳۸۷۶۳۳۰۱

تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۶۰۲۴

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

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

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

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

فهرست مطالب

۱	معین طاهری - حامد فرجی - پیمان کریمی	منیپولیشن بافت سلولی سینه با هدف محاسبه مدول یانگ، با استفاده از تئوری تماسی تاتارا و میکروسکوپ نیروی اتمی
۱۷	بهراد حقیقی - هادی صادقی پور - محمد شفیعی دهج	بررسی تأثیر موقعیت‌های مختلف قرارگیری روزنه‌ها بر عملکرد آنتن هم‌محور تک‌روزنه و دو روزنه در درمان سرطان در بافت کبد به روش هایپر ترمیا
۳۳	علی جبری - محمد رضا انصاری - مهدی معرفت	امکان‌سنجی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی در واحدهای مسکونی در آب و هوای چهار شهر آبادان، بغداد، بصره و تهران از لحاظ صرفه‌جویی در انرژی
۵۱	کوروش جواهرده - حبیب کریمی	مطالعه عددی تأثیر موانع با هندسه متفاوت بر انتقال حرارت جریان نانوسیال در یک کانال مستطیلی
۶۵	سعید یعقوبی - فرشاد ربیعی	بررسی اثر پارامترهای دستگاه فرز CNC و مشخصات ابزار ماشین‌کاری بر زبری سطح محصولات چوبی
۷۵	حسن ابوالقاسمی گل‌افشانی - محمد جواد امیری احسان روحی	بررسی اثر سطح متحرک بر ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در نسبت سرعت بالا
۸۵	فروزان مرادی - پدram پورنادری	شبیه‌سازی جریان نانوسیال در عدد رینولدز پایین در یک میکروکانال با انبساط ناگهانی یک‌طرفه تحت اثر میدان مغناطیسی
۱۰۱	پژمان نمه‌شیری - اکبر اللهوردی زاده - بهنام داداش زاده	مدل‌سازی و شبیه‌سازی رشد در نارسایی قلبی دیاستولیک



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

Manipulation of Breast Cell Tissue with the Aim of Calculating Young's Modulus, using Tatara Contact Theory and Atomic Force Microscopy

Research Article

Moein Taheri¹, Hamed Faraji², Peyman karimi³

DOI: [10.22067/jacsm.2023.80537.1156](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.80537.1156)

1. Introduction

Nanotechnology is widely used in various fields such as construction, medicine, and compounds, especially in processes such as nanomanipulation. A general trend in this process is examining the influencing structures and parameters at the nanoscale. The submissions made in this process are performed in phases 1 and 2, each with a different purpose. Atomic force microscopy is used in various fields, such as measuring atomic forces and surface mechanical properties at the molecular level. It is also one of the most important tools at the nanoscale. Atomic force microscopy captures nanoscale images without the limitations of electrical sensing. And the ease of guidance and more scanning environment it offers researchers is one of the reasons it outperforms other scanning microscopes. One of the important applications of atomic force microscopy is the extraction of material properties, friction, magnetic behavior, and mechanical properties. Other applications include high-resolution imaging and nanoscale cutting processes. Even after the success of atomic force microscopy in materials science, chemistry and physics, applications in biology were quickly found. Some of the applications of this tool in medical science, property extraction and nanomanipulation processes are listed below. In this research, Young's modulus of breast cancer tissue was calculated using Tatara's contact model. The experimental tests carried out to draw the experimental diagram of the target tissue have been repeated 5 times. A theoretical diagram was also examined with an atomic force microscope, and created from the contact model of the tatara and the shape generated in this process. Finally, by comparing experimental and theoretical graphs and also by considering Tatara's contact model, the range of Young's modulus of breast cancer tissue has been determined.

2. Investigation of nanomanipulation process and experimental work

The parameters of the atomic force microscope have a significant impact on the results of the process. For example, in the first phase of manipulation (including the identification

of influential mechanical parameters such as particle geometry, pole shape, contact model and critical force to move the particle), two critical parameters of force and time have been important. The most important factors affecting these critical parameters are the length of the pole, the length of the needle, and other dimensional characteristics of the atomic force microscope. The effects of these parameters have been qualitatively investigated in past researches.

3. Modeling using Tatara contact model

An important and fundamental point in using atomic force microscopy is to know the shape change of particles when using this microscope. It is possible to investigate this deformation through the use of contact mechanics equations. Since the type of micro/nanoparticles is the chosen target for the simulation of contact mechanics in this study of biological micro/nanoparticles, the utmost precision should be used in the selection of contact theories. Tatara's theory is related to hyperelastic bodies and is selected considering the factors affecting biological cells. Equation 3 is derived by expanding Equations 1 and 2.

$$\delta_H = \left[\frac{F}{a} \right]^{\frac{2}{3}} - \frac{F}{a_c} \quad (1)$$

$$\frac{1}{a_c} = \frac{(1+\nu_1)(3-2\nu_1)}{4\pi E_1 R_1} + \frac{(1+\nu_2)(3-2\nu_2)}{4\pi E_2 R_2} \quad (2)$$

$$F = a\delta_H^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{3a^2}{2a_c} \right) \delta_H^2 + \left(\frac{15a^3}{8a_c^2} \right) \delta_H^{\frac{5}{2}} \quad (3)$$

In Equations 1 to 3, the parameters F and a represent the contact force and radius in the Tatara model, respectively. Also, ν_1 Poisson's ratio of the particle, ν_2 Poisson's ratio of the needle, E_1 modulus of elasticity of the particle, E_2 modulus of elasticity of the needle, R_1 radius of the particle, R_2 radius

*Manuscript received: January 10, 2023. Revised, January 29, 2023, Accepted, February 21, 2023.

¹ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Email: m-taheri@araku.ac.ir

² M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

³ M. Sc. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

of the needle and δ_H penetration depth are in Tatara contact model.

4. Results

In this section, graphs of penetration depth and force versus time were first extracted to extract the modulus of breast cancer tissue. After drawing the experimental and theoretical diagrams, this section calculates the Young's modulus according to the Tatara contact model.

After preparing breast cancer tissue in the laboratory, the tissue was placed on a microscope slide and examined with an atomic force microscope. The graph in Figure 1 shows experimental results of breast cancer sample testing. The force is in nanonewtons and the penetrating power of the needle is in nanometers. The experiment was repeated five times and the experimental plot was extracted from the average.

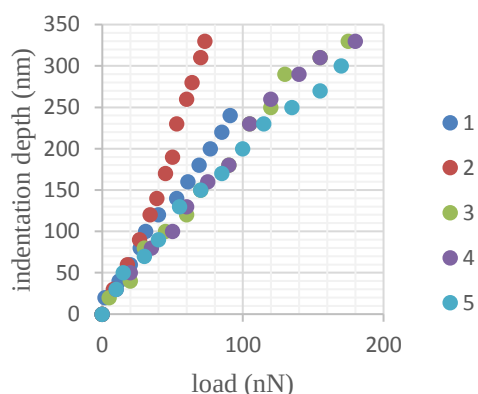


Figure 1. Atomic force microscope imaging results to determine Young's modulus of breast tissue

5. Verification

To verify the accuracy of the results obtained, a comparison of the results of this article with those of references 8 and 20 is presented in this section. References 8 and 20 use Hertzian

contact model. This contact model considers the simplest contact conditions without considering adhesion forces. Due to the importance of adhesion in tissue studies, Tatara contact model was used in this study to simulate manipulation by examining experimental results. As Figure 8 shows, the Young's modulus magnitude for the Tatara model is equal to 2.25 kPa, which roughly corresponds to the Young's modulus magnitude for Hertzian contact model in both references, 1.6 and 1.23. The difference in Young's modulus values is also due to this difference in the contact model equation.

6. Conclusion

The process of nanomanipulation moves particles at the nanoscale with the aim of improving or altering the properties of materials, and also studies at the nanoscale to understand the structure and mechanical and chemical properties of cells and other tissues. It is so important that it has been introduced in various industries. It was also important in medicine. Research conducted in the fields of medicine and cancer show how important it is to know the structure of cancerous and healthy tissue for the recovery and diagnosis of this disease. The elastic modulus is one of the desirable properties for distinguishing between healthy and cancerous cells. Therefore, a second stage investigation of manipulation of biological particles was carried out in this article with the aim of extracting the elastic modulus. Reviewing previous studies and examining experimental charts obtained from atomic force microscopy imaging, we believe that Tatara contact model is suitable for this study. To ensure experimental test results, an experimental chart is created by averaging 5 tests. Finally, simulations and comparisons performed in MATLAB software calculated a range of 2–2.5 kPa values for the modulus of elasticity of breast cancer tissue according to Tatara contact model. In future studies, it is possible to present studies on the influence of different environments on the manipulation process of micro/nanoparticles, the influence of different shapes of atomic force microscope rods, and other environmental and geometric parameters.

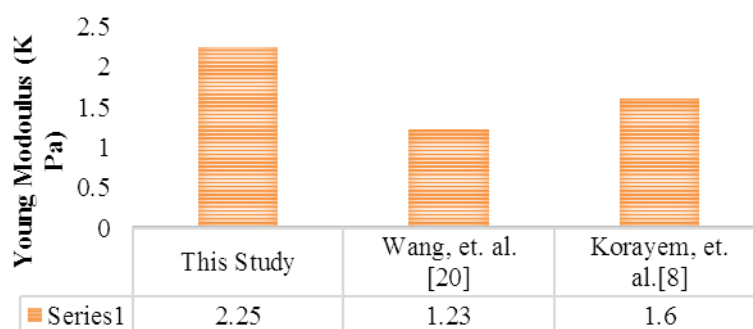


Figure 2 Comparison of validation of force values and critical time obtained from the current research with references 8 and 20



منیپولیشن بافت سلولی سینه با هدف محاسبه مدول یانگ، با استفاده از تئوری تماسی تاتارا و میکروسکوپ

نیروی اتمی*

مقاله پژوهشی

پیمان کریمی^(۳)حامد فرجی^(۲)معین طاهری^(۱)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80537.1156

چکیده میکروسکوپ نیروی اتمی یک ابزار قدرتمند و دقیق برای شناسایی خواص ذرات، بررسی نیروهای بین مولکولی، توپوگرافی سطح و منیپولیشن ذرات در ابعاد میکرو/نانو است. نانومنپولیشن از جمله فرایندهایی است که از این ابزار به صورت مطلوب بهره‌برداری می‌شود. امروزه با پیشرفت علم و فناوری از منیپولیشن به منظور ساخت و تولید، تغییرات در خواص مواد، ساخت قطعات پزشکی با ارزش افزوده بیشتر و مواد خام کمتر، بررسی ساختار سلول‌های بیولوژیکی و بسیار موارد دیگر در مقیاس نانو استفاده می‌شود. لذا در این تحقیق به منظور بررسی خواص مکانیکی بافت سرطانی سینه از میکروسکوپ نیروی اتمی در طی فرایند نانومنپولیشن استفاده شده است. در طی این فرایند با بررسی تغییرات ناشی از نیرو-جابجایی، نمودارهای نیرو و عمق نفوذ برحسب زمان ترسیم شده‌اند. همچنین با توجه به اهمیت، تماس ذرات در ابعاد نانو و با در نظر گرفتن مدل تماسی تاتارا و هندسه بافت سرطانی سینه، شبیه‌سازی‌هایی در جهت استخراج مدول یانگ انجام شده است. همچنین به منظور بررسی میزان تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند منیپولیشن مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی، آزمایش‌های تجربی انجام شده و نمودار تجربی نیز ترسیم شده است. در نهایت با مقایسه‌های صورت گرفته در این تحقیق و با در نظر گرفتن مدل تماسی تاتارا، محدوده ۲ تا ۲/۵ کیلو پاسکال برای مقدار بافت سرطانی سینه محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی بافت سرطانی، مدل تماسی، نانومنپولیشن، میکروسکوپ نیروی اتمی.

Manipulation of Breast Cell Tissue with the Aim of Calculating Young's Modulus, Using Tatara Contact Theory and Atomic Force Microscopy

Moein Taheri

Hamed Faraji

Peyman karimi

Abstract Atomic force microscopy is a powerful and precise tool for identifying particle properties and studying intermolecular forces, surface topography, and particle manipulation in the micro-nano dimension. Nanomanipulation is one process that makes good use of this tool. Today, with advances in science and technology, manipulation is used to modify and manufacture the properties of materials, produce more valuable medical components and fewer raw materials, alter the structure of living cells and much more. We are working at the nanoscale. Therefore, in this study, we used atomic force microscopy to investigate the mechanical properties of breast cancer tissue during the nanomanipulation process. By considering the changes induced by the displacement force, force curves and penetration depths are plotted over time. Given the importance of nanoparticle-particle contact and the tatara contact model and breast cancer tissue geometry, simulations were performed to extract the Young's modulus. Experimental experiments and experimental charts were also performed to verify the agreement between the results of the simulation process based on atomic force microscopy. Finally, using the comparisons made in this study and considering the tatara contact model, a range of 2–2.5 kPa was calculated for breast cancer tissue volume.

Key Words Cancerous tissue, Contact model, Nanomanipulation, Atomic force microscopy.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۲/۲ می‌باشد.

Email: m-taheri@araku.ac.ir

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

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

(۳) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

مقدمه

فناوری نانو در حوزه‌های مختلف از جمله صنایع ساختمانی، پزشکی، ترکیبات شیمیایی و به‌خصوص در فرایندهایی همچون نانومنیپولیشن کاربرد فراوان دارد. روند کلی این فرایند بررسی ساختار و پارامترهای مؤثر بر آن در ابعاد نانو می‌باشد. جابه‌جایی‌های صورت گرفته در این فرایند در دو فاز اول و دوم انجام شده و هدف از هر یک از این فازها متفاوت می‌باشد. میکروسکوپ نیروی اتمی در زمینه‌های مختلف مانند اندازه‌گیری نیروهای اتمی و خواص مکانیکی سطوح در مقیاس مولکولی کاربرد دارد و همچنین یکی از مهم‌ترین ابزارها در زمینه نانو است. میکروسکوپ نیروی اتمی تصاویر نانو را بدون محدودیت در نمونه الکتریکی به دست می‌آورد. همچنین هدایت آسان و محیط اسکن بیشتری که در اختیار محقق قرار می‌دهد، از دلایل برتری آن بر میکروسکوپ‌های روبش‌گر دیگر است.

از کاربردهای مهم میکروسکوپ نیروی اتمی می‌توان به استخراج خواص مواد، اصطکاک، رفتار مغناطیسی و خواص مکانیکی اشاره نمود. همچنین از دیگر کاربردهای آن تصویربرداری با وضوح بالا و فرایند برش در مقیاس نانو می‌باشد. همچنین پس از موفقیت میکروسکوپ نیروی اتمی در زمینه‌های علوم مواد، شیمی و فیزیک به سرعت در علم زیست‌شناسی نیز مورد استفاده قرار گرفت. برخی از کاربردهای این ابزار در علوم پزشکی و در استخراج خواص و همچنین در روند نانومنیپولیشن در ادامه آورده شده است.

باتری‌های لیتیوم یون در نسل جدید به تراکم انرژی، خروجی برق و ایمنی نیاز دارند. در یک مطالعه ترکیب میکروسکوپ نیروی اتمی و طیف‌سنج جرمی ثانویه برای مشخصه‌ساختاری و الکتریکی این باتری‌ها مورد تحقیق قرار گرفته است [1].

حبیب‌الله و همکاران [2] طراحی یک الگوی خطی مطلوب مبتنی بر یک کنترل‌کننده گاوسی را برای موقعیت جانبی لوله پیزوالکتریک محرک مورد استفاده در یک میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه داده‌اند و نشان داده‌اند که برای دستیابی به عملکرد کنترل، بهتر است از کنترل‌کننده سنتی استفاده شود.

ایرانی و همکارانش [3] با توجه به اهمیت تشخیص زودهنگام سرطان ریه در روند درمانی این بیماری، به مطالعه روند تشخیص بافت‌های سرطانی با استفاده از نشانگرهای زیستی پرداخته‌اند. میکروسکوپ نیروی اتمی از جمله ابزار

مورد مطالعه در این تحقیق بوده است. کیم و همکاران به بررسی شکل نامتقارن که نقش مهمی در پیش‌بینی حرکت نانوذرات در هنگام منیپولیشن دارد، پرداخته‌اند. یک سیستم با ثبات مکانیکی عالی، به‌وضوح یک پیش‌نیاز برای نانومنیپولیشن موفق است. تفاوت بین منیپولیشن در جهت‌های مخالف نیز ممکن است، ناشی از شکل سوزن نامتقارن ناشی از تولید سوزن، فرایند نصب و یا سایش باشد [4].

کورایم و همایونی [5] منیپولیشن در دو بعد را با استفاده از روش چند مقیاسی تحلیل کرده‌اند. منیپولیشن بیولوژیکی یکی از جالب‌ترین زمینه‌های قابل توجه در منیپولیشن ذرات است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل قطعات میکروسکوپ نیروی اتمی در مدل‌های غیر کلاسیک کمتر از مدل کلاسیک است، در نتیجه در مدل کلاسیک نانوذرات آسیب و تغییر شکل بیشتری دیده شده است.

طبق تحقیقات انجام شده توسط کورایم و همکارانش [6] انجام فرایند منیپولیشن در محیط‌های آبی موجب کاهش نیروی چسبندگی شده است که ظاهراً روند منیپولیشن را راحت‌تر می‌کند. فرایند منیپولیشن در شرایط واقعی اغلب در محیط‌های آب انجام می‌شود، مطالعه منیپولیشن در یک محیط مایع می‌تواند، به‌عنوان یک تحقیق جامع‌تر برای منیپولیشن نانوذرات مورد توجه قرار گیرد.

کورایم و همکارانش [7] به‌منظور کمک به خودکار نمودن و اجرای دقیق فرایند نانومنیپولیشن یک نانوذره، اقدام به طراحی کنترل‌کننده‌ای برای کنترل میزان انحراف سوزن از راستای قائم کرده‌اند، تا با استفاده از آن از رد شدن نانوذره از زیر سوزن در هنگام عملیات نانومنیپولیشن جلوگیری شود. همچنین در طول انجام عملیات کنترلی به مشاهده میزان انحراف تیرک در جهت Y پرداخته شده و با استفاده از این مشاهده، مقدار خیز تیرک، در راستای موازی با جهت حرکت نانوذره را به دست آورده‌اند. اگر میزان خیزش تیرک بیش از حد باشد، نانوذره در حین عملیات از زیر آن عبور می‌کند. آن‌ها همچنین چسبندگی نانوذرات طلا و پلاکت و مخمر در محیط‌های هوا، آب، پلاسما و الکل را بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که چسبندگی نانوذرات طلا و پلاکت در محیط الکل بیشتر از محیط پلاسما و چسبندگی در محیط پلاسما نیز بیشتر از چسبندگی در محیط آب می‌باشد؛ اما برای نانوذرات مخمر چسبندگی در محیط هوا بیشتر از چسبندگی

در سایر محیط‌ها است.

کورایم و همکارانش [8] به توسعه و مدل‌سازی نانوذرات زیستی به شکل استوانه‌ای و استوانه‌ای پخ خورده با بهره‌گیری از تئوری‌های تماسی مختلف جهت نانومنیپولیشن میکرو/نانوذرات زیستی مختلف بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. مدل‌سازی تئوری‌های تماس شامل مدل‌های تماسی لاندبرگ، داوسون، نیک پور، هواپرچ و هرترز بوده است. نتایج نشان داده است که در حالت استوانه‌ای مدل تماسی هرترز و در حالت تماس استوانه‌ای پخ خورده تئوری تماس هواپرچ بیشترین تغییر شکل را داشته‌اند. همچنین با در نظر گرفتن جنس ذرات زیستی، نانوذرات با جنس پلاکت به دلیل داشتن خواص مکانیکی در نظر گرفته شده در بین تمامی مدل‌ها بیشترین تغییر شکل را داشته‌اند. کورایم و رستگار [9] نتایج مدل‌سازی مدل‌های مکانیک تغییر شکل کوچک برای دی‌ان‌ای با نانوذرات طلا را مقایسه کرده‌اند و از آنجاکه دی‌ان‌ای حدود ۱۰۰۰ بار نرم‌تر از نانوذرات طلا است، همان‌طور که انتظار می‌رود که تغییرات بزرگ‌تری رخ دهد و برای تغییر شکل نانوذرات طلا، در مقایسه با دی‌ان‌ای نیرویی ۱۰۰۰ بار بیشتر مورد نیاز باشد. مدل‌های مکانیک تماس نشان داده‌اند که وقتی نانوذره نرم‌تر می‌شود، با افزایش سطح تماس بار اعمال شده با شیب شدید کاهش یافته است؛ اما سلول‌های بیولوژیکی یا مواد ویسکوز بیش از حد الاستیسیته هستند و این نوع مواد دارای ویژگی‌های دمایی هستند که باعث تغییر شکل مواد به دلیل نیروهای کوچک نمی‌شود. این بدان معنی است که منحنی خمش شیب تیز ندارد. از آنجایی که نظریه تاتارا به عنوان یک مدل تغییر شکل بزرگ برای مواد الاستیک ارائه شده است، این مدل برای دی‌ان‌ای توسعه داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از این مدل، شیب منحنی تغییر شکل نیرویی، روند کندتری دارد که به وضعیت واقعی نزدیک‌تر است، بنابراین پیشنهاد می‌شود از این مدل برای سلول بیولوژیک استفاده شود. برای تغییر مدل‌های مکانیک تماس برای شرایط بیولوژیکی، سه نیروی اصلی به نیروی خارجی اضافه شده‌اند: واندروالس، دولاپه الکتریکی و نیروهای هیدراسیون، کورایم و رستگار به بررسی تأثیر این نیروها بر سطح تماس پرداخته‌اند. کورایم و رستگار [10] خواص مکانیکی سلول‌های سالم و سرطانی سینه، مانند توپوگرافی، مازول الاستیسیته، نیروی چسبندگی، ویژگی‌های ویسکوالاستیک، خمش و سفتی محوری

را تعیین کرده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که سلول‌های سالم سینه در مقایسه با سلول‌های سرطانی سفت‌تر و چسبندگی کم‌تری دارند. ساموئل و همکارانش [11] طی پژوهشی به این نتیجه رسیده‌اند که خواص مکانیکی میوسیت‌های قلب به‌طور قابل‌توجهی با پیری تغییر می‌کند؛ که می‌تواند به تغییر در عملکرد دیاستولیک بطن چپ کمک کند. آن‌ها با توجه به اینکه سال‌خوردگی، سختی میوسیت‌های قلبی را افزایش می‌دهد به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی به اندازه‌گیری سختی میوسیت‌ها پرداخته‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که افزایش مدول الاستیک ظاهری میوسیت‌ها در مکانیسم اختلال دیاستولیک در قلب پیر تأثیرگذار است.

محمودی و همکاران [12] نوعی پیزوالکتریک را با ارتعاشات غیرخطی موردبررسی قرار داده‌اند و پارامترهای دیفرانسیل درجه سوم معادلات مدل‌سازی تیرک برای میکروسکوپ نیروی اتمی را به دست آورده‌اند.

آنسو و همکارانش [13] با توجه به ویژگی‌های عملکردی و ساختاری، مدول الاستیک ظاهری و رفتار چسبندگی عضله قلبی و اسکلتی و اندوتلیوم عروقی برای تعیین مدول الاستیک، سرعت سوزن، عمق اندام و شکل موردنظر سوزن را موردبررسی قرار داده‌اند. مهم‌ترین هدف پژوهش آن‌ها بررسی مدول الاستیک بوده و مدل‌سازی سوزن به عنوان یک کلاه مخروطی بلند منجر به تغییر در مقدار مدول الاستیک متناسب با عمق است که کمتر از مقدار محاسبه شده توسط پردازش با سوزن نوک مخروطی است.

مونتاژ سیستم‌های نانو فوتونی کوانتومی با استفاده از تشدیدکننده‌های پلاسمونیک برای مطالعه منابع فوتون‌ها و پردازش اطلاعات و خواص تراشه‌ها امری بسیار مهم است که بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شده است [14].

شن و همکاران [15] تأثیر رطوبت محیط‌زیست را بر قدرت چسبندگی سلول‌های مونوئیدی مخمر در محیط بیولوژیکی بررسی کرده‌اند. آن‌ها در تحقیقات خود روش جدیدی برای اندازه‌گیری نیروی چسبندگی سلول‌های مونوئیدی مخمر بر اساس دست‌کاری نانو رباتیک انجام داده‌اند که از طریق میکروسکوپ الکترونی اسکن انجام شده است. بررسی چسبندگی سلول‌های مخمر می‌تواند، ما را در درک بهتر مکانیسم آلودگی سلول‌های مخمر کمک کند. این موضوع می‌تواند، به‌طور بالقوه برای مطالعه عفونت مخمر در محیط مرطوب مفید باشد. همچنین

روش نوین برای ساخت نانو ساختار گرافنی با استفاده از نانو ساختار مصنوعی دی‌ان‌ای را فراهم می‌کند [19].

وانگ و همکارانش [20] برای توصیف و مقایسه نانو ساختار سطحی و ویسکوالاستیک ردیف‌های مختلف سلولی سینه از میکروسکوپ نیروی اتمی، استفاده کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه در کشش و ویسکوزیته، بین دو رده سلولی بوده است. همچنین سلول‌های سرطانی نرم‌تر و روان‌تر از بافت خوش‌خیم هستند.

زارع پور و همکارانش [21] با استفاده از روش تجزیه حرارتی برای ساخت نانو ذرات آهن استفاده کرده‌اند. اندازه نانوذرات توسط میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ الکترونی تعیین شده و اثر پوشش‌دهی بر زیست‌سازگاری نانوذره مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت نتایج مطلوبی از این پوشش‌دهی حاصل شده است.

کورایم و همکارانش [22] با استفاده از تحلیل تصاویر توپوگرافی به دست آمده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی زبری سطح سلول سرطانی HT29 را تعیین کردند. بر مبنای نتایج آنالیز زبری انجام شده و معادلات تئوری زبری رابینوویچ، شعاع متوسط برجستگی‌های سطح نمونه و سطح‌منا تعیین شده است. بر مبنای نتایج، مد غلظتی مد غالب در شروع به حرکت سلول است و تحلیل بر مبنای مدل رابینوویچ نسبت به مدل رامپ مقادیر نیرو و زمان بحرانی کمتری را پیش‌بینی کرده است.

خوارزمی و همکاران [23] با استفاده از مدل دینامیکی خمشی-پیچشی میکروسکوپی نیروی اتمی بر اساس مدل اصطکاکی هورتادو-کیم، مدل تماس جانسون-کندال-رابرت و گرین وود-ویلیامسون به یافتن نیروهای اصطکاک و نرمال اعمال شده بر میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. رفتار اصطکاکی بین سطوح با توزیع ناهمواری تصادفی در مقیاس نانو مدل سازی و بررسی شد. مدل زبری در نهایت اثر انحراف معیار ارتفاع ناهمواری بر بار نرمال، نیروی اصطکاک و ضریب اصطکاک بررسی شده است. در نهایت مشاهده شد؛ در حالی که فاصله جداسازی کاهش یابد، نیروهای نرمال و اصطکاک افزایش می‌یابد، همچنین افزایش نیروی نرمال باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود.

کتوماریس و همکاران [24] یک رویکرد جدید که منجر به یک خصوصیات نانومکانیکی سه‌بعدی (۳ بعدی) می‌شود، بر

روش اندازه‌گیری نیروی چسبندگی سلول‌های مخمر که توسط شن پیشنهاد شده می‌تواند در سایر موارد مورداستفاده قرار گیرد. تفضلی و همکاران [16] دینامیک حاکم در حالت‌های میکرو منیپولیشن و نانومنیپولیشن در ذرات کروی را بررسی کرده‌اند که در نهایت یک الگوریتم تکرارپذیر برای نیروهای وارد بر یک نانو/میکرو ذره بر روی یک بستر ارائه کرده‌اند.

تفضلی و همکارانش [17] برای منیپولیشن دوبعدی میکرو / نانو و جمع‌آوری ذرات میکرو/نانومقیاس با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی تحقیقی انجام داده‌اند که در آن برخلاف آثار قبلی، مدل‌های دست‌کاری ارائه شده، شامل مدل اصطکاک بر اساس نیروهای عادی و نیز نیروهای چسبندگی است و نیروهای کشش با استفاده از مدل مکانیک تماس جانسون-کندال-رابرتز (جی کی آر) مدل‌سازی شده‌اند. این مدل برای تعیین اینکه آیا شرایط بحرانی حرکت ذرات به دست می‌آید، استفاده شده است. آن‌ها آزمایش‌های منیپولیشن را با فشار بر روی میکرو ذرات پلی‌استایرن انجام داده‌اند. همچنین مدل کامل و شبیه‌سازی میکرو / نانومنیپولیشن را بر اساس مدل‌سازی اولیه فیزیک دینامیک حرکت ذرات کوچک انجام داده و موقعیت ذرات، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به عنوان منیپولاتور، مدل‌سازی شده و رفتارهای پویا ذرات را شناسایی کرده‌اند.

تاتارا تغییر شکل‌های کشسان بزرگ یک کره لاستیکی در فشرده‌سازی ساده را ارائه داده است، این فرض به عنوان حذف محدودیت‌های مدول یانگ ثابت و تغییر شکل کوچک در نظریه رایج هرتزی در تماس اجسام الاستیک در نظر گرفته شده است [18].

تحقیق ژنتیک و تجزیه و تحلیل بالینی و اثرات متقابل روی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی که هنگام منیپولیشن رخ می‌دهد، مدل خوبی برای مطالعه است. وانگ و همکاران در پژوهشی به وسیله نانومنیپولیشن عملیات برش، هل دادن و جابه‌جایی‌های خاص را بر روی ذرات دی‌ان‌ای پوشش داده توسط ورق اکسید گرافن، انجام داده و نشان داده‌اند که عملیات ذکر شده را می‌توان به راحتی و بدون آسیب به بستر و پوشش کنترل کرد. همچنین مشخص شد که نیروی عادی مورد نیاز برای برش رشته‌های پوشش داده شده بیش از ۵ برابر رشته‌های برهنه است و اندازه شکاف حاصل می‌تواند تا ۲۰ نانومتر باشد که این روش یک

زیرلایه طلا، یک نوک AFM پوشش داده شده با طلا دارای بالاترین نیروی چسبندگی $42/67$ نانو نیوتن برای زیرلایه های سیلیکونی است، درحالی که نوک AFM با پوشش تیتانیوم نیرو را برای همه نمونه ها کاهش می دهد. همچنین نتایج نهایی نشان می دهد که استفاده از زیرلایه طلا با نوک AFM تیتانیوم منجر به کمترین نیروی چسبندگی می شود که می تواند در اندازه گیری نیروی چسبندگی در حین ریز مونتاژ مفید باشد.

فریدونی و همکاران [29] 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 از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست استفاده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع است که، ارتفاع سوزن با 48 درصد، عرض تیرک با 19 درصد، مدول الاستیسیته با 14 درصد و طول تیرک با 8 درصد، بیشترین اثر را بر تغییرات نیرو در فاز دوم منیپولیشن خواهند داشت. همچنین مشاهده شد، مطابق نتایج به دست آمده، می توان از اثرات ناچیز ناشی از تغییرات شعاع ذره، شعاع سوزن، ضریب پواسون سوزن و طول استوانه ای میکرو/نانوذرات هدف چشم پوشی نمود.

کورایم و همکاران [30] در دو بخش تماسی نانومنیپولیشن میکرو/نانوذرات استوانه ای طلا را مورد بررسی قرار داده اند. بخش اول تماس میکرو/نانوذرات هدف و صفحه مبنا و بخش دوم تماس نوک سوزن تیرک و میکرو/نانوذرات هدف بود. برای بخش اول از پنج مدل تماسی مهم هرتز، لاندبرگ، داسون، نیکپور و هواپرچ استفاده شده است. در بخش دوم نیز از مدل های تماسی هرتز و جی کی آر بهره گرفته شده است. برای تماس در بخش اول تغییر شکل صورت گرفته بین صفحه مبنا و میکرو/نانوذرات استوانه ای طلا، مدل داسون بیشترین و مدل نیکپور کمترین میزان تغییر شکل و عمق نفوذ را داشته است. نتایج نشان داده است، که با افزایش زاویه نوک سوزن با محور Z، میزان عمق نفوذ و تغییر شکل ایجاد شده بین ذره و صفحه مبنا به طور کلی کاهش خواهد یافت که، مدل لاندبرگ بیشترین و مدل نیکپور کمترین میزان کاهش را نمایش داده است.

با توجه به پژوهش های انجام شده در این حوزه و بررسی مطلوب بودن مدل تماسی تاتارا برای سلول های بیولوژیکی، در این پژوهش مدول یانگ بافت سرطانی سینه با استفاده از مدل

اساس مدول یانگ و روش فرورفتگی AFM ارائه داده اند. روش پیشنهادی می تواند به شفاف سازی تغییرپذیری خواص مکانیکی نمونه های بیولوژیکی در فضای 3 بعدی (تغییرپذیری در صفحه $x-y$ و رفتار وابسته به عمق) کمک کند. این روش برای ژل های آگارز، فیبروبلاست ها و سلول های سرطان سینه اعمال شد. علاوه بر این، روش های ریاضی جدیدی برای تعیین خصوصیات مکانیکی کمی نیز پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این پژوهش گامی روبه جلو برای توصیف دقیق تر و کامل تر مواد بیولوژیکی است؛ و می تواند به تشخیص دقیق بیماری های مختلف مانند، سرطان در آینده کمک کند.

افرموف و همکاران [25] به مروری بر روش های AFM توسعه یافته شده در سال های اخیر، به منظور بررسی خواص ویسکوالاستیک سلول ها و ژل های نرم پرداخته اند. همچنین مراحل اصلی در پروتکل های جمع آوری و تجزیه و تحلیل داده های معمولی شرح داده شده و در مورد مدل های ویسکوالاستیک مربوطه و نحوه استفاده از آنها برای توصیف ویژگی های خاص بحث شده است.

طاهری [26] به بررسی تجربی تأثیر مدل های اصطکاکی مختلف بر استخراج نیرو و زمان بحرانی نانومنیپولیشن سه بعدی بافت سرطانی روده بزرگ پرداخته است.

طاهری [27] به منظور یافتن مطلوب ترین مقدار نیرو و زمان بحرانی در نانومنیپولیشن بافت سرطانی، باهدف کاوش سطح و به دست آوردن اطلاعات مربوط به بافت سرطانی معده با کمترین آسیب، شبیه سازی دوبعدی نانومنیپولیشن انجام شده است. لذا با توسعه مدل های اصطکاکی ساده، با در نظر گرفتن مدل های اصطکاکی کارلسون-باتیستا، لمایتره-کارلسون و اف کاتی، نمودارهای نیرو-زمان ترسیم شده و مقادیر نیرو و زمان بحرانی محاسبه شده است. طی شبیه سازی با مدل اف کاتی مشاهده شد که کمترین مقدار نیرو برابر با $0/453$ نانونیوتن و کمترین مقدار زمان بحرانی برابر با 45 میلی ثانیه بوده است، همچنین مقایسه این مقادیر با پژوهش های گذشته، نشان دهنده کاهش نیرو و زمان بحرانی نسبت به مدل اصطکاکی لاگره بوده است.

حیدری و همکاران [28] تأثیر رسوب طلا و تیتانیوم را بر روی نوک های میکروسکوپ نیروی اتمی در نیروهای چسبندگی و مدول یانگ، بین چندلایه MEMS (سیلیکون، طلا و نقره) و نوک های AFM بررسی کرده اند. طبق نتایج بیان شد که، به جز

تحقیق هستند، آشنا می‌باشد. از سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی برای تصویربرداری از سطوح و به‌عنوان ریز بازویی جهت منیپولیشن اجسام نیز استفاده می‌شود. منیپولیشن شامل موقعیت‌دهی، جابه‌جایی نانو ذره با کشیدن یا هل دادن روی سطح، بریدن و تشریح، لمس کردن و دندان‌دادن می‌باشد. نحوه عملکرد این دستگاه آنالیز سطوح موردنظر و بررسی نتایج حاصل از آن می‌باشد. پارامترهای میکروسکوپ نیروی اتمی تأثیر به‌سزایی در نتایج فرایند دارد. به‌طور مثال در فاز اول منیپولیشن (شامل شناسایی پارامترهای تأثیرگذار مکانیکی از جمله هندسه ذره، شکل تیرک، مدل تماسی و نیروی بحرانی برای به حرکت درآمدن ذره) دو پارامتر بحرانی نیرو و زمان مهم بوده است. مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار روی این پارامترهای بحرانی طول تیرک، طول سوزن و سایر مشخصات ابعادی میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد که تأثیرات این پارامترها در پژوهش‌های گذشته به‌صورت کیفی بررسی شده است. شکل (۱) شماتیکی از این فرایند را نمایش می‌دهد.

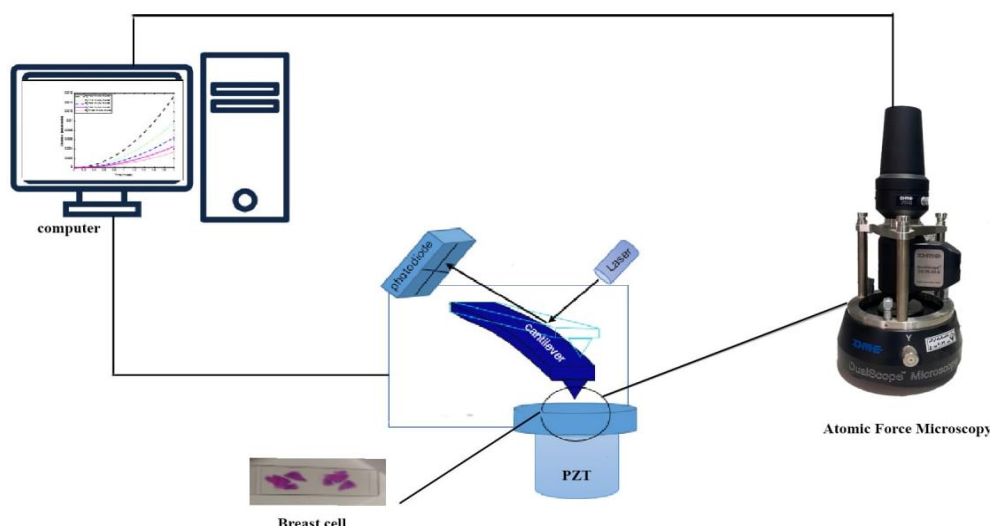
تماسی تاتارا محاسبه شده است. آزمایش‌های تجربی صورت گرفته برای ترسیم نمودار تجربی بافت موردنظر، ۵ بار تکرار شده‌اند. نمودارهای تئوری نیز از طریق بررسی صورت گرفته توسط میکروسکوپ نیروی اتمی و با توجه به هندسه حاصل از این فرایند و همچنین مدل تماسی تاتارا انجام شده است. در نهایت با مقایسه نمودارهای تجربی و تئوری و همچنین با در نظر گرفتن مدل تماسی تاتارا، محدوده مدول یانگ بافت سرطانی سینه مشخص شده است.

مدل‌سازی

با توجه به تعریف مسئله، در این بخش ابتدا به بررسی روند کلی فرایند نانومنیپولیشن پرداخته شده، سپس به‌منظور استخراج مدول یانگ بافت سرطانی سینه با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده به بررسی معادلات مدل تماسی تاتارا پرداخته شده است.

بررسی فرایند نانومنیپولیشن و کار تجربی

علم بیولوژیک بسیاری از پیشرفت‌های حال حاضر خود را مرهون میکروسکوپ نیروی اتمی است. نام این میکروسکوپ برای دانشمندی که در علوم زیست‌شناسی در حال آزمایش و



شکل ۱ فرایند نانومنیپولیشن با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتم

سرطان و عامل کشندگی آن پرداخته شده و پس از آن، قسمتی از بافت جدا شده و بر روی لام قرار گرفته است. به منظور شروع آزمایش ابتدا ظرفی که بافت روی آن قرار دارد را بر روی صفحه میکروسکوپ نیروی اتمی قرار داده شد و سپس به کمک صفحه نمایش آن، بررسی های دقیق صورت می گیرد تا بافت های مناسب آزمایش انتخاب شود. معیار گزینش بافت ها شکل ظاهری شان بوده است.

بحث و نتایج

استخراج مدول یانگ بافت های سلولی سینه تأثیر ویژه ای در بهبود و اثربخشی روش های درمان دارد. از دیگر نتایجی که با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در کاوش سلول ها می توان به آن دست یافت، استخراج مدول یانگ می باشد. در ادامه به منظور تعیین محدوده برای مدول یانگ، نتایج به صورت نمودارهای تئوری و تجربی با در نظر گرفتن مدل تماسی تاتارا آورده شده است. در این بخش، به منظور استخراج مدول یانگ بافت سرطانی سینه، ابتدا نمودارهای عمق نفوذ و نیرو بر حسب زمان استخراج شده است. پس از ترسیم نمودارهای تجربی و تئوری، در این بخش به محاسبه مدول یانگ باتوجه به مدل تماسی تاتارا پرداخته شده است.

نتایج حاصل از شبیه سازی منیولیشن سه بعدی با

مدل های تماسی مختلف

در نمودار شکل (۲) نیروی عمودی سوزن در زمان های مختلف در بازه زمانی ۰-۱/۱ ثانیه و در محدوده ۲۰-۸۰ نانونیوتن و همچنین عمق نفوذ سوزن در بازه زمانی ۰-۱/۱ ثانیه و در محدوده ۴/۷-۵/۸ نانونیوتن در آزمایش نمونه سرطانی سینه نشان داده شده است. بعد از استخراج نمودارهای نیروی عمودی و عمق نفوذ در آزمایش از تطبیق دو نمودار جهت به دست آوردن نقاط تجربی به منظور شبیه سازی آزمایش نمونه سرطانی سینه استفاده شده است. باتوجه به یکسان بودن زمان های آزمایش در محور x دو پارامتر نیروی عمودی و عمق نفوذ در محور y قرار گرفته است. در سایر نمودارهای شکل (۲) نیز نتایج تکرار آزمایش با شرایط یکسان در بازه زمانی ۰-۱/۱ ثانیه نشان داده شده است.

مدل سازی با استفاده از مدل تماسی تاتارا

نکته مهم و اساسی جهت استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی شناخت تغییر شکل ذرات هنگام استفاده از این میکروسکوپ است. بررسی این تغییر شکل از طریق استفاده از معادلات مکانیک تماس امکان پذیر است. مکانیک تماس، ناحیه تماس (سطح، خط یا نقطه) دو جسم در برخورد با یکدیگر را مورد مطالعه قرار می دهد. از آنجایی که جنس میکرو/نانوذرات هدف انتخابی جهت شبیه سازی مکانیک تماس در این مطالعه میکرو/نانوذرات بیولوژیکی است، باید در انتخاب تئوری های تماسی نهایت دقت را به کار برد. از آنجایی که غالب میکرو/نانوذرات بیولوژیکی مانند دی ان ای، پلاکت ها، نانو باکتری ها، مخمرها، سلول های سرطانی و غیره، جنس نرم و پلاستیک گونه ای دارند؛ باید دقت داشت که تئوری های تماسی ای را انتخاب کرد که هم نیروی چسبندگی و هم حالت الاستو-پلاستیک گونه نانوذرات بیولوژیکی را در نظر می گیرند. عامل تأثیرگذار دیگر در فعالیت بر مبنای میکروسکوپ نیروی اتمی، محیط انجام فرایند است.

تئوری تاتارا [18] مربوط به اجسام های پیر الاستیک و با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار بر سلول های بیولوژیکی انتخاب شده است. رابطه (۳) با توسعه معادلات (۱) و (۲) استخراج شده است.

$$\delta_H = \left[\frac{F}{a} \right]^{2/3} - \frac{F}{a_c} \quad (1)$$

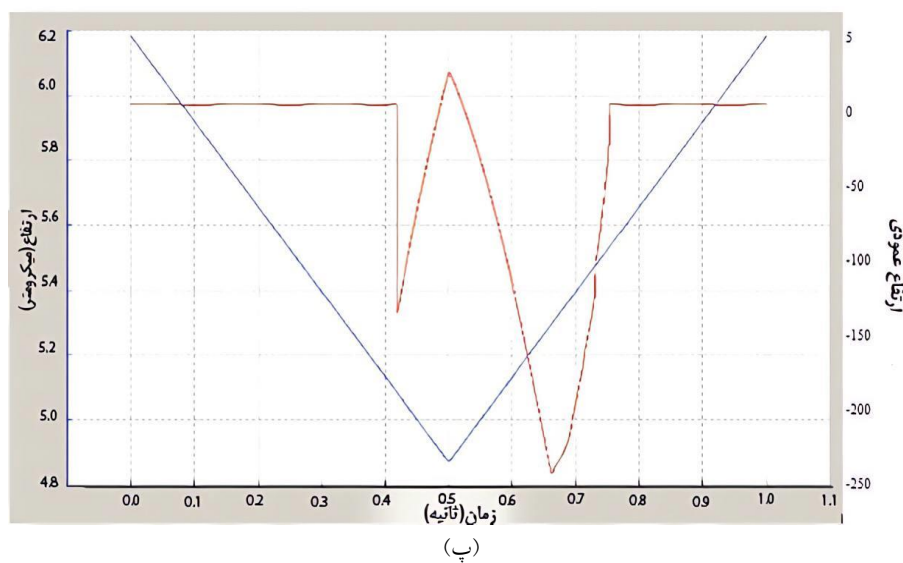
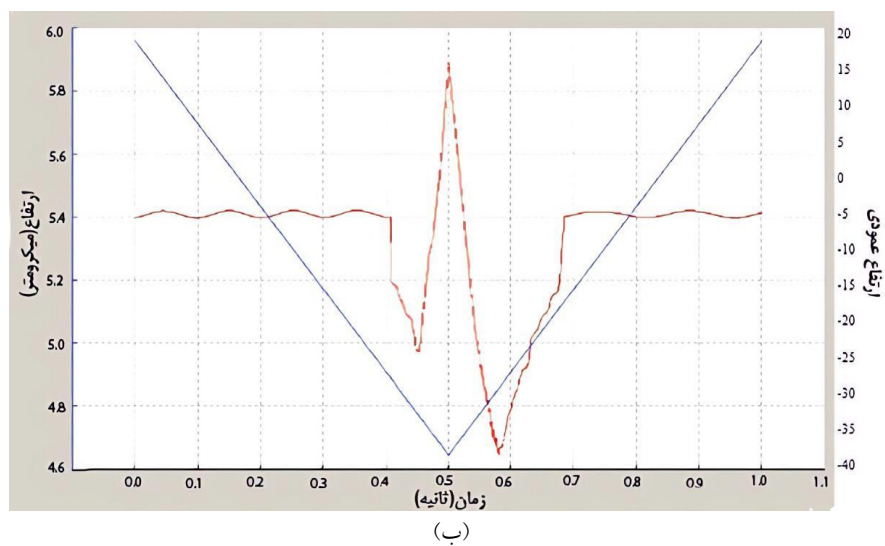
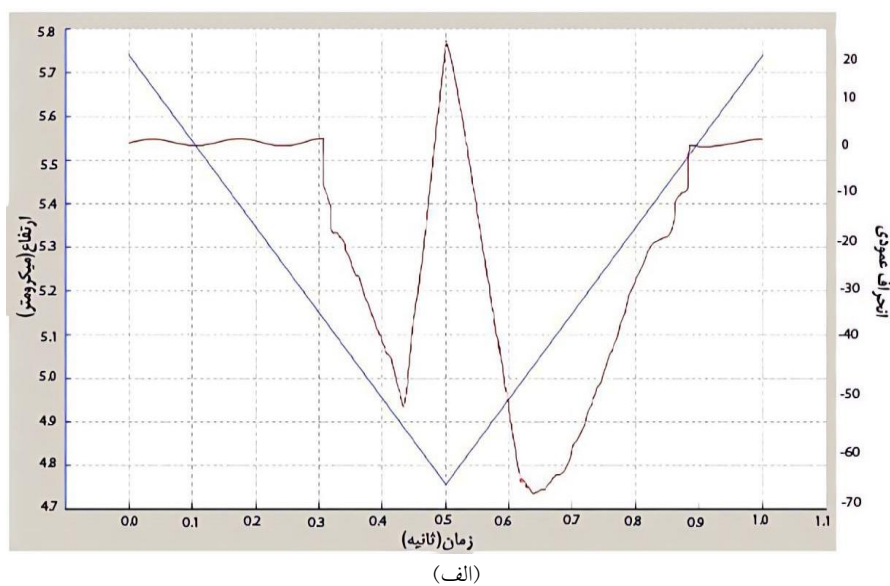
$$\frac{1}{a_c} = \frac{(1+v_1)(3-2v_1)}{4\pi E_1 R_1} + \frac{(1+v_2)(3-2v_2)}{4\pi E_2 R_2} \quad (2)$$

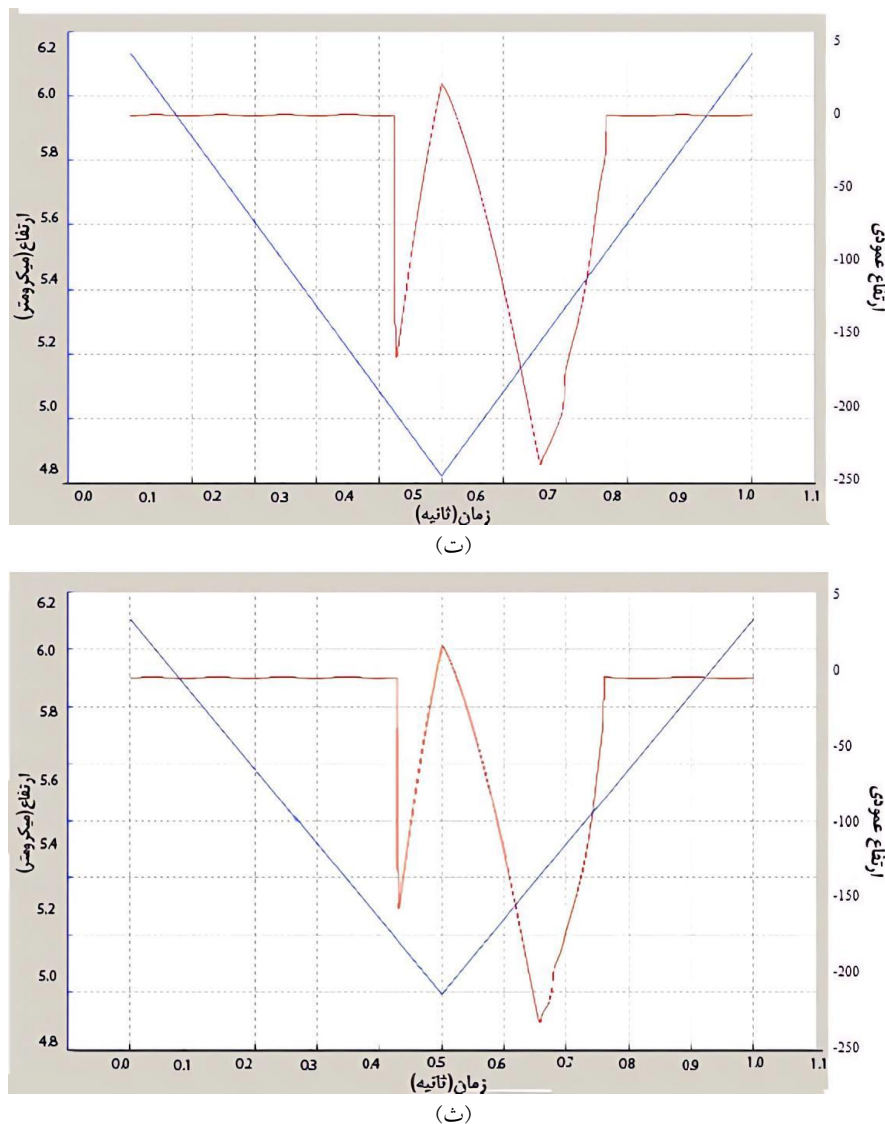
$$F = a\delta_H^{3/2} + \left(\frac{3a^2}{2a_c} \right) \delta_H^2 + \left(\frac{15a^3}{8a_c^2} \right) \delta_H^{5/2} \quad (3)$$

در معادلات (۱) تا (۳)، پارامترهای F و a به ترتیب نیرو و شعاع تماسی را در مدل تاتارا نشان می دهد. همچنین، v_1 نسبت پواسون ذره، v_2 نسبت پواسون سوزن، E_1 مدول الاستیسیته ذره، E_2 مدول الاستیسیته سوزن، R_1 شعاع ذره، R_2 شعاع سوزن و δ_H عمق نفوذ در مدل تماسی تاتارا می باشد.

مراحل آماده سازی بافت

بافت مورد بررسی در این پژوهش، بافت سرطانی سینه در نظر گرفته شده است. پس از تهیه بافت مورد نظر، به تعیین نوع



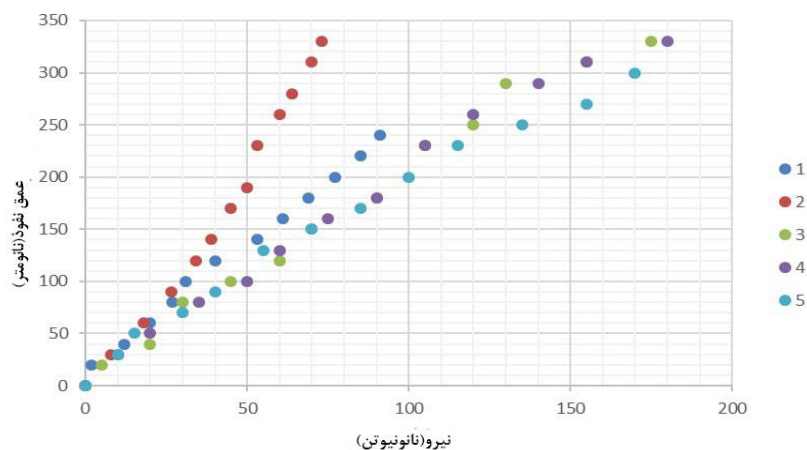


شکل ۲ نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی مینیولیشن با مدل تماسی تاتارا

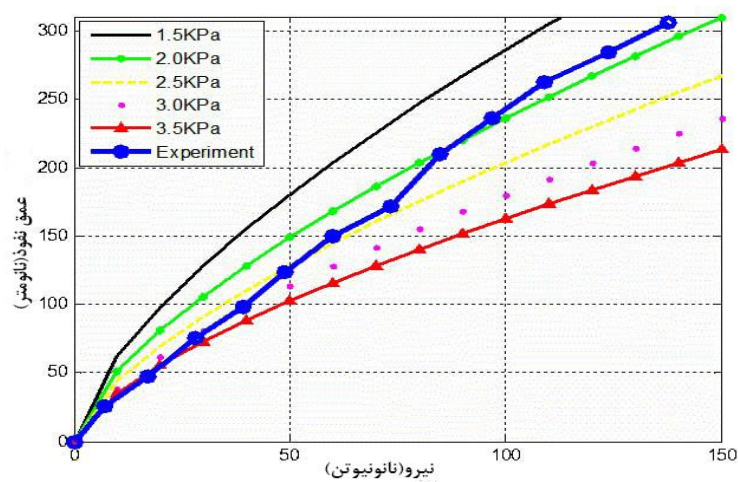
نتایج حاصل از تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی برای تعیین مدول یانگ بافت سلولی سینه

پس از آماده‌سازی بافت سرطانی سینه در آزمایشگاه، این بافت بر روی لام قرار گرفته و سپس مورد کاوش توسط میکروسکوپ نیروی اتمی قرار گرفته است. نمودار شکل (۳) نتایج تجربی آزمایش نمونه سرطانی سینه است که در آن نیرو برحسب نانونیوتن و عمق نفوذ سوزن برحسب نانومتر نشان داده شده است. این نمودار با در نظر گرفتن نیروی بارگذاری مطلوب نسبت به عمق نفوذ، مانع از آسیب رسیدن به بافت سلولی می‌گردد. این آزمایش ۵ بار تکرار شده و از میانگین‌گیری از آن‌ها، نمودار تجربی استخراج شده است.

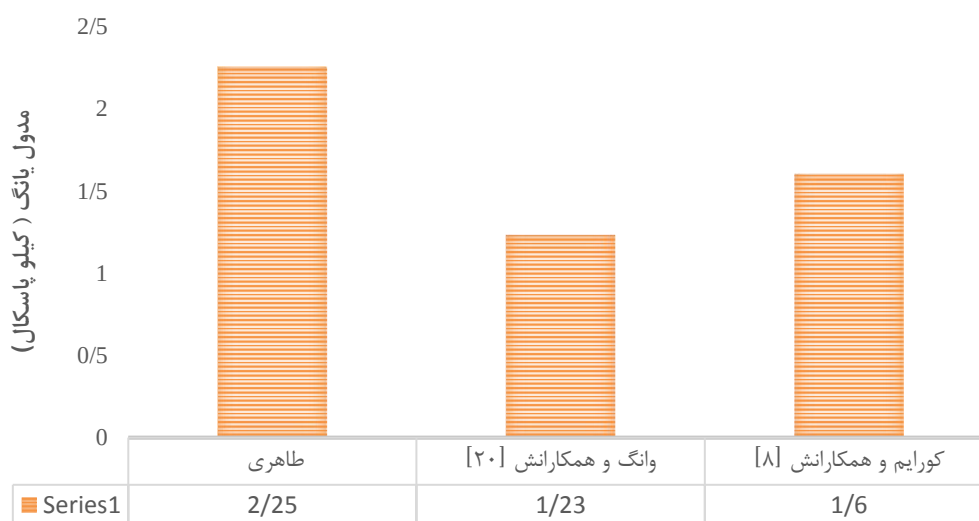
نمودار تجربی حاصل‌شده از میانگین‌گیری ۵ آزمایش در شکل (۴) آورده شده است. همچنین شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با مدل تماسی تاتارا، با در نظر گرفتن مدول یانگ‌های مختلف، به صورت نمودار ترسیم شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، محدوده مدول یانگ بافت سرطانی سینه مقادیر ۱/۵ تا ۳/۵ کیلو پاسکال را نمایش می‌دهد. با افزایش میزان بارگذاری، مدول یانگ بافت سرطانی کاهش می‌یابد. این نکته قابل توجه است که در نظر گرفتن هر یک از مقادیر مدول یانگ، باتوجه به میزان بارگذاری و میزان حساسیت بافت سرطانی، انتخاب خواهد شد.



شکل ۳ نتایج تصویربرداری میکروسکوپ نیروی اتمی برای تعیین مدول یانگ از بافت سلول سینه



شکل ۴ تعیین محدوده مدول یانگ از بافت سرطانی



شکل ۵ مقایسه صحت سنجی مقادیر نیرو و زمان بحرانی حاصل از پژوهش حاضر با مراجع ۲۰ و ۸

صحت سنجی

از تصویربرداری با میکروسکوپ نیروی اتمی، مدل تماسی تاتارا برای این تحقیق مطلوب در نظر گرفته شده است. به منظور اطمینان از نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، نمودار تجربی با میانگین‌گیری از پنج آزمایش ترسیم شده است. در نهایت با شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در نرم‌افزار متلب و با مقایسه‌های صورت گرفته محدوده ۲ تا ۲/۵ کیلو پاسکال برای مقدار مدول یانگ بافت سرطانی سینه با توجه به مدل تماسی تاتارا محاسبه شده است. در تحقیق‌های آتی می‌توان پژوهش‌هایی در خصوص، بررسی تأثیر محیط‌های مختلف برای فرایند منیپولیشن میکرو/نانوذرات، بررسی تأثیر هندسه‌های مختلف تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی و سایر پارامترهای محیطی و هندسی را ارائه داد.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

a	شعاع تماسی در مدل تماسی تاتارا (نانومتر)
E ₁	مدول الاستیسیته ذره (کیلوپاسکال)
E ₂	مدول الاستیسیته سوزن (کیلوپاسکال)
F	نیرو در مدل تماسی تاتارا (نانونیوتن)
R ₁	شعاع ذره (نانومتر)
R ₂	شعاع سوزن (نانومتر)

علائم یونانی

δ_H	عمق نفوذ مدل تماسی تاتارا (نانومتر)
V_1	نسبت پواسون ذره
V_2	نسبت پواسون سوزن

به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده، در این بخش مقایسه نتایج این مقاله با نتایج مراجع [8] و [20] آورده شده است. در مراجع [8] و [20]، مدل تماسی هرترز استفاده شده است. در این مدل تماسی ساده‌ترین شرایط تماسی بدون در نظر گرفتن نیروی چسبندگی، در نظر گرفته شده است. با توجه به اهمیت نیروی چسبندگی در مطالعه بافت‌های سلولی، در این تحقیق با بررسی نتایج تجربی، مدل تماسی تاتارا برای شبیه‌سازی منیپولیشن استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود. میزان مدول یانگ در مدل تاتارا برابر با ۲/۲۵ کیلو پاسکال می‌باشد که تقریباً به مقدار مدول یانگ در مدل تماسی هرترز در هر دو مراجع با مقادیر ۱/۶ و ۱/۲۳ نزدیک می‌باشد؛ تفاوت در مقادیر مدول یانگ نیز به دلیل تفاوت در معادلات مدل تماسی بوده است. تفاوت در مقادیر مدول یانگ نیز به دلیل تفاوت در معادلات مدل تماسی بوده است.

نتیجه‌گیری

فرایند نانومنیپولیشن باهدف جابه‌جایی ذرات در ابعاد نانو و بهبود و یا تغییر در خواص مواد وارد صنایع مختلف گردید و با توجه به اهمیت مطالعه در ابعاد نانو و شناخت ساختار و خواص مکانیکی و شیمیایی سلول‌ها و بافت‌های مختلف در حوزه پزشکی نیز مورد اهمیت قرار گرفت. بررسی‌های صورت گرفته در حوزه پزشکی و سرطان، نشان‌دهنده اهمیت شناخت ساختار بافت سرطانی و سالم در بهبود و تشخیص این بیماری را دارد. مدول یانگ ازجمله خواص مطلوب برای تشخیص سلول‌های سالم و سرطانی می‌باشد.

لذا در این مقاله بررسی‌هایی در فاز دوم منیپولیشن ذرات بیولوژیکی باهدف استخراج مدول یانگ انجام پذیرفته است. با مطالعه پژوهش‌های پیشین و بررسی نمودار تجربی حاصل

مراجع

- [1] J.O. de Beeck, N. Labyedh, A. Sepúlveda, V. Spampinato, A. Franquet, T. Conard, P.M. Vereecken, and U. Celano, "Direct imaging and manipulation of ionic diffusion in mixed electronic–ionic conductors," *Nanoscale*, vol. 10, no. 26, pp. 12564-12572, 2018.
- [2] H. Habibullah, H.R. Potalan, R. Petersen, and M.S. Rana, "Tracking of triangular reference signals using LQG controllers for lateral positioning of an AFM scanner stage," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no.

- 4, pp. 1105-1114, 2013.
- [3] K. Irani, R. Kolahchi, M. Sedighi, H. Naderi-Manesh, and A. Allahverdi, "Detection of Lung Cancer Cell-Derived Exosomes in Microfluidic Platform via Immunofluorescence," *Iranian Journal of Biology*, vol. 35, no. 2, pp. 225-238, 2020.
- [4] S. Kim, F. Shafiei, D. Ratchford, and X. Li, "Controlled AFM manipulation of small nanoparticles and assembly of hybrid nanostructures," *Nanotechnology*, vol. 22, no. 11, pp. 115301, 2014.
- [5] M.H. Korayem, A. Homayooni, "Non-classic multi scale analysis of 2D-manipulation with AFM based on modified couple stress theory," *Computational Materials Science*, vol. 114, pp. 33-39, 2016.
- [6] M.H. Korayem, R.N. Hefzabad, A. Homayooni, and H. Aslani, "Molecular dynamics simulation of nanomanipulation based on AFM in liquid ambient," *Applied Physics A*, vol. 122, no. 11, pp. 1-10, 2016.
- [7] M.H. Korayem, A.H. Korayem, M. Taheri, and S. Rafee nekoo, "Control of AFM nano-robot based on sliding mode control method in different biological environments," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 11, pp. 369-377, 2017. (In Persian)
- [8] M.H. Korayem, H. Khaksar, and M. Taheri, "Modeling of contact theories for the manipulation of biological micro/nanoparticles in the form of circular crowned rollers based on the atomic force microscope," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, no. 18, pp. 183715, 2013.
- [9] M.H. Korayem, Z. Rastegar, "Application of Nano-Contact Mechanics Models in Manipulation of Biological Nano-Particle: FE Simulation," *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 8, no. 1, pp. 35-50, 2012.
- [10] M.H. Korayem, Z. Rastegar, "Experimental Characterization of MCF-10A Normal Cells Using AFM: Comparison with MCF-7 Cancer Cells," *Molecular & Cellular Biomechanics*, vol. 16, no. 2, pp. 109, 2019.
- [11] S.C. Lieber, N. Aubry, J. Pain, G. Diaz, S.J. Kim, and S.F. Vatner, "Aging increases stiffness of cardiac myocytes measured by atomic force microscopy nanoindentation," *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, vol. 287, no. 2, pp. 645-651, 2004.
- [12] S.N. Mahmoodi, N. Jalili, "Non-linear vibrations and frequency response analysis of piezoelectrically driven microcantilevers," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 42, no. 4, pp. 577-587, 2007.
- [13] A.B. Mathur, A.M. Collinsworth, W.M. Reichert, W.E. Kraus, and G.A. Truskey, "Endothelial, cardiac muscle and skeletal muscle exhibit different viscous and elastic properties as determined by atomic force microscopy," *Journal of Biomechanics*, vol. 34, no. 12, pp. 1545-1553, 2001.
- [14] M. Nguyen, S. Kim, T.T. Tran, Z.Q. Xu, M. Kianinia, M. Toth, and A. Aharonovic, "Nanoassembly of quantum emitters in hexagonal boron nitride and gold nanospheres," *Nanoscale*, vol. 10, no. 5, pp. 2267-2274, 2018.
- [15] Y. Shen, M. Nakajima, M.R. Ahmad, S. Kojima, M. Homma, and T. Fukuda, "Effect of ambient humidity on the strength of the adhesion force of single yeast cell inside environmental-SEM," *Ultramicroscopy*, vol. 111, no. 8, pp. 1176-1183, 2011.
- [16] A. Tafazzoli, M. Sitti, "Dynamic behavior and simulation of nanoparticle sliding during nanoprobe-based positioning," In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 47063, USA, (2004).

- [17] A. Tafazzoli, Ch. Pawashe, and M. Sitti, "Atomic force microscope based two-dimensional assembly of micro/nanoparticles," *The 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing (ISATP)*, Canada, (2005).
- [18] Y. Tatara, "On compression of rubber elastic sphere over a large range of displacements—part 1: theoretical study," *Journal Engineering Mater. Technology*, vol. 113, no. 3, pp. 285-291, 1991.
- [19] Y. Wang, Y. Shen, B. Li, Sh. Wang, J. Zhang, Y. Zhang, and J. Hu, "Nanomanipulation of Individual DNA Molecules Covered by Single-Layered Reduced Graphene Oxide Sheets on a Solid Substrate," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 122, no. 2, pp. 612-617, 2017.
- [20] Y. Wang, Ch. Xu, N. Jiang, L. Zheng, J. Zeng, C. Qiu, H. Yang, and S. Xie, "Quantitative analysis of the cell-surface roughness and viscoelasticity for breast cancer cells discrimination using atomic force microscopy," *Scanning*, vol. 38, no. 6, pp. 558-563, 2016.
- [21] A. Zarepour, M. Rafieenia, "Design, synthesis, characterization and bioactivity evaluation of polyglycerol-grafted Fe₃O₄ nanoparticles," *Cellular and Molecular Researches*, vol. 29, no. 1, pp. 80-91, 2016.
- [22] M.H. Korayem, H. Badkoobehhezaveh, and M. Taheri, "Experimental Determination of HT29 Cancerous Cell Surface Roughness by Atomic Force Microscopy to be Applied in Nanomanipulation," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 28, no. 1, pp. 111-122, 2017.
- [23] M. Kharazmi, M. Zakeri, J. Faraji, and K. Osouli, "Modelling of Atomic Force Microscopic Nano Robot's Friction Force on Rough Surfaces," *9th International Conference on Nanotechnology*, Turkey, September 6-7, (2018).
- [24] S.V. Kontomaris, A. Stylianou, A. Georgakopoulos, and A. Malamou, "3D AFM Nanomechanical Characterization of Biological Materials," *Nanomaterials*, vol. 13, no. 3, pp. 395, 2023.
- [25] Y.M. Efremov, T. Okajima, and A. Raman, "Measuring viscoelasticity of soft biological samples using atomic force microscopy," *Soft matter journal*, vol. 16, no. 1, pp. 64-81, 2020.
- [26] 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. 791-804, 2022. (In Persian)
- [27] M. Taheri, "Investigation of New Friction Models in Two-Dimensional Manipulation of Gastric Cancer Tissue," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 2022. (In Persian)
- [28] P. Heidari, M. Salehi, B. Ruhani, V. Purcar, and S. Căprărescu, "Influence of Thin Film Deposition on AFM Cantilever Tips in Adhesion and Young's Modulus of MEMS Surfaces," *Materials*, vol. 15, no. 6, pp. 2102, 2022.
- [29] 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. (In Persian)
- [30] M.H. Korayem, M. Taheri, H. Khaksar, and S.H. Bathaee, "Using Micro/Nano Scale Contact Models in 3D Manipulation of Deformation of Au Particles Under Angular Effect," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 33-43, 2020. (In Persian)



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 Impacts of Different Positions of the Slot on Performance of Single-Slot and Double-Slot Coaxial Antenna in the Treatment of Cancer in Liver Tissue by Hyperthermia Method

Research Article

Behrad Haghighi¹, Hadi Sadeghipour², Mohammad Shafiei Dehaj³

DOI: [10.22067/jacsm.2023.76281.1114](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.76281.1114)

1. Introduction

When a cell's genetics is altered, the cell begins to divide uncontrollably and extra cells are produced, often forming a mass of tissue called a tumor. Cancer is one of the main causes of death in the world. Every year, many people die due to various types of cancer. Cancer is the third cause of death in Iran. By increasing the percentage of elderly people in Iran, the incidence of cancer cases is expected to become double in the next two decades. Among the effective and conventional methods in cancer treatment are surgery, chemotherapy and radio therapy. Some of the mentioned methods are not necessarily effective in all cases of cancer, and on the other hand, each of them causes its own side effects, today other methods are used to deal with cancer. Among them, hyperthermia, immunological treatment, and photodynamic treatment can be mentioned. Each of these methods has its uses, and the medical team decides which method, or combination of methods, is appropriate for a particular cancer case.

The word hyperthermia consists of two words, hyper, which means high, and term, which means heat. The ability to control the distribution of energy inside living tissues with the development of electronic tools and modeling systems has been of great interest in the past decades and has made significant progress. The idea of using heat to treat cancer has been considered for a long time, but the efforts of recent years have led to the implementation of this idea. The main reason for this delay is to reach the ability to increase the appropriate temperature in the appropriate place so that it does not cause damage to the cells and healthy tissue of the body. Usually, hyperthermia is used together with other cancer treatment methods such as chemotherapy and radiation therapy. Hyperthermia appears to make cancer cells more sensitive to radiation and chemotherapy drugs. One of the main challenges related to this method is deep heating of tumors without damaging the tissues around the tumor, which includes controlling the amount of heating and spatial distribution, and designing and positioning temperature sensors. Among the

possible heating methods, radio frequency and microwave heating has received more attention from clinical researchers.

2. Governing equations and patterns in simulation

In this research, a numerical study of the hyperthermia method using single and double slot microwave antennas in the treatment of liver tissue cancer has been done. Modeling of the problem is done symmetrically and two-dimensionally in the Comsol software, and the electromagnetic equation is coupled with the biological heat transfer equation. Pennes biological heat transfer equation is placed in the heat transfer module in Comsol software. Moreover, in this study, temperature distribution, cancerous tissue destruction, absorption rate of microwave in liver tissue and Specific Absorption Rate (SAR) for three different distances of the apertures from each other and the distance of the aperture from the tip of the antenna equal to 5, 7.5 and 10 mm are presented. The microwave absorbed in the liver tissue is based on the frequency of 2.45 GHz and the power of microwave is 10 watts.

3. Results and discussion

Figure 1 shows the comparison of SAR distribution in single and double slot coaxial antennas for distances of 5, 7.5 and 10 mm. This diagram is obtained along a line parallel to the axis of the microwave antenna at a distance of 2.5 mm from it. SAR distribution along the longitudinal axis of the antennas gradually increases and reaches its maximum point, which is the location of the slot. As it can be seen, in the single-slot antenna, the maximum of the diagram is at the location of the slot, and in the double-slot antenna, the maximum of the diagram is at the location of the upper slot. Then SAR distribution decreases rapidly and reaches its lowest value at the tip of the antenna. It is clear that the changes of SAR value in the liver tissue depend on the type of antenna and penetration depth. Moreover, the results show that SAR value of the single-slot antenna is higher than that of the double-slot antenna at almost all points.

*Manuscript received: April 18, 2022. Revised, November 21, 2022, Accepted, February 7, 2023.

¹. Assistant professor, Vali-e-Asr University, Rafsanjan.

² Vali-e-Asr University, Rafsanjan.

³. Corresponding author, Associate professor, Vali-e-Asr University, Rafsanjan. **Email:** m.shafiey@vru.ac.ir.

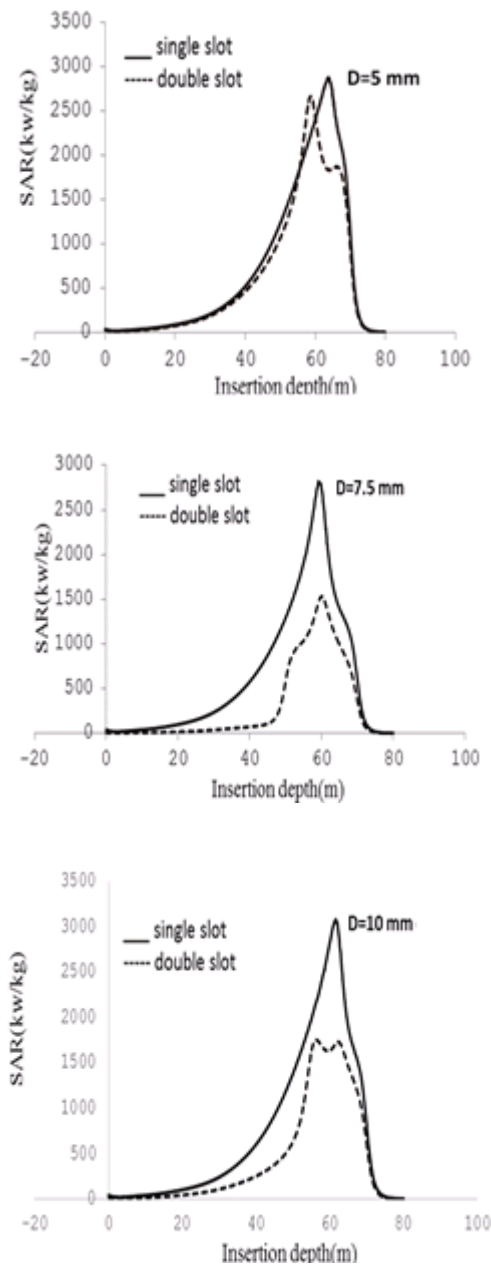


Figure 1. Specific absorption rate (SAR) in liver tissue

Figure 2 shows the comparison of the distribution of the destroyed tissue fraction for single and double slot antennas. Moreover, there is a good agreement between the temperature distribution in the tissue and the fraction of destroyed tissue. Due to the higher temperature distribution in the single-slot antenna compared to the double-slot antenna, the tissue destruction in the single-slot antenna is more than the double-slot antenna. The distribution of the destroyed tissue fraction and the temperature distribution in the liver tissue depend on the type of antenna and the depth of penetration. The distribution of the destroyed tissue in the single-slot antenna has an oval pattern and in the two-slot antenna has a spherical pattern.

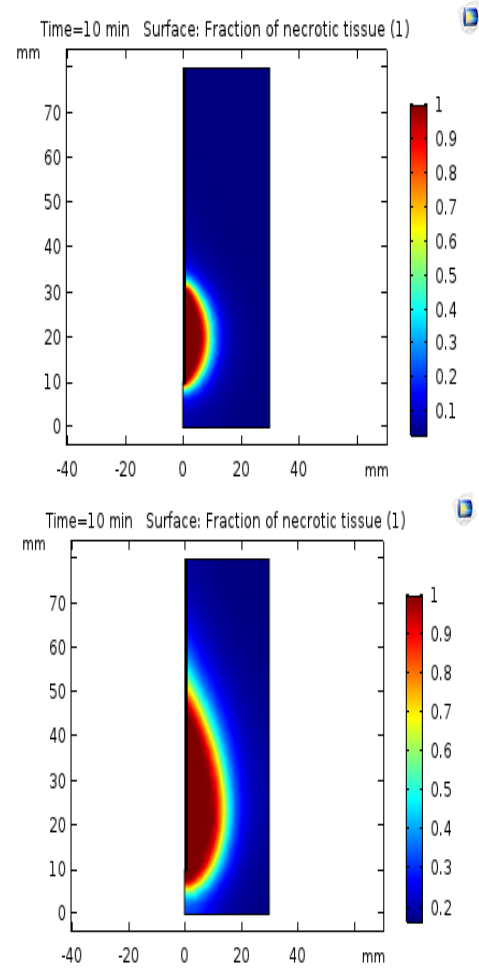


Figure 2. Distribution of the destroyed tissue fraction in the liver tissue for single (bottom) and double (top) slot antennas

4. Conclusion

The amount of absorbed microwaves, SAR distribution, temperature distribution and the fraction of destroyed tissue in the liver using single and double slot antennas were presented by using Comsol software, and the results showed that the mentioned items depend on the number of antenna's slots. A similar treatment was observed in the fraction of destroyed tissue for both antennas. The distribution of temperature and SAR in the liver tissue using the single-slot antenna compared to the double-slot antenna had the highest values. While the double-slot antenna has a wider area of the high-temperature range, the amount of microwaves absorbed is more when using the double-slot antenna. Therefore, the use of single and double-slot antennas depends on the shape and size of the tumor, so if the tumor is oval, using the single-slot antenna is preferable, but if the tumor is spherical, it is recommended to use the double-slot antenna. Moreover, the possibility of choosing the type of antenna according to the dimensions of the tumor helps to damage a smaller percentage of healthy tissues.



بررسی تأثیر موقعیت‌های مختلف قرارگیری روزنه‌ها بر عملکرد آنتن هم‌محور تک‌روزنه و دو روزنه در درمان سرطان در بافت کبد به روش هایپرترمیا*

مقاله پژوهشی

بهراد حقیقی^(۱) هادی صادقی پور^(۲) محمد شفیعی دهج^(۳) 

DOI: 10.22067/jacsm.2023.76281.1114

چکیده در این پژوهش بررسی عددی روش هایپرترمیا با استفاده از آنتن روزنه‌ای مایکروویو در درمان سرطان بافت کبد انجام شده است. مدل سازی مسئله در نرم‌افزار کام‌سول به صورت متقارن محوری و دوبعدی انجام شده و معادله الکترومغناطیسی با معادله انتقال حرارت زیستی کوپل شده است. همچنین در این مطالعه توزیع دما، تخریب بافت سرطانی، میزان جذب امواج مایکروویو در بافت کبد و نرخ جذب ویژه (SAR) به صورت عددی بررسی گردید. نتایج نشان داد که آنتن دو روزنه دارای توزیع گسترده‌تری از مقدار مایکروویو جذب شده نسبت به آنتن تک‌روزنه است. توزیع SAR در راستای محور طولی آنتن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد و به نقطه بیشینه خود که مکان قرارگیری روزنه است رسیده و سپس توزیع SAR به سرعت کاهش می‌یابد و در انتهای آنتن به کمترین مقدار خود می‌رسد. طبق نتایج به دست آمده همچنین تغییرات مقدار دما در بافت کبد به نوع آنتن و عمق نفوذ بستگی دارد و توزیع دما و توزیع SAR روند مشابهی دارند. همچنین آنتن تک‌روزنه برای تومورهای بیضوی شکل و آنتن دو روزنه برای تومورهای کروی شکل مناسب است.

واژه‌های کلیدی بافت کبد، آنتن روزنه‌ای، مایکروویو، هایپرترمیا، سرطان، نرخ جذب ویژه (SAR).

Investigating the Effect of Different Positions of the Slot on Performance of Single-Slot and Double-Slot Coaxial Antenna in The Treatment of Cancer in Liver Tissue by Hyperthermia Method

Behrad Haghighi

Hadi Sadeghi Pour

Mohammad shafiey Dahej

Abstract A Numerical study of hyperthermia was performed using a microwave slot antenna in the treatment of liver cancer. The modeling of the problem in Comsol software is done symmetrically and two-dimensionally and the electromagnetic equation is coupled with the biothermal transfer equation. Temperature distribution, cancer tissue destruction, microwave absorption in liver tissue and specific absorption rate (SAR) are presented as results. The results showed that the two-hole antenna has a wider distribution of the amount of microwave absorbed than the single-slot antenna. The SAR distribution along the longitudinal axis of the antennas gradually increases and reaches its maximum point where the slot is located, and then the SAR distribution decreases rapidly and reaches its minimum at the end of the antenna. According to the results, changes in temperature in liver tissue also depend on the type of antenna and penetration depth, and temperature distribution and SAR distribution have a similar trend. Also, single-slot antenna is suitable for elliptical tumors and double-slot antenna is suitable for spherical tumors.

Key Words Liver tissue, Slot antenna, Microwave, Hyperthermia, Cancer, Specific Absorption rate (SAR).

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۰۱/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۱/۱۸ می‌باشد.

(۱) گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران.

(۲) گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران.

(۳) نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

مقدمه

هنگامی که ژنتیک سلولی تغییر پیدا می‌کند، سلول به‌طور غیر قابل‌کنترلی شروع به تقسیم می‌کند و سلول‌های اضافی به وجود می‌آیند و اغلب تشکیل توده‌ای از بافت را می‌دهند که تومور (غده سرطانی) نامیده می‌شود. سرطان از عوامل اصلی مرگ و میر مردم در جهان است. سالانه افراد زیادی در اثر ابتلا به انواع سرطان فوت می‌کنند. سرطان سومین عامل مرگ و میر در ایران است؛ با افزایش درصد سالمندی در جمعیت کشور انتظار می‌رود بروز موارد سرطانی در دو دهه‌ی آینده به دو برابر افزایش یابد. از جمله روش‌های مؤثر و مرسوم در درمان سرطان، جراحی، شیمی‌درمانی و رادیو درمانی است. با توجه به اینکه روش‌های نام‌برده، در همه موارد درمان سرطان لزوماً کارآمد نیستند و از طرفی هر کدام عوارض خاص خود را به وجود می‌آورند، امروزه روش‌های دیگری هم برای مقابله با سرطان به کار گرفته می‌شوند. از آن‌جمله می‌توان هایپرترمی (hyperthermia)، درمان ایمنولوژیکی، درمان فوتوداینامیک (photodynamic) و ... را نام برد. هر یک از این روش‌ها موارد کاربرد خود را دارند و تشخیص اینکه کدام روش، یا ترکیب کدام روش‌ها برای یک مورد سرطان مناسب است، توسط گروه پزشکی انجام می‌شود. واژه‌ی هایپرترمی متشکل از دو کلمه‌ی هایپر به معنی بالا و ترم به معنی گرما است، هایپرترمی به صورت کلی به معنای افزایش دمای بدن به بیش از میزان طبیعی آن است. توانایی کنترل توزیع انرژی در داخل بافت‌های زنده با گسترش ابزارهای الکترونیک و سیستم‌های مدل‌سازی در دهه‌های گذشته بسیار مورد توجه بوده و پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌است [1-3]. ایده استفاده از گرما برای درمان سرطان برای مدت طولانی مدنظر بوده است، اما تلاش‌های سالیان اخیر منجر به عملیاتی شدن این ایده شده است. علت اصلی این تأخیر، رسیدن به توانایی ایجاد افزایش دمای مناسب در مکان مناسب است به‌طوری‌که باعث آسیب به سلول‌ها و بافت سالم بدن نشود. به‌طور معمول هایپرترمی به همراه سایر روش‌های درمان سرطان مانند شیمی‌درمانی و پرتودرمانی بکار گرفته می‌شود. به نظر می‌رسد که هایپرترمی باعث حساس شدن بیشتر سلول‌های سرطانی به پرتو و داروهای شیمی‌درمانی می‌شود. مطالعات بالینی بسیاری بر روی ترکیب هایپرترمی و پرتو درمانی و یا شیمی‌درمانی بر انواع مختلف سرطان مانند سارکوما [4]، ملانوما [5,6]، سرطان سر و گردن [7]، کبد [8,9]، پستان

[10,11]، ریه [12,13]، مغز [14] و غیره صورت گرفته است. هایپر ترمی یک نوع از درمان حرارتی است که از اثرات گرمایشی استفاده می‌شود. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ بیان کردند که آنتن کواکسیال برای درمان تومورهای کبدی بسیار امیدوارکننده است [15]. پیشرفت‌های اخیر در فناوری نانو، توسعه هایپرترمی ذرات نانو مغناطیسی (magnetic nanoparticle) (MNP) به عنوان یک بستر درمانی بالقوه برای درمان بیماری‌ها، توسعه یافته است. با توجه به چالش‌هایی که در پیش‌بینی قابل اطمینان توزیع مکانی - زمانی دما در بافت زنده در طی درمان هایپرترمی MNP وجود دارد، برای اطمینان از ایمنی و همچنین اثربخشی درمان، ایجاد مدل‌های عددی مؤثر و قابل اعتماد ضروری است [16]. اولین پژوهش در رابطه با هایپرترمی در سال ۱۸۸۶ توسط بوش ارائه شد. او در این مقاله اثر بخشی تب در بهبود یک مورد تومور را بررسی کرد. در ۱۸۹۸ وستمارک از جریان آب با دمای بالا در درمان یک مورد سرطان غیرقابل جراحی دهانه رحم استفاده کرد. در ۱۹۶۲ کریل بهبود اثربخشی رادیوتراپی، در صورتی که با هایپرترمی ترکیب شود، را بررسی کرد [17]. کاوسی یداللهی و همکاران [18] به بررسی پارامتری تغییر طول روزنه در آنتن دو روزنه با وجود رگ خونی در درمان بافت سرطانی به روش هایپرترمی پرداختند. آن‌ها از نرم‌افزار کامسول برای مدل‌سازی بافت سرطانی استفاده کردند. نتایج نشان داد که وجود رگ خونی در بافت سرطانی یا اطراف تومور سرطانی به دلیل جریان خون در رگ، انتقال حرارت صورت می‌گیرد که این باعث کاهش مقدار انرژی جذب شده توسط بافت می‌شود و در نتیجه در ناحیه‌ای که رگ وجود دارد دما کاهش می‌یابد. همچنین در آنتن دو روزنه با افزایش طول روزنه آسیب‌دیدگی بافت دیرتر شروع می‌شود. گاس پیوتر [19] در سال ۲۰۱۵ تأثیر تعداد روزنه موجود در ساختار آنتن میکروویو را برای توزیع دما گذرا در بافت انسان بررسی کرد. بالاترین درجه حرارت با آنتن یک روزنه به دست آمد و پایین‌ترین آن‌ها برای آنتن ۲ و ۳ روزنه به دست آمد. پایین‌ترین و بالاترین درجه حرارت به ترتیب در بافت‌های ریه و پستان ظاهر شد. فرانچسکا برو و همکاران [20] به بررسی سرطان لوزالمعده با استفاده از روش ترکیبی هادرون تراپی (hadron therapy) و هایپرترمی پرداختند. آن‌ها بافت سرطانی را در معرض یک میدان مغناطیسی با فرکانس ۱۰۹/۸ هرتز به مدت ۳۰ دقیقه قرار دادند. دمای بافت از ۳۷ به ۴۲ درجه افزایش یافت.

مدل سازی مسأله

حرارت الکترومغناطیس در طیف گسترده‌ای از مسائل مهندسی کاربرد دارد. در این پژوهش با مدل سازی در نرم افزار کامسول معادله الکترومغناطیسی با معادله انتقال حرارت زیستی کوپل شده است. در روش هایپرترمی، سرطان با استفاده از حرارت موضعی در بافت تومور که معمولاً در ترکیب با شیمی درمانی یا پرتودرمانی انجام می‌شود، درمان می‌گردد. یکی از چالش‌های مربوط به این روش حرارت دهی عمیق به تومورها بدون آسیب دیدن بافت‌های اطراف تومور است که شامل: کنترل میزان حرارت دهی و توزیع فضایی و طراحی و موضع‌گیری حسگرهای دمایی می‌شود. در میان روش‌های گرمایی ممکن، رادیو فرکانس و حرارت دهی مایکروویو بیشتر مورد توجه محققان بالینی قرار گرفته است. مدل سازی انتقال حرارت زیستی، در واقع یک مدل سازی و نیز گسترش مدل‌ها برای تحلیل و بررسی انتقال گرما در مواردی مانند بافت‌ها و مایعات و سیستم‌های مربوط به ارگان‌های زنده هستند. معادله انتقال حرارت زیستی و بکارگیری مدل‌های مختلف حل آن، برای کشف روش‌های بالقوه برای استفاده‌های درمانی حساس، مانند از بین بردن سلول‌های سرطانی و تومورها، گسترش پیدا کرده‌اند. هری پنس (Pennes) در آگوست سال ۱۹۴۸ مقاله‌ای با عنوان تحلیل و بررسی بافت و دماهای خون شاهرگی در بازوی انسان در حال استراحت را منتشر کرد. پنس در مقاله‌اش جریان گرما با اختلاف دمای بین خون شاهرگی و دمای بافت محلی را متناسب پیشنهاد کرد [8].

معادله انتقال حرارت زیستی پنس در نرم افزار کامسول (Comsol) مانند یک برنامه، درون ماژول انتقال حرارت قرار می‌گیرد. در این حالت فرم معادله انتقال حرارت زیستی به این صورت بیان می‌شود [8,23]:

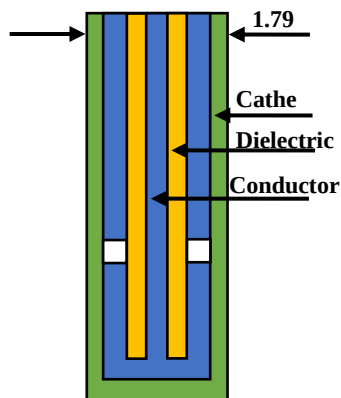
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\vec{k} \nabla T) = \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (1)$$

در رابطه (۱) اولین جمله سمت چپ، انتقال حرارت ناشی از پرفیوژن (perfusion) خون، Q_{met} انتقال حرارت ناشی از متابولیسم، Q_{ext} تولید حرارت توسط منبع خارجی است.

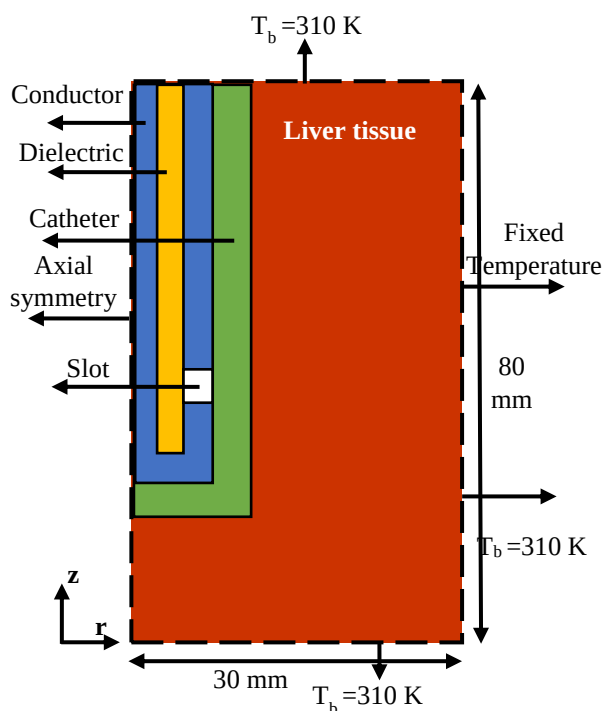
در این بررسی از آنتن روزنه‌ای هم محور استفاده می‌شود که ابعاد آن در جدول (۱) آمده است. همچنین خواص مواد مربوط آن در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که

آن‌ها بیان کردند که ترکیب تابش هادرون و هایپرترمی، نشان دهنده اولین قدم به سمت گزینه بالینی ابتکاری برای سرطان لوزالمعده است. توسعه نانو ذرات جدید برای کاربردهای تشخیصی و درمانی یکی از مهمترین چالش‌ها در تئوری شناسی سرطان در دهه های اخیر بوده است. از این رو سلیمی و همکاران [21] در سال ۲۰۲۰ به بررسی بافت سرطان در پستان موش‌ها به روش هایپرترمی حاوی مواد نانو ذرات مغناطیسی پرداختند. بافت سرطان به مدت ۲۰ دقیقه در معرض میدان مغناطیسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش از گسترش تومور جلوگیری کرده و درمان را بهبود می‌بخشد. لیم و همکاران به بررسی روش ترکیبی هایپرترمی و شیمی درمانی در بافت سرطانی کبد پرداختند. آن‌ها دمای بافت را تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی حاوی نانو ذرات به ۴۵ درجه سانتی‌گراد رساندند. نتایج نشان داد که روش ترکیبی مؤثرتر از استفاده از یک روش به تنهایی است [22]. نگوین و همکاران به بررسی سه‌بعدی آنتن روزنه‌ای در درمان بافت سرطانی پستان به روش هایپرترمی و بهینه‌سازی مسئله با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات پرداختند. سیستم مایکروویو، که علاوه بر آرایه آنتن روزنه‌ای، دارای منبع ۴/۲ گیگاهرتز و تومور مورد بررسی به اندازه ۱ سانتی‌متر مکعب بود. نتایج بهینه‌سازی بیان کرد سیستم آزمایشی پیشنهادی در استفاده از توان مایکروویو ۶۵ وات برای بالا بردن درجه حرارت در تومور به بیش از ۴۲ درجه سانتی‌گراد و ایمن نگه داشتن بافت سالم در ۳۶ درجه مناسب است [23].

مطالعه تحقیقات گذشته نشان داد که در میان سرطان، سرطان کبد بخش زیادی از مرگ و میر را به خود اختصاص داده است. همچنین آنتن‌های روزنه‌ای هم‌محور به دلیل ابعاد کوچکشان و هزینه تولید پایین آنها رایج‌ترین آنتن‌های مورد استفاده در روش تخریب مایکروویو هستند. از این در این مطالعه به بررسی سرطان در بافت کبد به استفاده از آنتن روزنه‌ای و به روش هایپرترمی پرداخته می‌شود. مدل سازی مسئله در نرم افزار کامسول و به صورت دوبعدی انجام می‌شود. همچنین در این مطالعه توزیع دما، تخریب بافت سرطانی، میزان جذب امواج ماکروویو در بافت کبد و نرخ جذب ویژه (SAR) (specific absorption rat) به صورت عددی بررسی می‌گردد. در پایان آنتن‌های تک‌روزنه و دو روزنه با یکدیگر مقایسه می‌شوند.



شکل ۱ شماتیک آنتن روزنه‌ای



شکل ۲ شماتیک تعبیه آنتن درون بافت

معادلات حاکم و شرایط مرزی ناحیه الکترومغناطیس

اشاعه یک موج الکترومغناطیس (E) در یک آنتن هم‌محور توسط میدان‌های الکترومغناطیس (H) عرضی مشخص می‌گردد. معادلات متناسب با امواج الکترومغناطیس به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E = e_r \frac{C}{r} e^{j(\omega t - kz)} \quad (2)$$

$$H = e_{\phi r} \frac{C}{z} e^{j(\omega t - kz)} \quad (3)$$

در رابطه‌های (۲) و (۳)، مختصه z بیانگر جهت اشاعه امواج، r، ϕ و z مختصه‌های سامانه استوانه‌ای در مرکز خط

آنتن معمولاً برای رعایت جنبه‌های بهداشتی در یک پوشش پلی‌تترافلورواتیلن (polytetrafluoroethylene) قرار می‌گیرد. در این بررسی، با قرار دادن آنتنی که میکروویو تولید می‌کند، درون بافت سرطانی و کوپل کردن میدان مغناطیسی و معادله انتقال حرارت زیستی میتوان توزیع دما، در صد تخریب و نرخ جذب ویژه (نسبت مقدار حرارت جذب شده به غلظت بافت) در بافت را مورد بررسی قرار داد. شماتیک آنتن روزنه‌ای هم‌محور مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. مدل مورد استفاده در این پژوهش این برتری را دارد که یک مدل متقارن محوری است، که اجازه می‌دهد از مدل سازی در مختصات استوانه‌ای دوبعدی (همانند شکل (۲) شماتیک تعبیه آنتن در داخل بافت) استفاده شود. زمانی که مدل سازی در دو بعد انجام می‌شود امکان انتخاب شبکه مناسب و به دنبال آن دستیابی به دقت عالی در جواب نهایی وجود دارد. لازم به ذکر است در پژوهش حاضر بافت کبد بدون رگ شاخص خونی در نظر گرفته می‌شود. در این مدل سازی بخش داخلی رسانای فلزی در دامنه حل قرار ندارد و بخش‌های فلزی به عنوان مرزها در نظر گرفته می‌شوند. همچنین مولفه مماسی میدان الکتریکی نیز صفر است.

جدول ۱ ابعاد آنتن روزنه‌ای محوری

پارامترها	مقدار
قطر رسانای مرکزی (mm)	۰/۲۹
قطر داخلی رسانای خارجی (mm)	۰/۹۴
قطر خارجی رسانای خارجی (mm)	۱/۱۹
قطر میل جراحی (mm)	۱/۷۹
طول روزنه (mm)	۱
موقعیت قرار گیری روزنه‌ها نسبت به نوک آنتن (mm)	۵-۷,۵-۱۰

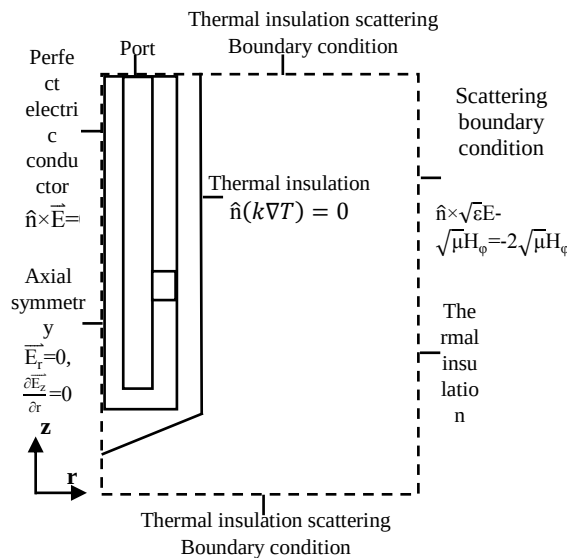
جدول ۲ خواص مواد تشکیل دهنده آنتن

خواص	دی الکتریک	میل جراحی	بافت کبد
تراوایی نسبی	۲/۰۳	۲/۶۰	۴۳/۰۳
ضریب هدایت (S/m)	-----	-----	۱/۶۹

$$H_{\phi 0} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{p_{av} Z}{\pi r \ln \left(\frac{r_{outer}}{r_{inner}} \right)}} \quad (11)$$

هدایت الکتریکی در بافت کبد با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [24,25]:

$$\sigma_{liver} = -0.0004T + 1.7381 \quad (12)$$



شکل ۳ شرایط مرزی اعمال شده

ناحیه‌ی انتقال گرما

معادله انتقال حرارت زیستی وابسته به زمان به صورت زیر بیان

می‌شود:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (13)$$

در این مدل از منبع حرارتی ناشی از متابولیسم (سوخت و ساز بدن) صرف نظر می‌شود. منبع حرارت خارجی با حرارت مقاومتی تولید شده توسط میدان الکترومغناطیس برابر است:

$$Q_{ext} = \frac{1}{2} \text{Re}[(\sigma - j\omega\epsilon) E \cdot E^*] \quad (14)$$

در این مدل سازی فرض شده است که میزان پرفیوژن خون مقداری ثابت و برابر با ۰/۰۰۳۶ بر ثانیه است. همچنین خون در دمای بدن یعنی دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد وارد کبد می‌شود و تا دمای T گرم می‌گردد. مقدار ظرفیت گرمای ویژه خون برابر ۳۶۳۹ ژول بر کیلوگرم کلون است.

برای یک مدل واقعی ω_b تابعی از دما است. حداقل برای اجزای خارجی بدن مانند دست و پاها مشاهده می‌گردد که

محوری آنتن می‌باشند. همچنین ω فرکانس زاویه‌ای را نشان می‌دهد. k ثابت پخش امواج است و با طول موج، یعنی λ رابطه معکوس دارد و به فرم زیر بیان می‌شود:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

p_{av} میانگین زمانی است که منبع انرژی در آنتن دارای جریان باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید [24]:

$$p_{av} = \int_{r_{inner}}^{r_{outer}} \text{Re} \left(\frac{1}{2} E \times H \right) 2\pi r dr = e_z \pi \frac{C^2}{Z} \ln \left(\frac{r_{outer}}{r_{inner}} \right) \quad (5)$$

Z مقاومت ظاهری موج در دی الکتریک، C ظرفیت حرارتی ویژه، r_{outer} شعاع خارجی و r_{inner} شعاع داخلی دی الکتریک می‌باشند.

در بافت، میدان الکتریکی دارای مولفه محوری محدود است و میدان مغناطیسی صرفاً دارای یک مولفه افقی می‌باشد؛ یعنی می‌توان آنتن را با یک میدان مغناطیس عرضی متقارن محوری مدل سازی نمود. پس معادله موج به صورت زیر حاصل می‌شود [24,25]:

$$\nabla \times \left(\left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right)^{-1} \nabla \times H_{\phi} \right) - \mu_r k_0^2 H_{\phi} = 0 \quad (6)$$

در معادله (۶)، ϵ_r ، ϵ_0 ، μ_r ، σ ، k_0 و H_{ϕ} به ترتیب ضریب دی الکتریک، ثابت دی الکتریک بر فاصله، ضریب هدایت، ضریب نفوذپذیری، ثابت انتشار موج بر فاصله و تغذیه میدان مغناطیسی است.

شرایط مرزی برای سطوح فلزی به صورت زیر بیان می‌شود و در شکل (۳) نشان داده شده است:

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0 \quad (7)$$

در $r=0$ شرایط تقارن محوری اعمال شده و به صورت زیر به دست می‌آید:

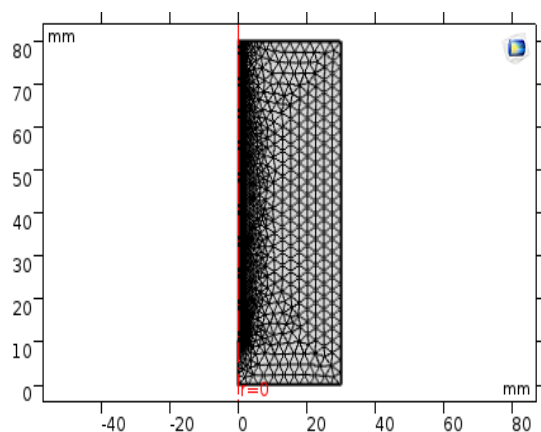
$$\vec{E}_r = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

مقدار توان منبع تغذیه ۱۰ وات در نظر گرفته و به کمک شرایط مرزی مدل سازی شده و به صورت زیر بیان می‌گردد:

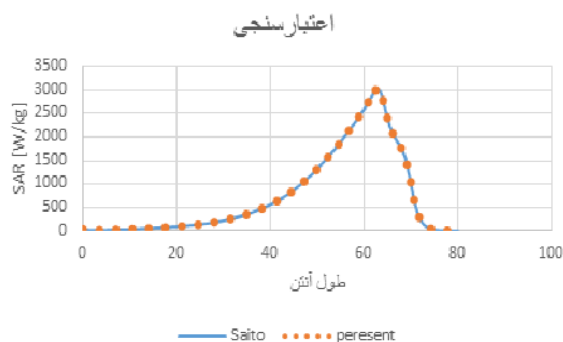
$$n \times \sqrt{\epsilon} E - \sqrt{\mu} H_{\phi} = -2\sqrt{\mu} H_{\phi 0} \quad (10)$$

$H_{\phi 0}$ (تغذیه میدان مغناطیسی) بر فاصله از رابطه زیر به دست می‌آید [8]:



شکل ۵: نمایشی از شبکه ایجاد شده

برای اعتبار سنجی مدل آنتن میکروویو، داده‌ها و نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی آنتن تک‌روزنه با نتایج مدل‌سازی یانگ و همکاران [8] مقایسه شد. با توجه به مدل یانگ توان میکروویو ۷۵ وات با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و دمای اولیه بافت کبد ۳۷ درجه در نظر گرفته می‌شود. عمق نفوذ آنتن در بافت کبد ۲۰ میلی‌متر است. از مدل‌سازی متقارن محوری در آنالیز فرایند میکروویو استفاده می‌شود و مدت زمان گرمادهی ۱۵۰ ثانیه است. شکل (۶) نتایج اعتبار سنجی دمای بافت کبد برای طول‌های روزنه ۴/۵ و ۹/۵ میلی‌متر برای آنتن تک‌روزنه برای نسبت به زمان گرمادهی در درمان میکروویو را نشان می‌دهد.



شکل ۶: اعتبار سنجی پژوهش حاضر با مرجع [26]

نتایج

هدف اصلی در انجام این پژوهش بررسی و مقایسه عملکرد آنتن هم‌محور تک‌روزنه با آنتن دو روزنه در درمان سرطان بافت کبد به روش هایپرترمیا با استفاده از میکروویو است. برای انجام این پژوهش همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، موقعیت

افزایش دما منجر به افزایش گردش خون می‌شود. از این رو نسبت مقدار حرارت جذب شده به غلظت بافت بیان می‌شود [25]:

$$SAR = \frac{\sigma_{liver}}{2\rho} |\vec{E}|^2$$

علاوه بر معادله انتقال گرما، این مدل، انتگرال بافت آ سیب دیده را محاسبه می‌کند. در این مدل‌سازی شرایط ایزوله حرارتی در ناحیه حل در نظر گرفته می‌شود:

$$\vec{n} \cdot \nabla T = 0 \quad (16)$$

و میزان آ سیب دیدگی بافت بر اساس مدل هنریکو-موریتز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

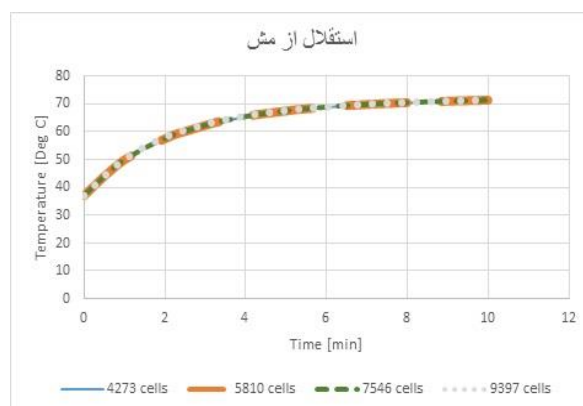
$$\frac{da}{dt} = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (17)$$

در معادله (۱۷)، a درجه آ سیب بافت، A فاکتور فرکانس، R ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴ کیلوژول بر کیلومول کلون) و ΔE انرژی فعال‌سازی برای عکس‌العمل آ سیب یک طرفه است. این دو پارامتر به نوع بافت بستگی دارند. کسر بافت تخریب شده به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\theta_d = 1 - \exp(-a) \quad (1)$$

اعتبار سنجی و استقلال از شبکه بندی

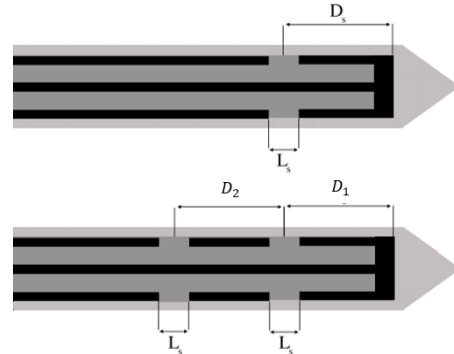
در شکل (۴) نمودار استقلال از شبکه بندی نشان داده شده است. این نمودار دمای کبد را براساس زمان در تعداد شبکه‌های مختلف نشان داده است. همانطور که مشخص است حل زمانی مستقل از تعداد شبکه است که حداقل تعداد شبکه ۷۵۴۶ باشد. شبکه بندی بصورت Free Triangular ایجاد می‌شود. شکل (۵) نمایشی از مدل شبکه بندی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴: استقلال نتایج از شبکه بندی

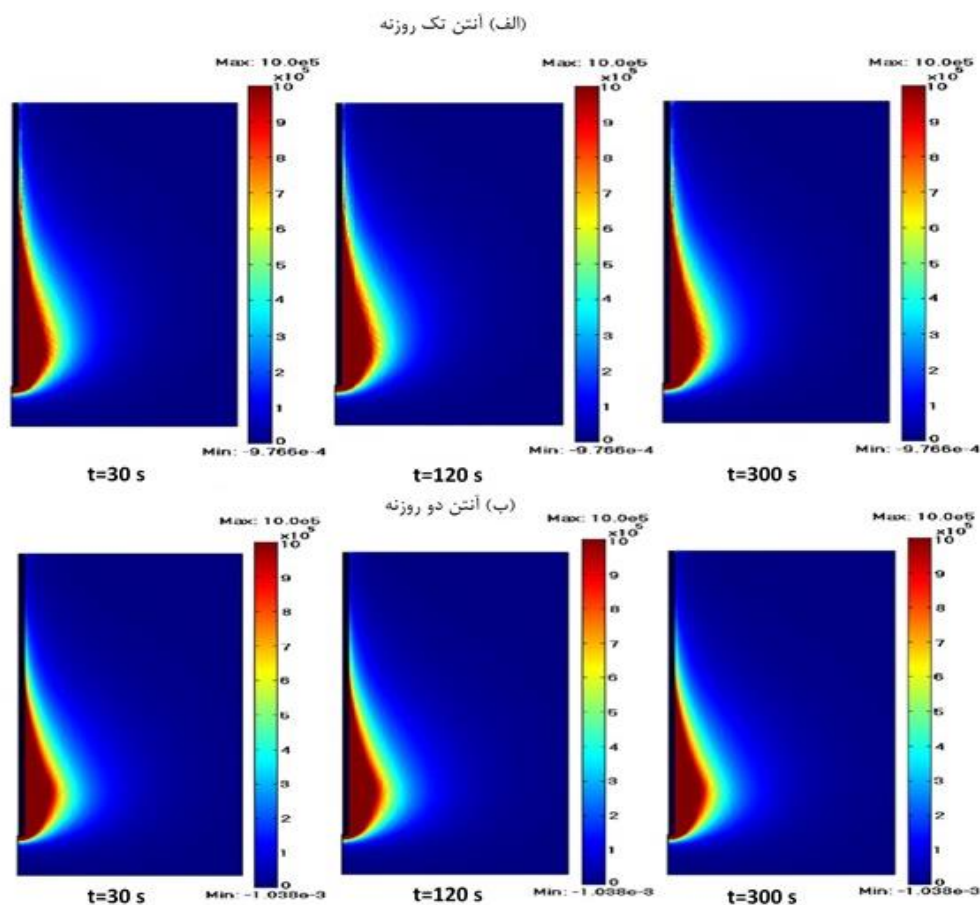
شده در بافت کبد براساس فرکانس $2/45$ گیگاهرتز و مقدار مایکروویو 10 وات نشان داده شده است. در شکل (۸) قسمت الف مقدار مایکروویو جذب شده در بافت کبد با استفاده از آنتن هم‌محور تک‌روزنه و قسمت ب همین مورد را با استفاده از آنتن هم‌محور دو روزنه برای مدت زمان‌های 30 ثانیه، 120 ثانیه و 300 ثانیه نشان می‌دهند. انرژی مایکروویو توسط آنتن داخل بافت کبد پخش می‌شود که توسط دی‌الکتریک به گرما تبدیل می‌شود. طبق شکل (۸) در هر دو آنتن توزیع مقدار مایکروویو جذب شده در اطراف روزنه تقریباً حالت بیضوی شکل دارد و بیشترین مقدار آن در کنار روزنه آنتن می‌باشد که هر چه از روزنه فاصله می‌گیریم این مقدار کاهش می‌یابد. با مقایسه قسمت‌های (الف و ب) شکل (۸) مقدار مایکروویو جذب شده در آنتن تک‌روزنه و دو روزنه در بافت کبد مشخص است که آنتن دو روزنه دارای توزیع گسترده‌تری از مقدار مایکروویو جذب شده نسبت به آنتن تک‌روزنه است.

روزنه از انتهای آنتن و روزنه‌ها از یکدیگر فاصله‌های (D) به میزان 5 ، $7/5$ و 10 میلی‌متر در نظر گرفته شده اند و نتایج برای این موقعیت‌ها بررسی و مقایسه می‌گردند. برای آنتن دو روزنه $D_1=D_2$ در نظر گرفته می‌شود. طول روزنه (Ls) مورد مطالعه در این پژوهش به مقدار 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۷ نمایشی از روزنه‌ها در آنتن تک‌روزنه و دو روزنه

شکل (۸) نتایج مربوط به مقدار مایکروویو جذب شده در بافت کبد را نشان می‌دهد، در این شکل مقدار مایکروویو جذب



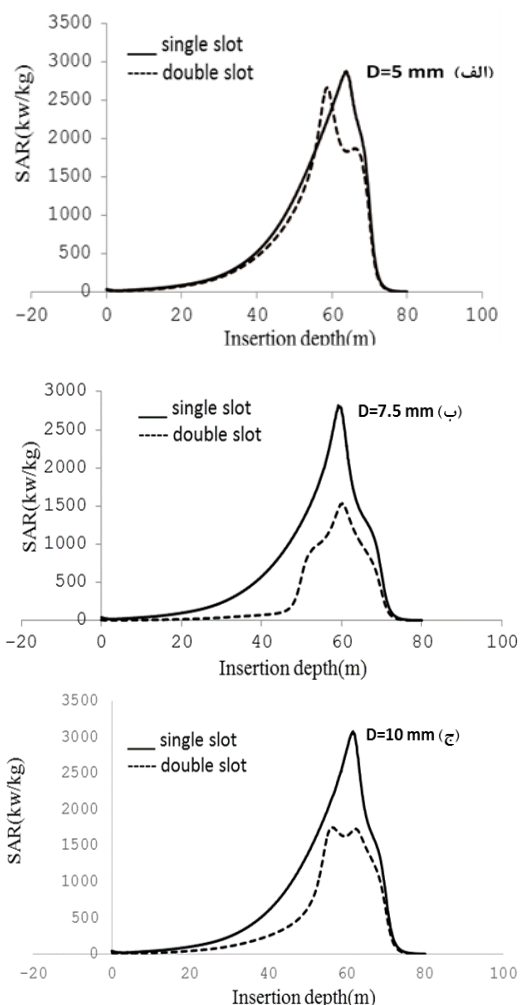
شکل ۸ مقدار مایکروویو جذب شده در بافت کبد

م‌شخص می‌شود که تغییرات مقدار SAR در بافت کبد به نوع آنتن و عمق نفوذ بستگی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقدار SAR در آنتن تک‌روزنه تقریباً در همه نقاط از آنتن دو روزنه بیشتر است.

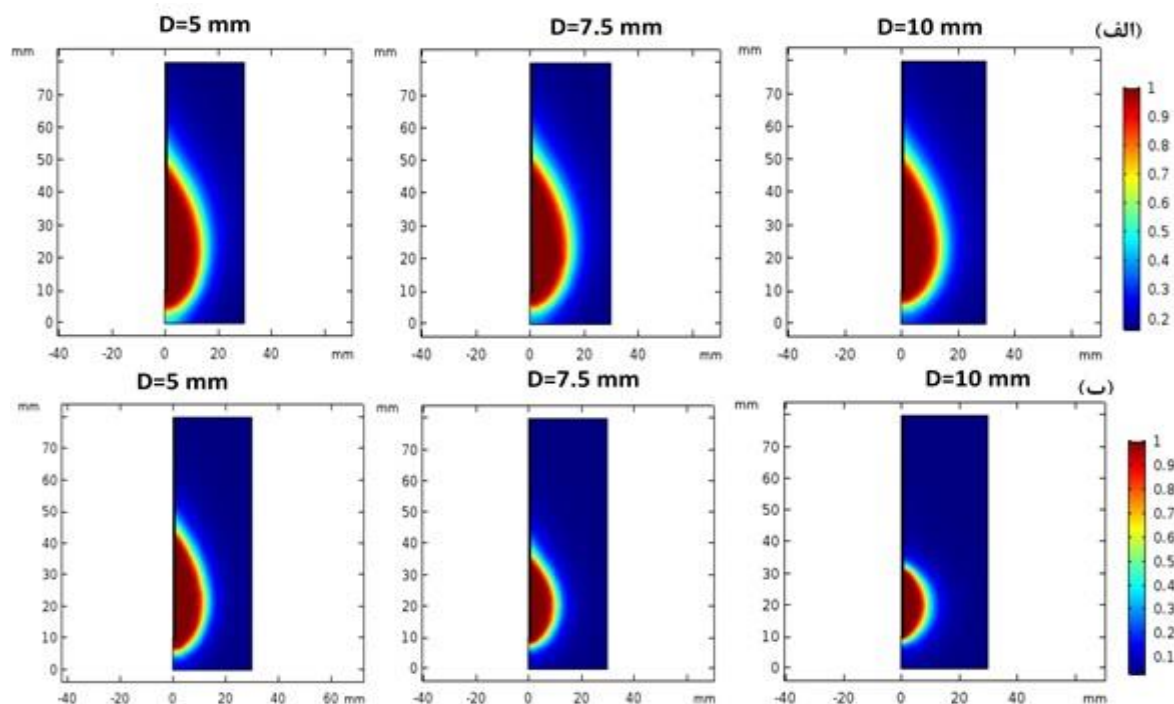
اصل اساسی در درمان مایکروویو اعمال انرژی مایکروویو در بافت کبد توسط آنتن هم‌محور روزنه‌ای است. انرژی مایکروویو توسط بافت کبد جذب می‌شود و بافت را گرم می‌کند. بافت سرطانی بعد از اینکه به اندازه دمای کافی و مدت زمان لازم گرم شود، تخریب می‌شود. هدف نهایی در فرآیند درمان مایکروویو از بین بردن سلول‌های سرطانی بافت کبد است در حالی که به بافت‌های سالم کبد آسیب نرسد. شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی توزیع دما در بافت کبد را نشان می‌دهد. در این شکل توزیع دما در بافت کبد براساس فرکانس ۲/۴۵GHz و مقدار مایکروویو ۱۰W نشان داده شده است. در شکل (۱۰-الف) توزیع دما در بافت کبد با استفاده از آنتن هم‌محور تک‌روزنه و قسمت ب با استفاده از آنتن هم‌محور دو روزنه نشان می‌دهند. توزیع دما در اطراف روزنه، برای آنتن تک‌روزنه تقریباً حالت بیضی شکل دارد و برای آنتن دو روزنه با افزایش فاصله روزنه‌ها حالت کروی شکل دارد. بیشترین مقدار آن در اطراف روزنه آنتن است و هر چه از روزنه فاصله می‌گیریم این مقدار کاهش می‌یابد.

شکل (۱۱) مقایسه توزیع دما را در آنتن هم‌محور تک‌روزنه و دو روزنه را برای موقعیت روزنه‌ها نسبت به نوک آنتن و نسبت به هم با فاصله ۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. این نمودار در طول خطی به موازات محور آنتن مایکروویو به فاصله ۲/۵ میلی‌متر به دست آمده است. توزیع دما در طول محور طولی آنتن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد تا به نقطه بیشینه خود که مکان قرارگیری روزنه است برسد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشینه نمودار در مکان قرارگیری روزنه است. سپس توزیع دما به سرعت کاهش می‌یابد و در انتهای آنتن به کمترین مقدار خود می‌رسد. مشخص می‌شود که تغییرات مقدار دما در بافت کبد به نوع آنتن و عمق نفوذ بستگی دارد. طبق نتایج به دست آمده توزیع دما و توزیع SAR روند مشابهی دارند.

شکل (۹) مقایسه توزیع SAR در آنتن هم‌محور تک‌روزنه و دو روزنه را برای سه موقعیت قرارگیری روزن‌ها نسبت به نوک آنتن و نسبت به هم با فواصل ۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. این نمودار در راستای خطی به موازات محور آنتن مایکروویو به فاصله ۲/۵ میلی‌متر از آن به دست آمده است. توزیع SAR در راستای محور طولی آنتن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد و به نقطه بیشینه خود که مکان قرارگیری روزنه است می‌رسد. همانطور که مشاهده می‌شود در آنتن تک‌روزنه، بیشینه نمودار در مکان قرارگیری روزنه است و در آنتن دو روزنه، بیشینه نمودار در محل قرارگیری روزنه بالایی است. سپس توزیع SAR به سرعت کاهش می‌یابد و در انتهای آنتن به کمترین مقدار خود می‌رسد.

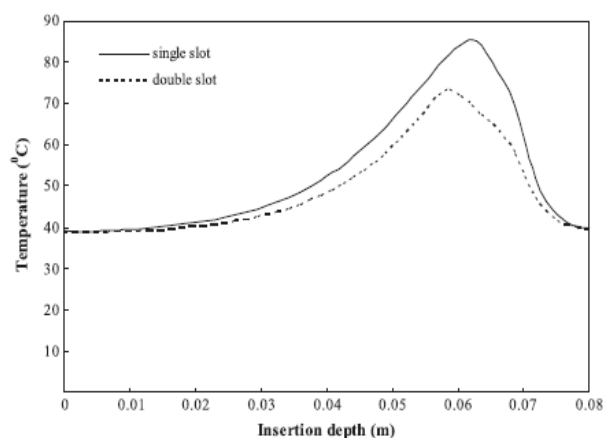


شکل ۹ نرخ جذب ویژه (SAR) بافت کبد در امتداد محور طولی آنتن برای سه موقعیت مختلف قرارگیری روزنه‌ها نسبت به نوک آنتن و نسبت به هم

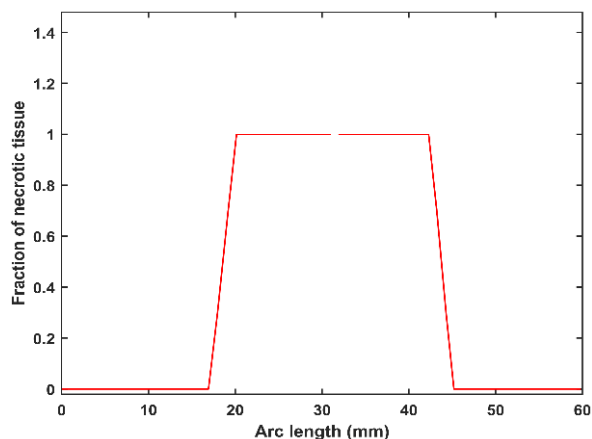


شکل ۱۰ توزیع دما در بافت کبد

نشان داده شده است. در شکل (۱۳-الف و ب) به ترتیب نتایج مربوط به آنتن تک و دو روزنه است. این توزیع همخوانی خوبی با توزیع دما در بافت دارد. همانطور که مشاهده می شود تخریب بافت در آنتن تک روزنه بیشتر از آنتن دو روزنه است. این امر به دلیل توزیع دمای بیشتر در آنتن تک روزنه نسبت به آنتن دو روزنه است که در نهایت بافت بیشتری در این نوع آنتن تخریب می شود. همچنین با توجه به شکل (۱۳) و نحوه تخریب بافت استفاده از آنتن تک روزنه برای تومورهای بیضی شکل و دوروزه برای تومورهای کروی شکل مناسب است.



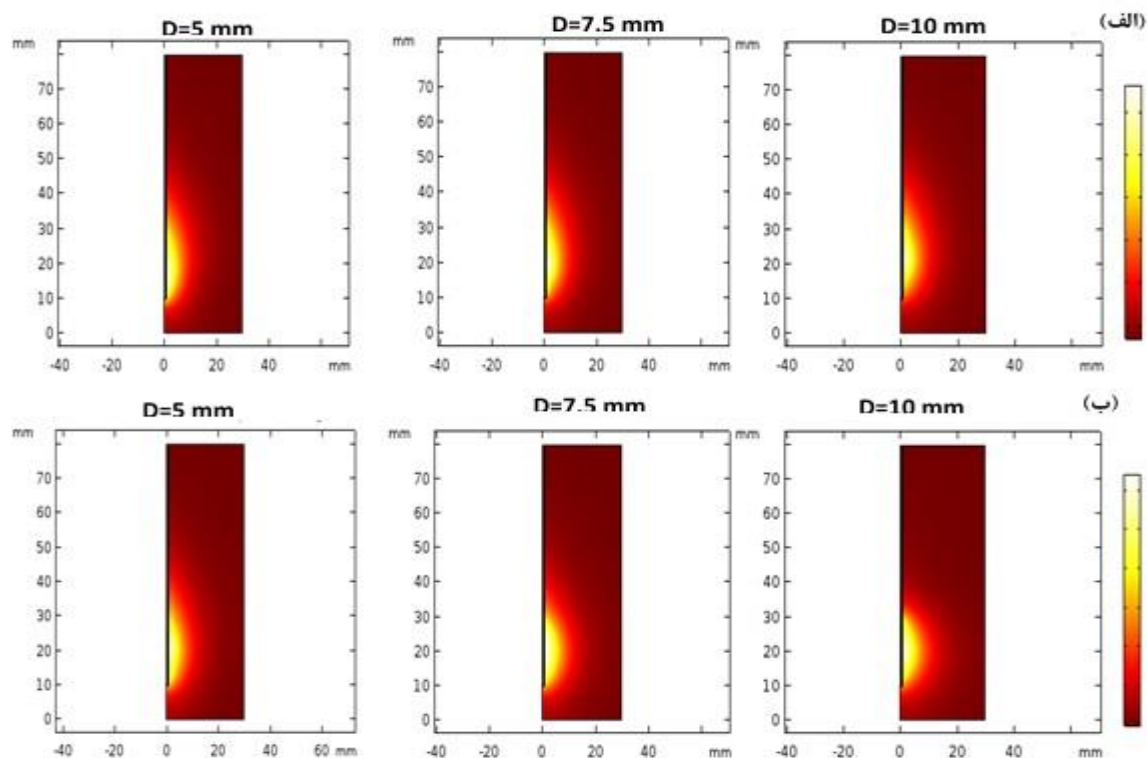
شکل ۱۱ مقایسه توزیع دما در آنتن تک روزنه و دو روزنه



شکل ۱۲ نسبت بافت تخریب شده در بافت کبد

در راستای خط عمود بر محور آنتن با فاصله ۲۲ میلی متری از پایین بافت بیشترین بافت تخریب شده در کنار روزنه آنتن است که هر چه از آنتن فاصله می گیریم، این مقدار کمتر می شود و نهایتاً به صفر می رسد که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. به علت تشابه نتایج در آنتن تک و دو روزنه در موقعیت قراگیری روزنه ها از نوک آنتن (۱۰، ۷، ۵ میلی متر)، نتایج ارائه نشدند.

در شکل (۱۳) توزیع کسر بافت تخریب شده در بافت کبد



شکل ۱۳ توزیع کسر بافت تخریب شده در بافت کبد

جمع بندی

در این پژوهش درمان سرطان به روش هاپیترتیا در بافت کبد بدون رگ خونی با استفاده از آنتن تک‌روزنه و دو روزنه در موقعیت‌های مختلف روزنه‌ها نسبت به نوک آنتن و نسبت به هم بررسی شده است. در شبیه‌سازی این پژوهش از مطالعه هم‌زمان امواج الکترومغناطیس و انتقال حرارت بهره‌گیری شد. مقدار مایکروویو جذب شده، توزیع SAR، توزیع دما و کسر بافت تخریب شده در کبد با استفاده از آنتن تک‌روزنه و دو روزنه به کمک نرم‌افزار کامسول استخراج و مقایسه شده‌اند. نسبت بافت تخریب شده برای دو آنتن حالت مشابهی داشتند. توزیع دما و SAR در بافت کبد با استفاده از آنتن تک‌روزنه نسبت به آنتن دو روزنه دارای بیشترین مقادیر بود. این در حالی است که آنتن دو روزنه دارای ناحیه وسیع‌تری از محدوده‌ی با دمای بالا است در واقع مقدار مایکروویو جذب شده در هنگام استفاده از آنتن دو روزنه بیشتر است. پس استفاده از آنتن تک‌روزنه و دو روزنه بستگی به شکل و اندازه تومور دارد، به این صورت که اگر تومور بیضوی شکل باشد، استفاده از آنتن تک‌روزنه ارجح‌تر است ولی اگر تومور کروی شکل باشد توصیه می‌شود از آنتن دو روزنه استفاده شود. همچنین امکان انتخاب نوع آنتن با توجه به ابعاد

تومور کمک می‌کند درصد کمتری از بافت‌های سالم آسیب ببیند.

فهرست علائم و اختصارات

ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg.K)	Cp, C
فاکتور فرکانس	A
درجه آسیب بافت	a
امواج الکترو مغناطیس (V/m)	E
فرکانس (GHz)	F
میدان مغناطیسی (A/m)	H
تراکم جریان (A/m ²)	j
ثابت پخش (m ⁻¹)	K
توان (W)	P
زمان (s)	t
نسبت یا نرخ جذب (W/kg)	SAR
منبع حرارت (W/m ³)	Q
ثابت جهانی گازها (kJ/kmol.K)	R
دما (K)	T

علائم یونانی	b	خون
θ_d	t	بافت
ε	r	نسبی
λ	m	متابولیک
k	liver	کبد
σ		
ω		
ρ		
μ		
زیر نویس		
0		فضای آزاد، شرایط اولیه

مراجع

- [1] P. J. Prendergast, C. Lally, S. Daly, A. J. Reid, T. C. Lee, D. Quinn, and F. Dolan, "Analysis of prolapse in cardiovascular stents: a constitutive equation for vascular tissue and finite-element modelling," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 125, no. 5, pp. 692-699, 2003. <https://doi.org/10.1115/1.1613674>
- [2] C. Mandrycky, Z. Wang, K. Kim, and D. H. Kim, "3D bioprinting for engineering complex tissues," *Biotechnology Advances*, vol. 34, no. 4, pp. 422-434, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.011>
- [3] S. Hu, X. Zhang, M. Unger, I. Patties, A. Melzer, and L. Landgarf, "Focused Ultrasound-Induced Cavitation Sensitizes Cancer Cells to Radiation Therapy and Hyperthermia," *Cells*, vol. 9, no. 12, pp. 2595, 2020. <https://doi.org/10.3390/cells9122595>
- [4] L. H. Lindner, and R. D. Issels, "Hyperthermia in soft tissue sarcoma," *Current Treatment Options in Oncology*, vol. 12, no. 1, pp. 12-20, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11864-011-0144-6>
- [5] Y. G. Shellman, W. R. Howe, L. A. Miller, N. B. Goldstein, T. R. Pacheco, R. L. Mahajan, S. M. LaRue, and D. A. Norris, "Hyperthermia induces endoplasmic reticulum-mediated apoptosis in melanoma and non-melanoma skin cancer cells," *Journal of Investigative dermatology*, vol. 128, no. 4, pp. 949-956, 2008. <https://doi.org/10.1038/sj.jid.5701114>
- [6] L. Zheng, Y. Zhang, H. Lin, S. Kang, Y. Li, D. Sun, M. Chen, Z. Wang, Z. Jiao, Y. Wang, B. Dai, S. Zhuang, and D. Zhang, "Ultrasound and Near-Infrared Light Dual-Triggered Upconversion Zeolite-Based Nanocomposite for Hyperthermia-Enhanced Multimodal Melanoma Therapy via a Precise Apoptotic Mechanism," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 29, pp. 32420-32431, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c07297>
- [7] M. M. Paulides, G. M. Verduijn, and N. V. Holthe, "Status quo and directions in deep head and neck hyperthermia," *Radiation Oncology*, vol. 11, no. 21, pp. 1-14, 2016. <https://doi.org/10.1186/s13014-016-0588-8>
- [8] H. H. Pennes, "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm," *Journal of Applied Physiology*, vol. 1, no. 2, pp. 93-122, 1948. <https://doi.org/10.1152/jappl.1948.1.2.93>

- [9] J. Pan, Y. Xu, Q. Wu, P. Hu, and J. Shi, "Mild Magnetic Hyperthermia-Activated Innate Immunity for Liver Cancer Therapy," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 143, no. 21, pp. 8116-8128, 2021. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c02537>
- [10] A. Bhardwaj, K. Parekh, and N. Jain, "In vitro hyperthermic effect of magnetic fluid on cervical and breast cancer cells," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 15249, pp. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71552-3>.
- [11] J. H. Almaki, R. Nasiri, A. Idris, M. Nasiri, F. A. A. Majid, and D. Losic, "Trastuzumab-decorated nanoparticles for in vitro and in vivo tumor-targeting hyperthermia of HER2+ breast cancer," *Journal of Materials Chemistry B*, vol. 5, no. 35, pp. 7369-7383, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7TB01305A>
- [12] R. Kleef, R. Moss, A. M. Szasz, A. Bohdjalian, H. Bojar, and T. Bakacs, "Complete clinical remission of stage IV triple-negative breast cancer lung metastasis administering low-dose immune checkpoint blockade in combination with hyperthermia and interleukin-2," *Integrative Cancer Therapies*, vol. 17, no. 4, pp. 1297-1303, 2018. <https://doi.org/10.1177/1534735418794867>
- [13] M. Ried, K. Lehle, R. Neu, C. Diez, P. Bednarski, Z. Szklavari, and H. S. Hofmann, "Assessment of cisplatin concentration and depth of penetration in human lung tissue after hyperthermic exposure," *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, vol. 47, no. 3, pp. 563-566, 2015. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezu217>
- [14] T. Liu, D. X. Zhao, H. Cui, L. Chen, Y. H. Bao, Y. Wang, and J. Y. Jiang, "Therapeutic hypothermia attenuates tissue damage and cytokine expression after traumatic brain injury by inhibiting necroptosis in the rat," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 24547, pp. 1-11, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep24547>
- [15] T. Wang, G. Zhao, and B. Qiu, "Theoretical evaluation of the treatment effectiveness of a novel coaxial multi-slot antenna for conformal microwave ablation of tumors," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 90, pp. 81-91, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.030>
- [16] I. Raouf, S. Khalid, A. Khan, J. Lee, H. S. Kim, and M. H. Kim, "A review on numerical modeling for magnetic nanoparticle hyperthermia: Progress and challenges," *Journal of Thermal Biology*, vol. 91, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102644>
- [17] A. V. Vorst, A. Rosen, and Y. Kotsuka, "RF/microwave interaction with biological tissues," *New Jersey: John Wiley & Sons*, pp. 177- 181, 2006. ISBN-10: 0-471-73277-X, ISBN-13: 978-0-471-73277-8
- [18] N. Kavooosi, B. Haghighi and A. Saleh, "Parametric investigation of aperture length change in two-aperture antenna with the presence of blood vessel in the treatment of cancerous tissue by hyperthermia method", *The 10th National Congress of the New Technologies in Sustainable Development of Iran*. Iran, Tehran, 2021. <https://civilica.com/doc/1179787> (In Persian)
- [19] P. Gas, "Transient Analysis of Interstitial Microwave Hyperthermia Using Multi-Slot Coaxial Antenna Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems," Springer International Publishing, pp. 63-71, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11248-0_5
- [20] F. Brero, M. Albino, A. Antoccia, P. Arosio, M. Avolio, F. Berardinelli, D. Bettega, P. Calzolari, M. Ciocca, M. Corti, A. Facoetti, S. Gallo, F. Groppi, A. Guerrini, C. Innocenti, C. Lenardi, S. Locarno, S. Manenti, R. Marchesini,

- and M. Mariani, "Hadron therapy, magnetic nanoparticles and hyperthermia: A promising combined tool for pancreatic cancer treatment," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 10, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano10101919>
- [21] M. Salimi, S. Sarkar, M. Hashemi, and R. Saber, "Treatment of breast cancer-bearing BALB/c mice with Magnetic Hyperthermia using Dendrimer Functionalized Iron-Oxide Nanoparticles," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 11, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano10112310>
- [22] Z. W. Lim, V. B. Varma, R. V. Ramanujan, and A. Miserez, "Magnetically responsive peptide coacervates for dual hyperthermia and chemotherapy treatments of liver cancer," *Acta Biomaterialia*, vol. 110, pp. 221-230, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.04.024>
- [23] P. T. Nguyen, A. Abbosh, and S. Crozier, "Three-dimensional Microwave Hyperthermia for Breast Cancer Treatment in a Realistic Environment Using Particle Swarm Optimization," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 64, no. 6, pp. 1335-1344, 2016. <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2602233>
- [24] Z.S. Deng, and J. Liu, "Monte Carlo Method to Solve Multidimensional Bioheat Transfer Problem," *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 42, no. 6, pp. 543-567, 2002. <https://doi.org/10.1080/10407790260444813>
- [25] P. Yuan, "Numerical Analysis of Temperature and Thermal Dose Response of Biological Tissues to Thermal Non-Equilibrium during Hyperthermia Therapy," *Medical Engineering & Physics*, vol. 30, no. 2, pp. 135-143, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2007.03.006>
- [26] K. Saito, H. Yoshimura, K. Ito, Y. Aoyagi, and H. Horita, "Clinical trials of interstitial microwave hyperthermia by use of coaxial-slot antenna with two slots," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 8, pp. 1987-1991, 2004. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.832005>



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

Feasibility of the Performance of Thermal Photovoltaic Systems in Residential Units in the Climate of Four Cities of Abadan, Baghdad, Basra, and Tehran in Terms of Energy Saving

Research Article

Ali Jabri¹, Mohammad Reza Ansari², Mahdi Marefat³

DOI: [10.22067/jacsm.2023.79017.1141](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.79017.1141)

1. Introduction

In order to increase the efficiency in solar energy applications, researchers have proposed the combination of two solar collector and thermal photovoltaic systems in series. By using combined solar collector and thermal photovoltaic systems, the output temperature of water can be increased, which increases the thermal efficiency.

Based on the literature review, the feasibility of using PVT-ST has been investigated in only one published article for the city of Shanghai, China. Therefore, it is necessary to analyze the performance of the PVT-ST system in different cities in one year to evaluate its potential for use in different climates and cities. For this purpose, a 2D mathematical model was developed to evaluate the performance of the system in terms of thermal and electrical power. Tehran, Abadan, Baghdad, and Basra were selected for this study due to the suitable weather conditions and suitable solar radiation for about a year, which is very suitable for solar systems. A comparative study was conducted between PVT-ST, PVT and ST systems and the performance of the system in four selected cities in six months was investigated, respectively. For the first time, the effects of using the laminar and turbulent regime of the PVT-ST system were investigated. And then the impact proposed system on the selected cities are investigated. The supply of heating as well as the supply of electricity required by this equipment was investigated with the help of Carrier software for a building in four different cities of Abadan, Basra, Baghdad, and Tehran.

2. Proposed solar system

Figure 1 shows the PVT-ST diagram for the simultaneous supply of electricity and thermal energy required for a residential unit. As can be seen, PVT-ST consists of two separate parts of PVT and ST, which are connected by a pipeline. The PVT system consists of several layers, including, from top to bottom, glass cover, PV panel, absorber plate, pipes and insulation. The ST system consists of a glass cover on top of the absorber plate to increase solar absorption by the absorber plate, pipes connected to the absorber plate and insulation. The solar collector is made of copper with spiral tubes.

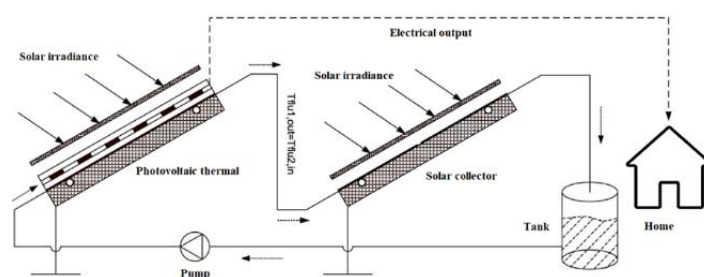


Figure 1. Schematic of PVT-ST

3. Results and discussion

3.1. Investigating the hourly performance of the PVT-ST system under laminar and turbulent regimes

In order to understand the thermal and electrical behavior of the PVT-ST system, the electrical and thermal power produced on a typical July day in Tehran was investigated. For this purpose, the hourly outlet temperature of the working fluid and the temperature of the PV surface are discussed first. The results are plotted in Figure 2 for different mass flow rates to consider both quiescent and turbulent regimes. Therefore, three mass flow rates of 0.00394, 0.00788 and 0.01182 kg/s are considered for the calm regime and three mass flow rates of 0.02252, 0.02646 and 0.0304 kg/s are considered for the turbulent regime. Figure 2 shows that the outlet temperature increases to a maximum around 11:00 AM for all mass flow rates, when the system receives more solar radiation. In addition, the mass flow rate in the laminar regime has a higher outlet temperature than in the turbulent regime. The 11:00 AM setting as a baseline for comparison, using a mass flow rate of 0.00394 kg/s, provides an outlet temperature of about 333.16 K, which decreases to 319.1 K (a 4.2 percent decrease) with a mass flow rate of 0.01182 kg/s. The use of turbulent flow reduces the outlet temperature even more. However, as the mass flow rate increases from 0.02252 to 0.0304 kg/s, the outlet temperature at 11:00 AM only decreases by 0.4%. This shows that the impact of mass flow rate on outlet temperature decreases with the increase of mass flow rate, especially in the turbulent regime.

*Manuscript received: October 2, 2022. Revised, December 7, 2022, Accepted, March 19, 2023.

¹. Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

². Corresponding author. Professor Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

Email: mra_1330@modares.ac.ir

³. Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

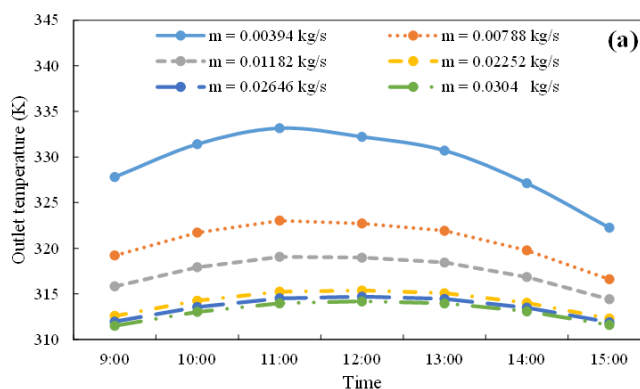


Figure 2. The variation of outlet temperatures

3.2. PVT-ST in four cities

Finally, in this section, the performance of the proposed system is evaluated under weather conditions in Tehran, Abadan, Baghdad and Basra for six months of the year. It should be noted that all four cities have hot weather with solar radiation and high ambient temperature. Moreover, based on the results for the mass flow rate (comparison of calm and turbulent regime), the mass flow rate of 0.0304 kg/s was chosen for this section due to its superiority in creating higher thermal and electrical power. In general, the proposed PVT-ST system can achieve satisfactory thermal efficiency compared to other systems with the same total collector area under the same operating conditions, while having the same performance in power generation. Moreover, the proposed PVT-ST system has better efficiency and performance in terms of thermal energy, with higher outlet water temperature than conventional PVT modules, along with energy generation. PVT-ST system can produce a significant amount of heat as a partial supplement to buildings.

In checking the inlet water temperature, it can be mentioned that water with a higher temperature absorbs less thermal energy. In other words, more thermal energy is directed to the PV cells, which leads to an increase in the output temperature and a decrease in the thermal efficiency. The results show that assuming the use of water inside the tank (we have considered the temperature of the incoming water to be equal to the ambient temperature), it can be seen that Basra has the highest thermal efficiency compared to the rest of the cities. The intensity of radiation in Basra is significantly higher than the rest of the cities

4. Examination of the residence building

In this part, we examine the amount of electricity consumed in the hot quarter of the year, i.e., summer. In this study, we examined the months of July, August and September. August has the highest electricity consumption due to the intense sun and heat. Then, assuming eight parallel systems to supply electricity to a residential house in the hot quarter of the year,

we compare the electricity production capacity. As Figure 3 shows, in the early hours of the day due to more sunlight and the lack of use of lighting systems, the amount of electricity produced before 13:00 meets household consumption well, so that even the excess electricity can be stored. Moreover, in the early hours of the day, due to the lack of use of lighting equipment, the amount of electricity produced is more than the electricity consumed, and as before, the electricity produced can be stored until 13:00. But after 13:00 in Figure 3, due to more use of electronic equipment, the amount of consumption increases, so that the produced electricity is not able to supply the home's consumption. As mentioned, due to the minimal amount of consumption in the early hours of the day, it is possible to store the produced electricity and use that capacity during the peak hours of consumption.

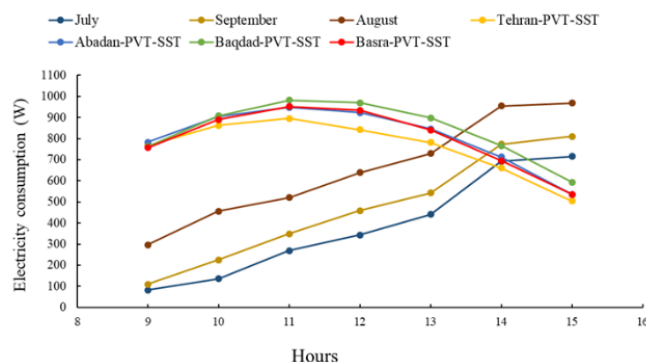


Figure 3. Hourly graph of the amount of electricity consumed in hot and cold quarters for cooling the house and comparing it with the parallel system in four different climates

5. Conclusion

In this article, for the first time, the potential and feasibility of using PVT-ST in relatively warm and moderate weather conditions (that is, in Tehran, Abadan, Baghdad, and Basra). The analysis of the working fluid regime shows that the optimal thermal and electrical efficiency can be obtained in a turbulent regime. Considering the mass flow rate of 0.0304 kg/s (turbulent regime) in July, the thermal efficiency of ST, PVT-ST and PVT systems are 85.7%, 78% and 72.9%, respectively. Finally, the investigation of PVT-ST system performance in different cities shows that this system can produce the highest thermal power in Basra. However, the maximum power generation with an average of 77 watts per square meter belongs to Baghdad. Finally, the energy supply of a residential house by combined systems was investigated. By considering eight combined systems, it is possible to supply most of the electricity consumed by a residential house, but it should be kept in mind that during the peak hours of consumption, this amount of electricity production does not meet the capacity of the house, which can also be used from the electricity stored in the battery.



امکان سنجی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی در واحدهای مسکونی در آب و هوای چهار شهر آبادان، بغداد، بصره و تهران از لحاظ صرفه‌جویی در انرژی*

مقاله پژوهشی

مهدی معرفت^(۳)محمد رضا انصاری^(۲)علی جبری^(۱)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.79017.1141

چکیده کلکتورهای حرارتی خورشیدی (ST) فقط می‌توانند نیروی حرارتی تولید کنند، در حالی که سیستم‌های حرارتی فتوولتائیک (PVT) می‌توانند هم برق و هم انرژی حرارتی را تامین کنند. با این حال، دمای خروجی PVT معمولاً به اندازه کافی برای استفاده در کاربردهای مختلف مانند گرمایش فضا بالا نیست. بنابراین سیستم جدیدی به نام مازول PVT و کلکتور ST به صورت سری (PVT-ST) القا می‌شود تا با دمای خروجی بالاتر، برق و توان حرارتی تولید کند. در این مقاله برای اولین بار به منظور بررسی پتانسیل و امکان‌سنجی استفاده از PVT-ST در شرایط آب و هوایی نسبتاً گرم و معتدل در چهار شهر تهران، آبادان، بغداد و بصره مورد مطالعه قرار گرفته است و با دو سیستم متداول PVT و ST مقایسه می‌شود. برای این منظور، عملکرد سامانه از نظر قوانین اول ترمودینامیک به صورت عددی مبتنی بر کد فرترن (Fortran) ارزیابی می‌شود و در ادامه با استفاده از نتایج بدست آمده به بررسی تحلیل انرژی مصرفی یک واحد مسکونی در ۴ شهر نام برده شده با استفاده از نرم‌افزار کریر (carrier) پرداخته شده است. علاوه بر این، اثرات نرخ جریان جرمی سیال عامل، در هر دو رژیم آرام و آشفته، بر عملکرد مازول بررسی می‌شود. در این مطالعه تجزیه و تحلیل رژیم سیال کاری نشان می‌دهد که بازده حرارتی و الکتریکی بهینه را می‌توان در یک رژیم آشفته به دست آورد. با در نظر گرفتن دبی جرمی ۰٫۰۳۰۴ کیلوگرم بر ثانیه (رژیم آشفته) در جولای، راندمان حرارتی سیستم‌های PVT-ST و PVT به ترتیب ۸۵٫۷٪، ۷۸٪ و ۷۲٫۹٪ است، در نهایت، بررسی عملکرد سیستم در شهرهای مختلف نشان می‌دهد که این سامانه می‌تواند بالاترین توان حرارتی را در بصره تولید کند. با این حال، حداکثر تولید برق با میانگین ۷۷ وات بر متر مربع متعلق به بغداد است. در انتها به بررسی تامین انرژی یک منزل مسکونی توسط سیستم‌های ترکیبی پرداخته شده است. با در نظر گرفتن ۸ سیستم ترکیبی می‌توان بیشتر برق مصرفی یک خانه مسکونی را تامین نمود اما باید این نکته را در نظر داشت که در ساعات اوج مصرف این مقدار تولید برق پاسخگوی ظرفیت خانه نمی‌باشد که می‌توان هم از برق ذخیره شده از باتری استفاده کرد و هم اینکه می‌توان کسری از کمبود برق را از شبکه شهری تامین نمود.

واژه‌های کلیدی کلکتور خورشیدی، سیستم فتوولتائیک حرارتی، صرفه‌جویی در انرژی، انرژی در ساختمان.

Feasibility of the Performance of Thermal Photovoltaic Systems in Residential Units in the Climate of Four Cities of Abadan, Baghdad, Basra, and Tehran in Terms of Energy Saving

Ali Jabri Mohammad Reza Ansari Mahdi Marefat

Abstract In this paper, for the first time, to investigate the potential and feasibility of using PVT-ST in relatively hot and moderate weather conditions, it has been studied in four different cities and compared with two common solar systems, PVT and ST. Therefore, the performance of the system is evaluated in terms of the first and second laws of thermodynamics based on the FORTRAN code, and then using the obtained results to analyze the energy consumption of a residential unit in 4 different cities using Carrier software. In addition, the effects of the mass flow rate of the working fluid, in both laminar and turbulent regimes, on the module performance are investigated. Considering the mass flow rate of 0.0304 kg/s (turbulent regime) in July, the thermal efficiency of ST, PVT-ST, and PVT systems are 85.7%, 78%, and 72.9%, respectively. Finally, the investigation of system performance in different cities shows that this system can produce the highest thermal power in Basra. However, the maximum power generation with an average of 77 watts per square meter belongs to Baghdad. Finally, the energy supply of a residential house by combined systems has been investigated. By considering 8 integrated systems, most of the electricity consumption of a residential house can be supplied, but it should be kept in mind that during the peak hours of consumption if this amount of electricity production does not meet the capacity of the house, a fraction of the electricity shortage can be supplied from the stored electricity.

Key Words Solar collector, thermal photovoltaic system, energy saving, energy in building.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۷/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱/۱۶ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(۲) نویسنده مسئول، استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ایمیل

(۳) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مقدمه

برای افزایش راندمان در کاربردهای انرژی خورشیدی محققان ترکیب دو سامانه کلکتور خورشیدی و فتوولتائیک حرارتی را به‌صورت سری پیشنهاد داده‌اند. با استفاده از سیستم‌های ترکیبی کلکتور خورشیدی همراه با فتوولتائیک حرارتی میتوان دمای خروجی آب را افزایش داد که به موجب این افزایش راندمان حرارتی نیز افزایش می‌یابد [1].

در تحقیق فراح و همکاران با استفاده از یک مدل ریاضی یک بعدی عملکرد دو سیستم ترکیبی را برحسب فصول تابستان و زمستان مورد بررسی قرار دادند. آنها یک سامانه فتوولتائیک هواخنک و یک کلکتور با سیال کاری آب را برای تابستان استفاده نمودند. در این حالت هوا گرمای اضافی را از سلولهای خورشیدی گرفته و به محیط می‌دهد و کلکتور خورشیدی آب گرم موردنیاز را تولید میکند. در حالی که برای فصل زمستان هر دو سیال کاری هر دو سیستم آب بوده است [2].

فکوریان و همکاران [3] به‌صورت تجربی یک سیستم ترکیبی کلکتور خورشیدی و فتوولتائیک حرارتی را در شرایط آب و هوایی تیرماه در شهر تهران مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد با استفاده از این روش بازدههای الکتریکی، حرارتی و کلی سامانه به‌ترتیب $12/3\%$ ، $49/4\%$ ، $61/7\%$ خواهد بود که در مقایسه با سیستم‌های رایج افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

در شرایط عملیاتی ثابت، هان (Han) و همکاران [4] عملکرد سیستم‌های PV-ST و PVT-ST را به‌صورت عددی بررسی کرد. در سامانه قبلی، سیستم PV فقط برق تولید می‌کرد و دومی نیروی حرارتی را تامین می‌کرد. سامانه PVT-ST عملکرد بهتری را در تابش خورشیدی و دمای محیط بالاتر در مقایسه با سیستم PV-ST منعکس می‌کند. کاظمیان و همکاران با در نظر گرفتن یک روز در ماه جولای در شانگهای [1] سیستم‌های ST، PV، PVT و PVT-ST را به‌صورت عددی مقایسه کردند و تأثیر پارامترهای مختلف را بر عملکرد PVT-ST بررسی کردند. پارامترها نرخ جریان جرمی سیال کار، دمای ورودی، دمای محیط، تابش خورشیدی و سرعت باد بودند. آنها فقط رژیم آرام را در نظر گرفتند و نشان دادند که پس از تابش خورشیدی و دمای ورودی سیال عامل، دبی جرمی عامل تأثیرگذار بر توان حرارتی و الکتریکی سامانه است. چاندان (Chandan) و همکاران [5] اثرات

استفاده از پوشش شیشه‌ای بر روی سامانه PVT-ST را به‌صورت تجربی و عددی ارزیابی کرد. آنها گزارش دادند که استفاده از یک پوشش شیشه‌ای در بالای سامانه می‌تواند دمای خروجی را حدود ۲-۳ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد زمانی که سامانه PVT-ST به جای PVT استفاده شود. با این حال، توان الکتریکی PVT-ST شیشه‌ای ۲۳ درصد کمتر از بدون لعاب بود. این مطالعه به مدت یک روز در ماه فوریه در چنای هند انجام شد.

السلیمه و همکاران [6] استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک را در یک آپارتمان مسکونی استاندارد در کشور عمان مورد مطالعه قرار دادند. آنها یک آپارتمان در عمان را عنوان نمونه مطالعه برای انجام محاسبات انرژی و اقتصادی انتخاب کردند. نیاز برق و هزینه برای آپارتمان محاسبه شد. طراحی و هزینه سامانه PV برای تامین انرژی مورد نیاز محاسبه شد و مدت زمان بازگشت هزینه در سامانه ارائه شده با در نظر گرفتن عامل‌های نرخ تورم ثابت با قیمت برق مشخص محاسبه شده است. نتایج خروجی این مطالعه نشان می‌دهد که نصب سامانه PV در یک آپارتمان مسکونی در اردن ممکن است به دلیل هزینه بالای سیستم PV در مقایسه با هزینه برق شبکه، از نظر اقتصادی مفید نباشد. قانون تعرفه ورودی برق خورشیدی ممکن است به کاهش هزینه سیستم PV مانند مورد آلمان کمک کند. نتیجه‌گیری‌های اضافی این است که اگر سیستم‌های PV در مکان‌های دور از شبکه برق یا در تاسیسات برق PV در مقیاس بزرگ از راه دور برای غلبه بر محدودیت‌های اقتصادی فناوری PV استفاده شوند، ممکن است از نظر اقتصادی در اردن مفید باشند.

بر اساس بررسی ادبیات، امکان‌سنجی استفاده از PVT-ST تنها در یکی از مقالات منتشر شده برای شهر شانگهای چین بررسی شده است. بنابراین، تجزیه و تحلیل عملکرد سامانه PVT-ST در شهرهای مختلف در یک سال برای ارزیابی پتانسیل آن برای استفاده در آب و هوا و شهرهای مختلف ضروری است. برای این منظور، یک مدل ریاضی یک بعدی برای ارزیابی عملکرد سامانه از نظر توان حرارتی و الکتریکی توسعه داده شده است. علاوه بر این، سامانه بر اساس قانون دوم ترمودینامیک مورد مطالعه قرار گرفته است. چهار شهر تهران، آبادان، بغداد و بصره با توجه به شرایط آب و هوایی مناسب و تابش خورشیدی مناسب در حدود یک سال که بسیار مناسب برای برای سیستم‌های خورشیدی می‌باشد برای این مطالعه انتخاب شدند.

در صنعت یا برای ذخیره سازی حرارتی استفاده نمود. ترکیبی از ماژول‌های PV و کلکتورهای ST، که ماژول PVT نامیده می‌شوند، برای خروجی برق و گرما به طور همزمان، ابتدا توسط مارتین و همکاران [11]، در سال ۱۹۷۶ مورد بررسی قرار گرفت. با این وجود، ماژول PVT تنها انرژی حرارتی با دمای پایین را همراه با سیال کاری با دمای پایین‌تر در مقایسه با کلکتور ST منفرد تولید می‌کند، در مطالعات [12] و [13] نشان داده شد که دمای آب خروجی از ماژول PVT معمولی معمولاً کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. علاوه بر این، در زمانی که تابش خورشیدی کافی نیست (معمولاً در زمستان، روزهای بارانی یا ابری)، انرژی کمکی مانند برق باید برای گرم کردن آب مصرف شود زیرا دمای آب خروجی برای کاربردهای مسکونی یا عمومی بسیار پایین است. بنابراین، یک ماژول PVT با یک کلکتور ST متصل به صورت سری (ساده شده به عنوان PVT-ST) پیشنهاد شده است که یک فناوری ترکیبی نوآورانه را ارائه می‌دهد که می‌تواند هم برق و هم انرژی حرارتی با دمای بالا تولید کند.

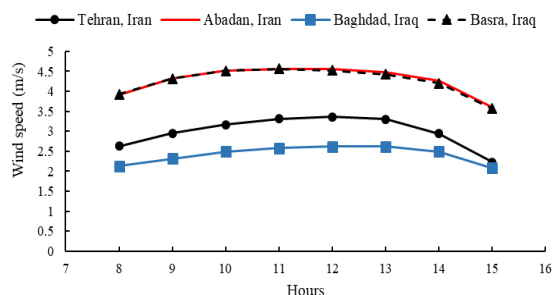
شرایط آب و هوایی شهرهای انتخابی

به منظور به دست آوردن داده‌های آب و هوایی شهرهای منتخب از نرم‌افزار System Advisor Model (SAM) استفاده شده است. با کمک این نرم‌افزار می‌توان متغیرهای مختلف آب و هوایی نظیر تشعشع خورشید و دمای محیط را برای نقاط مختلف جغرافیایی به صورت ساعتی، روزانه و ماهیانه به دست آورد. از این اطلاعات هم در بخش تحلیل عملکرد سیستم ترکیبی و هم محاسباتی حرارتی ساختمان استفاده خواهد شد. در شکل (۱) تا شکل (۵) به ترتیب تغییرات ساعتی تشعشع خورشید، دمای محیط و سرعت باد برای چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران نشان داده شده است. این داده‌ها به صورت ساعتی می‌باشد که با استفاده از نرم‌افزار SAM به دست آورده شده است.

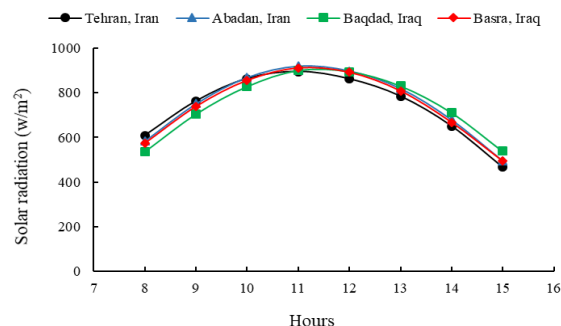
نتایج در سه بخش ارائه شده است: (۱) ابتدا، عملکرد سامانه در یک روز معمولی به مدت شش ماه، از جمله ژانویه، مارس، مه، جولای، سپتامبر و نوامبر، با در نظر گرفتن تجزیه و تحلیل انرژی، ارزیابی می‌شود. مطالعه تطبیقی بین سیستم‌های PVT، PVT-ST و ST انجام شده است و عملکرد سیستم در چهار شهر منتخب در شش ماه به ترتیب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه برای اولین بار اثرات استفاده از رژیم آرام و آشفته سیستم PVT-ST بررسی شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند بینش بهتری نسبت به استفاده گسترده از سیستم‌های PVT-ST در مناطق با هوای گرم داشته باشد. همچنین تحقیقات کم و محدودی در مورد سیستم‌های ترکیبی و ارزیابی امکان حرارتی در بخش مسکونی انجام شده است. تامین گرمایش و همچنین تامین برق مورد نیاز این تجهیزات به کمک نرم‌افزار کریر برای ساختمانی در چهار شهر مختلف آبادان، بصره، بغداد و تهران بررسی گردیده است.

سیستم بررسی شده

سیستم ترکیبی کلکتور خورشیدی و فتوولتائیک حرارتی
با توجه به تبدیل انرژی خورشیدی به برق یا انرژی حرارتی، سیستم‌های انرژی خورشیدی را می‌توان به سه نوع تقسیم کرد: ماژول‌های فتوولتائیک (PV)، کلکتورهای حرارتی خورشیدی (ST) و ماژول‌های حرارتی فتوولتائیک (PVT) که از جمله محبوب ترین آنها می‌توان به بعضی از فناوری‌های مورد استفاده برای تولید برق، مانند کاشی‌های کف فتوولتائیک قابل راه رفتن [7] می‌توان اشاره کرد، نمای بتنی پیش ساخته ادغام شده با پانل‌های PV [8]، و ادغام با مواد تغییر فاز برای داشتن عملکرد الکتریکی بهتر [9]. با این حال، تولید الکتریکی ماژول‌های PV تنها ۱۰ تا ۲۰٪ تابش خورشیدی را تشکیل می‌دهد در حالی که بیشتر مابقی تبدیل به گرما می‌شود که منجر به افزایش دمای PV می‌شود. به همین ترتیب، راندمان الکتریکی به صورت خطی با افزایش دمای PV کاهش می‌یابد. همانطور که در مرجع [10] نشان داده شده است، کلکتور ST بیشتر تابش خورشیدی را جذب می‌کند و آن را به انرژی حرارتی با دمای متوسط تبدیل می‌کند، که توسط سیال فعال (عمدتاً هوا، آب/روغن) استخراج می‌شود که می‌تواند مستقیماً به عنوان آب گرم، کاربرد حرارتی



شکل ۵ نمودار میانگین سرعت باد در سه ماهه زمستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران



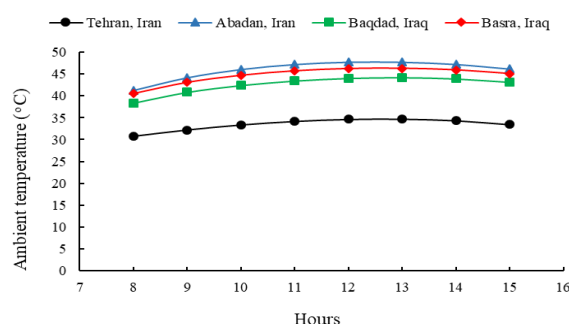
شکل ۶ نمودار میانگین شاردریافتی در سه ماهه تابستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران

واحد مسکونی انتخابی و مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی

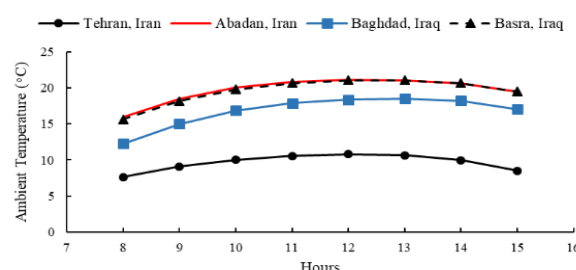
همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد سیستم ترکیبی معرفی شده جهت تامین انرژی یک واحد مسکونی متداول در چهار شهر مختلف شامل آبادان، بصره، بغداد و تهران به کار گرفته خواهد شد. در این بخش به بررسی پارامترهای ساختمان مورد بررسی و نحوه انجام محاسبات آن پرداخته خواهد شد. در این پژوهش، یک واحد آپارتمانی با ابعاد ۱۳۰ مترمربع دارای دو اتاق خواب و یک آشپزخانه به ترتیب با مساحت‌های ۱۲ و ۱۵ مترمربع در نظر گرفته شده است. برای هر اتاق نیز یک پنجره و درب در نظر گرفته خواهد شد. این محاسبات توسط نرم‌افزار کریر (Carrier) بخش ساختمانی انجام خواهد گرفت. در این نرم‌افزار جنس تمامی مصالح موجود بوده و می‌توان انرژی گرمایشی مورد نیاز را محاسبه نمود. همچنین برای انرژی الکتریکی مصرفی این واحد ساختمانی از تخمین ارائه شده توسط علایی و همکاران [14] استفاده شده است.

لذا با استفاده از نرم‌افزار کریر و اطلاعات مرجع [14] میزان مصرف انرژی واحد مسکونی قابل محاسبه بوده و انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی سیستم ترکیبی حاصل از حل عددی مطالعه حاضر به راحتی با مقادیر مورد نیاز برای ساختمان مقایسه خواهند شد.

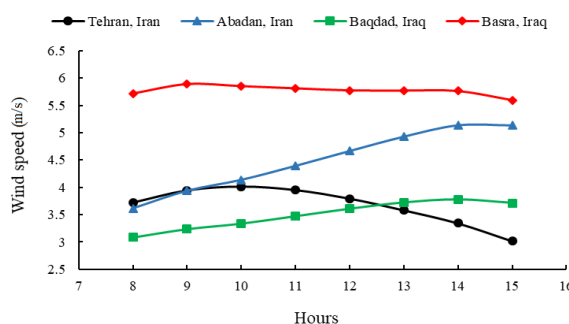
خانه مسکونی به مساحت ۱۳۰ متر مربع در نظر گرفته شده است. مشخصه های فیزیکی این خانه بدین صورت است که تمامی دیوارها بتن سبک کار شده است، کف واحد مسکونی بر روی زمین قرار دارد و در تبادل گرما با سطح زمین می‌باشد، سقف عایق ایزوگام، چهار سمت واحد مسکونی در تبادل انتقال حرارت با محیط اطراف می‌باشد، یک درب ورودی از جنس



شکل ۷ نمودار میانگین دمای محیط در سه ماهه تابستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران



شکل ۸ نمودار میانگین دمای محیط در سه ماهه زمستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران



شکل ۹ نمودار میانگین سرعت باد در سه ماهه تابستان در چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران

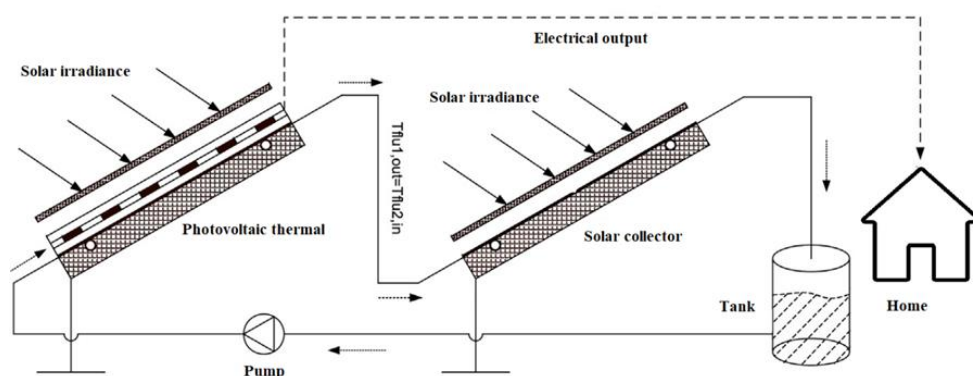
جدول ۱ متوسط مصرف برق در طول یک ماه تخمین زده شده توسط
علائی و همکاران [14]

وسیله برقی	انرژی مصرفی (W)	میانگین ساعت مورد استفاده در طول روز	متوسط مصرف ماهیانه (kW)
دو عدد لامپ معمولی	۲۰۰	۶	۳۶
دو عدد لامپ کم مصرف	۴۰	۵	۶
یخچال	۳۰۰	۲۴	۲۱۶
ماشین ظرفشویی	۱۵۰۰	۱	۴۵
اتو	۸۰۰	۱	۲۴
پلوپز	۷۰۰	۱	۲۱
سماور	۵۰۰	۱	۱۵
تلویزیون	۱۵۰	۵	۲۲/۵
آب گرم کن برقی	۱۳۰۰	۲	۷۸
کامپیوتر و تلفن	۱۵۰	۸	۳۶
سایر	-	-	۶۶/۵
جمع	-	-	۵۶۶

سیستم خورشیدی پیشنهادی

در تحقیق حاضر ترکیبی از یک ماژول‌های PV و کلکتورهای ST، که به عنوان ماژول PVT نامیده می‌شوند، برای خروجی برق و گرما به طور همزمان، بکار برده شده است. در شکل (۶)، مفهوم سامانه هیبریدی PVT-ST و پیکربندی آن در این مطالعه معرفی شده است.

چوب و ۴ پنجره دو جداره آلومینومی در نظر گرفته شده است. تمامی مشخصه‌ها توسط نرم‌افزار کریر مدل شده است و ابعاد دیواره و درب و پنجره‌ها متناسب با استاندارد ملی ساختمان ایران در نظر گرفته شده است. سامانه روشنایی و تمام تجهیزات برقی طبق برنامه روزانه یک خانوار در نظر گرفته شده است. بدین صورت که سامانه روشنایی در ساعات پایانی شب خاموش می‌شود، یخچال به طور مداوم روشن می‌باشد، مابقی وسایل الکترونیکی طبق برنامه روزانه یک خانواده می‌باشد و میزان مصرف و گرمایی که تولید می‌کنند در نرم‌افزار درج شده است. نوع سامانه گرمایشی این واحد مسکونی پکیج در نظر گرفته شده است که با استفاده از ۴ رادیاتور هر کدام به مساحت ۲ متر مربع در تمامی منزل توزیع می‌شود. سامانه گرمایشی در ۶ ماهه پاییز و زمستان فعال در نظر گرفته شده است. در این واحد مسکونی علاوه بر سامانه گرمایش یک سامانه سرمایش نیز در نظر گرفته شده است، ما در این نرم‌افزار از کولر آبی استفاده کرده ایم. طبق برنامه و در ۳ ماه تابستان فعال است. تعداد افراد ساکن در منزل ۳ نفر در نظر گرفته شده است که در روزهای تعطیل آخر هفته دارای حداقل فعالیت و در روزهای دیگر دارای فعالیت روزانه معمولی می‌باشند. همچنین برای انرژی الکتریکی مصرفی این واحد ساختمانی از تخمین ارائه شده توسط علائی و همکاران [14] استفاده شده است که در جدول (۱) محاسبات و تخمین مصرف برق آورده شده است. شایان ذکر است، همانطور که قبلاً نشان داده شد، به‌منظور بدست آوردن داده‌های آب و هوایی شهرهای منتخب از نرم‌افزار (SAM) استفاده خواهد شد.



شکل ۶ شماتیک سیستم ترکیبی فتوولتائیک حرارتی و گردآورنده خورشیدی

جدول ۲ خصوصیات و ابعاد هندسی PVT مورد بررسی [15]

mm	۳	δ_g	ضخامت شیشه
kg/m ³	۲۲۰۰	ρ_g	چگالی شیشه
J/kgK	۴۸۰	C_g	گرمای ویژه شیشه
W/mK	۱/۱	k_g	ضریب رسانش شیشه
-	۰/۰۵	α_g	ضریب جذب شیشه
-	۰/۹۲	ϵ_g	ضریب گسیل شیشه
-	۰/۹۳۶	τ_g	ضریب عبور شیشه
J/K	$1/38 \times 10^{-23}$	σ	ضریب ثابت استفان بولتزمن
mm	۰/۳	δ_{abs}	ضخامت جاذب
kg/m ³	۸۹۲۰	ρ_{abs}	چگالی جاذب
J/kgK	۳۸۵	C_{abs}	گرمای ویژه جاذب
W/mK	۳۹۸	k_{abs}	ضریب رسانش جاذب
m	۰/۶۳	L	طول صفحه پی وی
m	۰/۵۴	W	عرض صفحه پی وی
mm	۰/۳	δ_{pv}	ضخامت صفحه پی وی
J/kgK	۷۰۰	C_{pv}	گرمای ویژه پی وی
W/mK	۸۴	k_{pv}	ضریب رسانش پی وی
-	۰/۹۴	r_{pv}	پکینگ فکتور
-	۰/۹۵	α_{pv}	ضریب جذب پی وی
1/K	۰/۰۰۴۵	β_{pv}	ضریب دمای پی وی
mm	۸	D	قطر لوله
mm	۱	δ_{tube}	ضخامت لوله
m ³	۰/۲	V	حجم تانک

خصوصیات و ابعاد مورد نظر در جدول (۲) آمده است. لازم به ذکر است ابعاد PVT و ST کاملاً مشابه یکدیگر هستند.

معادلات حاکم و شیوه حل آنها

هدف مطالعه حاضر ساخت یک مدل گذرا است که تمام لایه‌های مختلف را شامل می‌شود که شامل پوشش شیشه‌ای، صفحه PV، صفحه جاذب، لوله‌ها و عایق‌ها می‌شود. برای حل معادلات حاکم از کد فرترن استفاده شده است. برخی از مفروضات برای استخراج مدل‌سازی ریاضی به صورت زیر استفاده می‌شوند:

- سیال تراکم ناپذیر، یکنواخت و تک بعدی (محوری) است [15].

۲. خواص سیال عامل وابسته به دما است.

۳. آسمان جسم سیاهی است و درجه حرارت آن بر مبنای دمای

شکل ۶ (۶) نمودار PVT-ST را به منظور تامین همزمان برق و انرژی حرارتی مورد نیاز برای یک واحد مسکونی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، PVT-ST شامل دو قسمت مجزا از PVT و ST است که با یک خط لوله متصل می‌شوند. سیستم PVT از لایه‌های مختلفی تشکیل شده است، از جمله، از بالا به پایین، پوشش شیشه‌ای، پانل PV، صفحه جاذب، لوله‌ها و عایق. سیستم ST شامل یک پوشش شیشه‌ای در بالای صفحه جاذب برای افزایش جذب خورشیدی توسط صفحه جاذب، لوله‌های متصل به صفحه جاذب و عایق است. کلکتور خورشیدی از مس با لوله‌های مارپیچ ساخته شده است. خواص هندسی و ترموفیزیکی هر جزء در جدول (۲) آورده شده است. در محاسبات ما از ترکیب یک PVT و یک کلکتور استفاده کردیم و

شیشه به شکل زیر است:

$$\rho_g \delta_g c_g \frac{dT_g}{dt} = \alpha_g G - h_{rad,g \rightarrow env}(T_g - T_{sky}) - h_{wind}(T_g - T_{amb}) + U_{cond,g \rightarrow pv}(T_{pv} - T_g) + \delta_g \nabla \cdot (k_g \nabla T_g) \quad (۱)$$

در این رابطه ρ ، δ ، α و c به ترتیب چگالی، ضخامت، ضریب جذب و گرمای ویژه می باشد. همچنین G تشعشع خورشید بر واحد سطح و g ، sky و amb به ترتیب نماد شیشه، آسمان و محیط می باشند. $h_{rad,g \rightarrow env}$ و $U_{cond,g \rightarrow pv}$ به ترتیب ضریب هدایت تشعشع شیشه به محیط، ضریب هدایت جابجایی به محیط و ضریب هدایت کلی بین شیشه و سلول خورشیدی که با نماد pv نشان داده شده است می باشند. دو ضریب هدایت تشعشع شیشه و جابجایی به محیط از روابط (۱) و (۳) محاسبه می گردند [19]:

$$h_{rad,g \rightarrow env} = \varepsilon_g \sigma (T_g^2 + T_{sky}^2)(T_g + T_{sky}) \quad (۱)$$

$$h_{wind} = \begin{cases} 5.7 + 3.8V_{wind}, & V_{wind} < 5 \frac{m}{s} \\ 6.47 + V_{wind}^{0.78}, & V_{wind} \geq 5 \frac{m}{s} \end{cases} \quad (۳)$$

در رابطه (۲)، ε_g و σ به ترتیب ضریب گسیل شیشه و ضریب ثابت استفان بولتزمن (Stefan Boltzman constant) بوده و در رابطه (۳) سرعت باد است. همچنین ضریب کلی انتقال حرارت از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$U_{cond,g \rightarrow pv} = \frac{1}{\frac{\delta_g}{2k_g} + \frac{\delta_{pv}}{2k_{pv}} + R_{g \rightarrow pv}''} \quad (۲)$$

که در این رابطه $R_{g \rightarrow pv}''$ مقاومت تماسی گرمایی بین شیشه و سلول خورشیدی است. دماهای نشان داده شده در رابطه شامل T_{sky} ، T_{amb} ، T_{pv} و T_g به ترتیب مربوط به آسمان، محیط، سلول خورشیدی و شیشه است. دمای آسمان از رابطه زیر به دست می آید [20]:

$$T_{sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (۳)$$

برای نوشتن معادله انرژی سلول خورشیدی باید به این نکته توجه نمود که بخشی از انرژی که از شیشه عبور می کند مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می شود. لذا معادله انرژی سلول های خورشیدی به شکل زیر خواهد بود:

محیط محاسبه می شود [15].

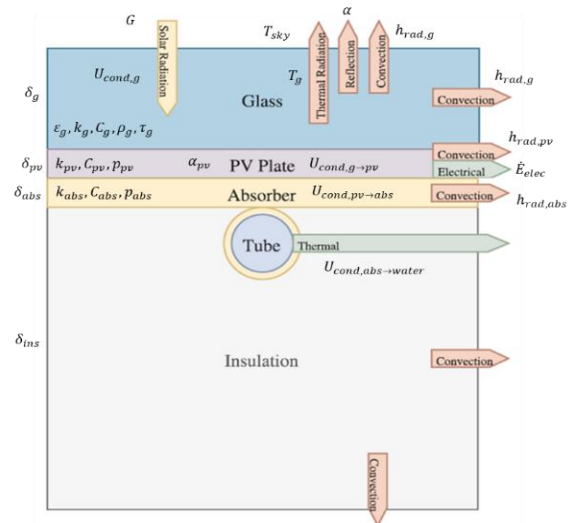
۴. از آنجایی که ضخامت صفحات خیلی کم است، هر لایه به صورت توده ای و دارای ضخامت یک سلول در نظر گرفته می شود [15].

۵. تابش خورشیدی مستقیم و عمود بر سطح است [16,17].

۶. تلفات اهمی در سلول های خورشیدی ناچیز است [18].

مدل سازی سیستم فتوولتائیک حرارتی

بر اساس مفروضات مدل پیشنهادی، معادلات انرژی لایه های مختلف برای حل در کد فرترن استخراج شده اند. همانطور که در شکل (۷) نشان می دهد، ماژول PVT دارای لایه های مختلفی است، یعنی پوشش شیشه ای، صفحه PV، صفحه جاذب، دیواره لوله، مایع خنک کننده و عایق. علاوه بر این، انرژی ورودی و خروجی یک ماژول PVT در شکل (۷) نشان داده شده است. در این کار، عایق به عنوان یک ماده غیر ایده آل در نظر گرفته می شود.



شکل ۷ شماتیک و تعادل انرژی ماژول PVT

معادلات حاکم به همراه روابطی که جهت محاسبه بازده های مختلف این سیستم ها مورد استفاده قرار می گیرند در این بخش به طور کامل اشاره شده اند. برای لایه های مختلف سامانه فتوولتائیک حرارتی شامل شیشه، سلول خورشیدی و صفحه جاذب بعلاوه لوله آب است که می بایست معادلات انرژی حل گردد. در ابتدا به معادله انرژی شیشه اشاره می گردد. در این رابطه شار خورشید و همچنین اتلافات گرمایی به محیط از طریق جابجایی و تشعشع در نظر گرفته شده است. معادله انرژی برای

ضریب هدایت جابجایی در داخل لوله با استفاده از عدد ناسلت قابل محاسبه می‌باشد:

$$h_{conv,f \rightarrow t} = \frac{Nu_f k_f}{d_t} \quad (9)$$

عدد ناسلت (Nusselt number (Nu)) نیز برای جریان لایه‌ای با استفاده از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است [22]:

$$Nu_f = 4.36 + \frac{0.086 \left(\frac{Re_f Pr_f d_t}{L_t} \right)^{1.33}}{1 + Pr_f \left(\frac{Re_f d_t}{L_t} \right)^{0.83}} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، L_t طول مشخصه لوله، Re عدد بی‌بعد رینولدز (Reynolds) و Pr عدد بی‌بعد پرانتل (Prandtl) بوده که در مرجع [23] نحوه محاسبه آن‌ها توضیح داده شده است. برای تمامی صفحات کلکتور نیز به طریق مشابه می‌توان معادلات انرژی را نوشت.

علاوه بر این، برای جریان آشفتۀ Nu_f توسط رابطه زیر ارزیابی می‌شود [24]:

$$Nu_f = \frac{\left(\frac{f}{8} \right) (Re_f - 1000) Pr_f}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr_f^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (10)$$

که در آن f ضریب اصطکاک است. علاوه بر این، f برای رژیم های جریان آشفتۀ و آرام به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$f = \frac{64}{Re_f} \quad (11)$$

$$f = \frac{1}{(0.79 \ln(Re_f - 1.64))^2} \quad (12)$$

Re_f و Pr_f به‌ترتیب اعداد رینولدز و پرانتل برای سیال خنک کننده هستند که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [25]:

$$Re_f = \frac{4\dot{m}}{\pi d_t \mu_f} \quad (13)$$

$$Pr_f = \frac{C_{p,f} \mu_f}{k_f} \quad (14)$$

همانطور که قبلاً ذکر شد، برای افزایش دقت مدل به واقعیت، فرض بر این است که عایق ایده‌آل نیست و مقداری اتلاف انرژی در اطراف وجود دارد. بنابراین، معادله انرژی عایق به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} \rho_{in} \delta_{in} C_{in} \frac{dT_{in}}{dt} &= \frac{A_{in,t}}{A_{in}} U_{cond,t \rightarrow in} (T_t - T_{in}) + \\ &\frac{A_{ab,in}}{A_{in}} U_{cond,ab \rightarrow in} (T_{ab} - T_{in}) - h_{wind} (T_{in} - T_{amb}) + \\ &\delta_{in} \nabla \cdot (k_{in} \nabla T_{in}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \rho_{pv} \delta_{pv} C_{pv} \frac{dT_{pv}}{dt} &= \alpha_{pv} \tau_g G - U_{cond,pv \rightarrow ab} (T_{pv} - T_{ab}) \\ &- U_{cond,g \rightarrow pv} (T_{pv} - T_g) - \dot{E}_{el} + \delta_{pv} \nabla \cdot (k_{pv} \nabla T_{pv}) \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه بالا τ_g ، T_{ab} و $U_{cond,pv \rightarrow ab}$ به‌ترتیب ضریب عبور شیشه، دمای صفحه جذب، ضریب هدایت (Conduction) کلی بین سلول‌های خورشیدی و صفحه جذب و نرخ الکتریسیته تولیدی بر واحد سطح سلول‌ها بوده که این نرخ تابعی از دمای سلول است که مطابق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [21]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{el} &= -K_1 \beta T_{pv} + K_2, \quad K_1 = \tau_g G \eta_0 r \\ K_2 &= K_1 (1 + 298\beta) \end{aligned} \quad (4)$$

β ، K_1 و K_2 به‌ترتیب ثوابتی هستند که بر اساس نوع سلول خورشیدی انتخابی تعیین می‌گردند و η_0 راندمان الکتریکی هر سلول در دمای مرجع می‌باشد.

در این رابطه، $A_{ab,t}$ ، A_{ab} ترتیب مساحت صفحه جذب و مساحت سطح در تماس با لوله می‌باشد. در رابطه بالا ab و $U_{cond,ab \rightarrow pcm}$ و $U_{cond,ab \rightarrow t}$ همچنین می‌باشند. برای لوله و جریان سیال نیز معادله (۵) می‌بایست حل گردند که در ادامه ارائه شده‌اند:

$$\begin{aligned} \rho_f A_f C_f dx \frac{dT_f}{dt} &= h_{conv,t \rightarrow f} P dx (T_t - T_f) \\ - \dot{m} C_f dx \frac{\partial T_f}{\partial x} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) dx \end{aligned} \quad (5)$$

بر اساس قانون اول، بازده انرژی حرارتی به‌صورت داده شده است.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{E}_{th}}{G'' A} \quad (6)$$

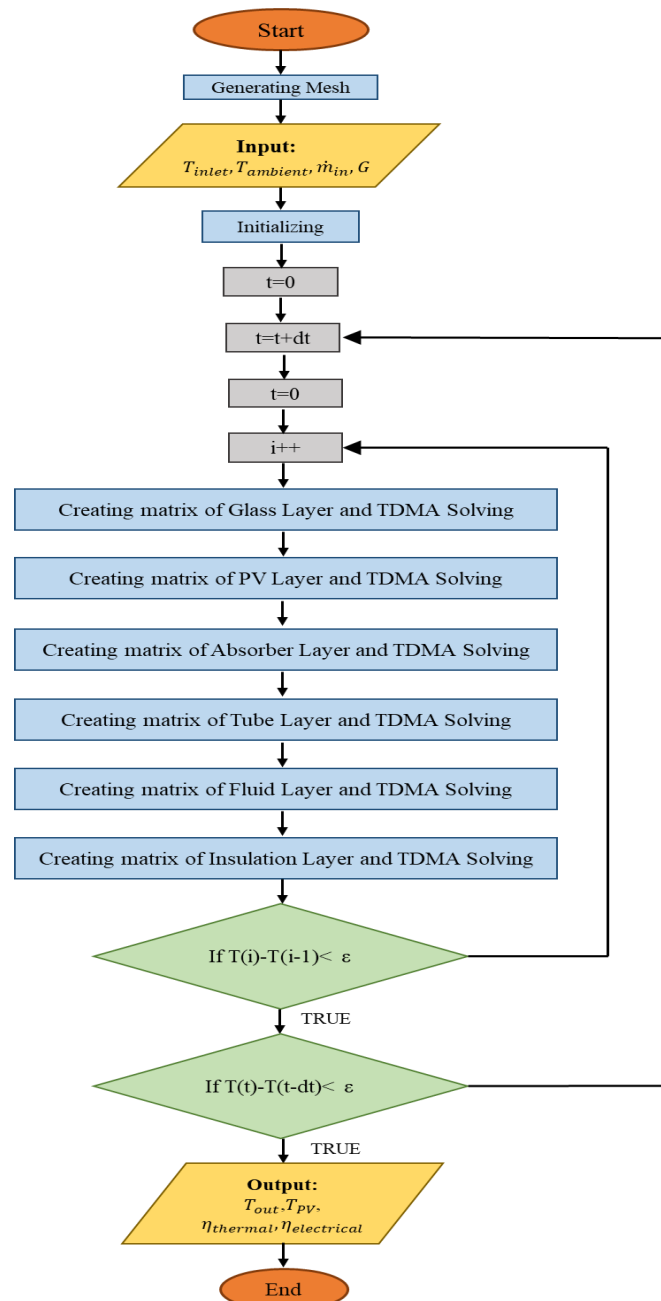
که در آن A مساحت لایه‌ها و $\dot{E}_{th}$ به توان حرارتی اشاره دارد که به شرح زیر است:

$$\dot{E}_{th} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{inlet}) \quad (7)$$

که در آن T_{inlet} و T_{out} به‌ترتیب دمای خروجی و ورودی مایع خنک کننده هستند. بازده انرژی الکتریکی صفحه PV و به طور کلی مازول به شرح زیر است.

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{E}_{elec} - P_{pump}}{G'' A} \quad (8)$$

که در آن η_{elec} ها به طور کلی الکتریکی هستند.



شکل ۸. فلوچارت مسئله

دبی جرمی و دما برای ورودی و شیب صفر برای متغیر دما در خروجی تنظیم می‌شود.

شکل (۸) نمودار جریان مسئله را نشان می‌دهد که شامل دو حلقه برای تکرار زمان و حل معادلات است. در هر حلقه، تمام معادلات به طور ضمنی با استفاده از TDMA حل می‌شوند.

اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد در طول روز

در این بخش، مقایسه‌ای بین عملکرد ماژول‌های مختلف PVT

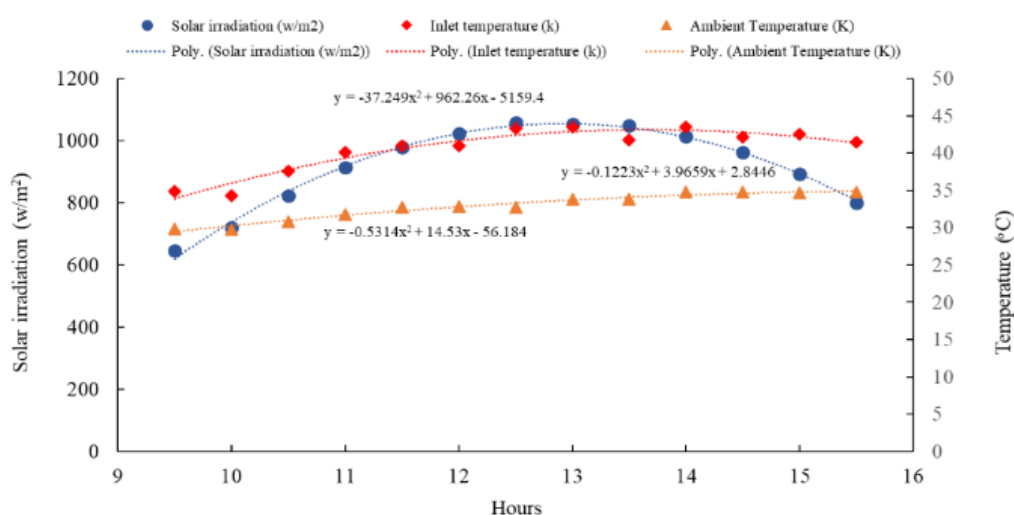
برای لایه‌های شیشه، PV، جاذب و عایق، ۹ گروه سلولی مختلف در شبیه‌سازی تعریف شده‌اند که شامل چهار گروه در لایه‌های مختلف، چهار گروه در گوشه‌های مختلف و سایر سلول‌ها در مرکز هستند. تمامی معادلات بیان شده در این بخش برای عناصر مرکزی لایه‌ها بیان شده است.

برای انواع دیگر سلول‌ها، انتقال گرمای جابه‌جایی به محیط، $h_{wind}(T - T_{amb})$ ، بر اساس مکان سلول در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای سیال خنک کننده به صورت

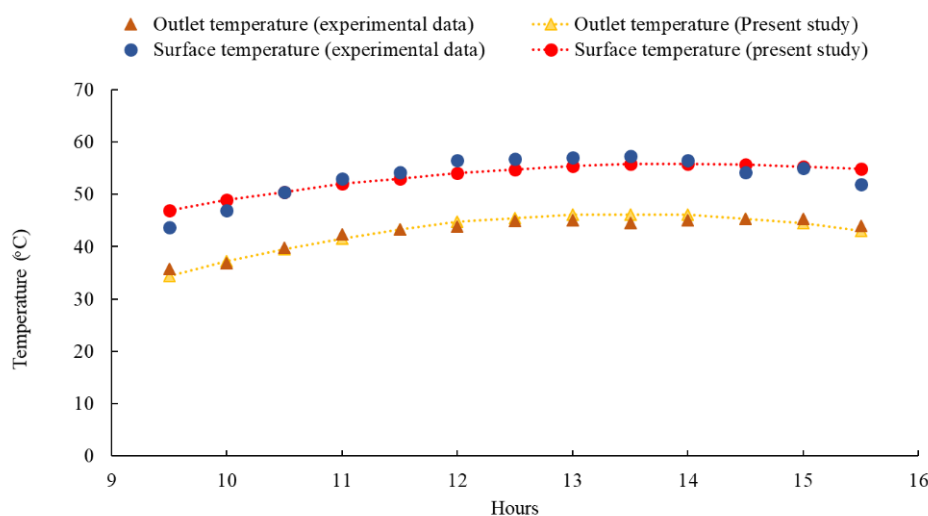
نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی صحت مدل حرارتی پیشنهادی، هم دمای خروجی و هم دمای صفحه PV پیش‌بینی شده توسط این مدل، و هم داده‌های تجربی موجود به دست آمده توسط [15] مقایسه می‌شوند. همانطور که شکل (۱۰) نشان می‌دهد، نتایج قابل قبولی بین نتایج شبیه سازی ها و داده‌های تجربی موجود [15] با میانگین خطاهای ۲٪ و ۱٫۸٪ برای صفحه PV و دمای خروجی مازول به دست آمده است. بنابراین مدل پیشنهادی از دقت و پایایی کافی برخوردار است.

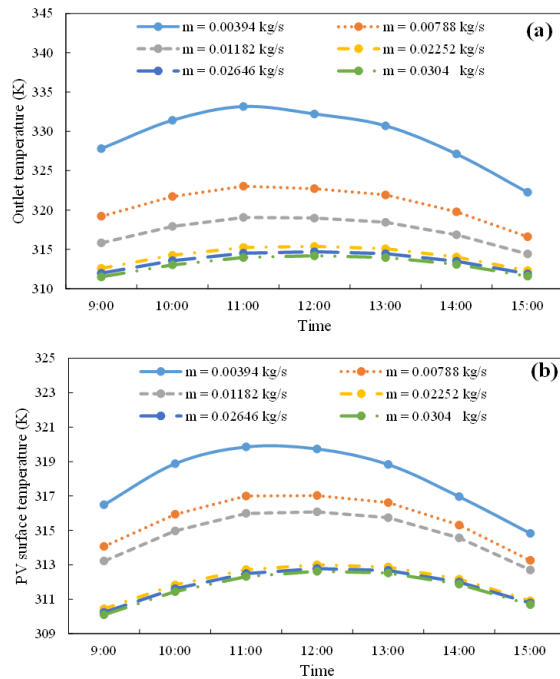
در طول روز انجام شده است. در مطالعه حاضر، داده‌های ثبت شده از طریق آزمایشی که در دانشگاه فردوسی مشهد (عرض جغرافیایی: ۳۶ درجه و طول جغرافیایی: ۵۹ درجه) در روز معمولی تابستان است، در نظر گرفته شده است [15,26]. شکل (۹) داده‌های ثبت شده خود را در طول روز از ساعت ۹:۳۰ صبح تا ۳:۳۰ بعد از ظهر را نشان می‌دهد. داده‌ها برای یافتن خطوط روند درون یابی می‌شوند. همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است، یک خط روند خطی برای دمای محیط در بازه زمانی مورد مطالعه در نظر گرفته شده است، و برای تابش خورشیدی و دمای ورودی در طول بازه زمانی، خطوط روند مرتبه دوم در



شکل ۹ داده‌های ثبت شده تجربی یک سیستم فتوولتائیک راه اندازی شده [15]



شکل ۱۰ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی فعلی با داده‌های تجربی ثبت شده توسط معاد و همکاران [15]



شکل ۱۱ نمودار های دمای خروجی و راندمان حرارتی روزانه کالکتور خورشیدی در شهر های آبادان، بصره، بغداد و تهران

سیستم های ترکیبی فتوولتائیک حرارتی/کالکتور خورشیدی

در نهایت، در این بخش، عملکرد سیستم پیشنهادی تحت شرایط آب و هوایی در چهار شهر تهران، آبادان، بغداد و بصره به مدت شش ماه از سال مورد ارزیابی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که هر چهار شهر دارای آب و هوای گرم با تابش خورشیدی و دمای محیط بالا هستند. همچنین بر اساس نتایج برای دبی جرمی (مقایسه رژیم آرام و آشفته)، دبی جرمی 0.0304 کیلوگرم بر ثانیه به دلیل برتری در ایجاد توان حرارتی و الکتریکی بالاتر برای این بخش انتخاب شده است.

ابتدا دمای خروجی سیال کار در شکل (۱۲) بین ساعت ۸:۰۰ صبح تا ۳:۰۰ بعد از ظهر بررسی شده است. روند مشابهی را می توان برای دمای خروجی در شهرهای مختلف مشاهده کرد. با توجه به شکل، حداکثر دمای خروجی را می توان در ماه جولای و به دنبال آن در سپتامبر و می به دست آورد. لازم به ذکر است که دمای خروجی به دمای محیط بستگی دارد که در مطالعه حاضر به عنوان دمای ورودی در نظر گرفته شده است. از این رو، به عنوان مثال، در جولای، تهران به دلیل دمای ورودی پایین تر، دمای خروجی کمتری تولید می کند، در حالی که آبادان به دلیل دمای ورودی بالاتر، دمای خروجی بالاتری دارد.

بحث و نتایج

بررسی عملکرد ساعتی سیستم PVT-ST تحت رژیم های آرام و آشفته

برای درک رفتار حرارتی و الکتریکی سامانه PVT-ST، توان الکتریکی و حرارتی تولید شده در یک روز معمولی جولای در تهران بررسی شده است. برای این منظور ابتدا دمای خروجی ساعتی سیال کار و دمای سطح PV مورد بحث قرار می گیرد. نتایج در شکل (۱۱) برای نرخ های جریان جرمی مختلف برای در نظر گرفتن هر دو رژیم آرام و آشفته ترسیم شده است. بنابراین برای رژیم آرام سه دبی جرمی 0.00394 ، 0.00788 و 0.01182 کیلوگرم بر ثانیه و برای رژیم آشفته سه دبی جرمی 0.02252 ، 0.02646 و 0.0304 کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل (۱۱-الف)، دمای خروجی در حدود ساعت ۱۱:۰۰ صبح برای همه نرخ های جریان جرمی به حداکثر افزایش می یابد، زمانی که سامانه مقدار بیشتری تابش خورشیدی دریافت می کند. علاوه بر این، نرخ جریان جرمی در رژیم آرام دارای دمای خروجی بالاتری نسبت به رژیم آشفته است. تنظیم ساعت ۱۱:۰۰ صبح به عنوان مبنای مقایسه، با استفاده از دبی جرمی 0.00394 کیلوگرم بر ثانیه، دمای خروجی را در حدود 333.16 کلوین فراهم می کند، که با دبی جرمی 0.01182 کیلوگرم بر ثانیه به 319.1 کلوین (با کاهش ۴٫۲ درصدی) کاهش می یابد. استفاده از جریان آشفته دمای خروجی را حتی بیشتر کاهش می دهد. با این حال، با افزایش نرخ جریان جرمی از 0.02252 به 0.0304 کیلوگرم بر ثانیه، دمای خروجی در ساعت ۱۱:۰۰ صبح تنها 0.4% کاهش می یابد. این نشان می دهد که اثر دبی جرمی بر دمای خروجی با افزایش دبی جرمی به ویژه در رژیم آشفته کاهش می یابد.

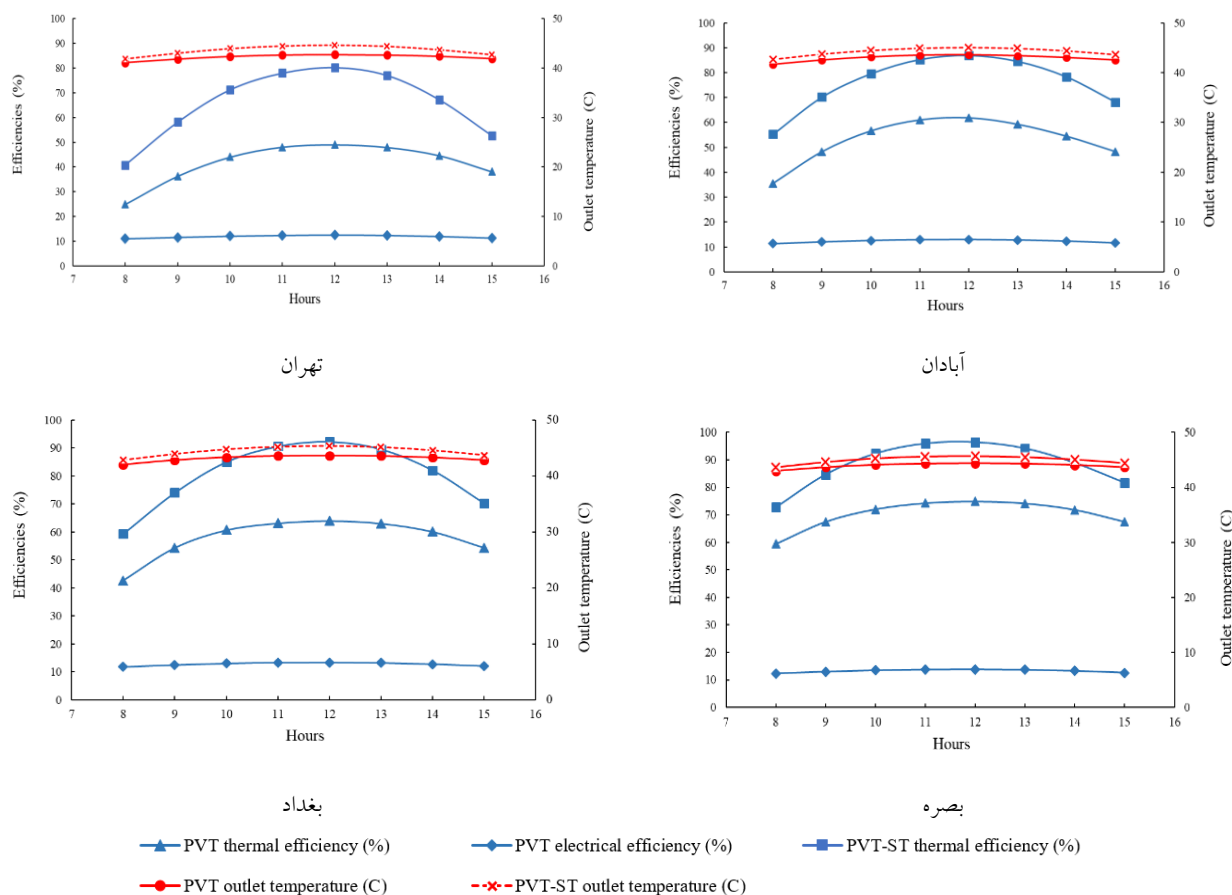
در دبی جرمی های پایین تر به دلیل ضرایب انتقال حرارت بیشتر و در نتیجه انتقال حرارت ضعیف تر از طریق لوله منجر به افزایش دمای خروجی لوله و دمای سطح PV می شود. به عنوان مثال، بالاترین دمای سطح PV متعلق به سیستمی با دبی جرمی 0.00394 کیلوگرم بر ثانیه است، در حالی که با استفاده از دبی جرمی 0.0304 کیلوگرم بر ثانیه (جریان آشفته) می توان دمای PV را نزدیک به 305.7 K کاهش داد. به طور مشابه، کاهش دمای PV در رژیم آرام بارزتر است.

دمای آب خروجی بالاتر نسبت به ماژول‌های PVT معمولی، همراه با تولید انرژی راندمان و عملکرد بهتری را دارد. به طور همزمان، سامانه PVT-ST می‌تواند مقدار قابل توجهی گرما را به عنوان مکمل جزئی برای ساختمان‌ها تولید کند.

در بررسی دمای آب ورودی می‌توان ذکر کرد که آب با دمای بالاتر انرژی حرارتی کمتری را جذب می‌کند. به عبارت دیگر، انرژی حرارتی بیشتری به سلول‌های PV هدایت می‌شود که منجر به افزایش دمای خروجی و کاهش در راندمان حرارتی می‌شود. همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، با فرض استفاده از آب داخل تانک (دمای آب ورودی را برابر با دمای محیط در نظر گرفته‌ایم)، مشاهده می‌شود شهر بصره بالاترین راندمان حرارتی را نسبت به باقی شهرها دارا می‌باشد. هرچند شدت تابش در شهر بصره به میزان قابل توجهی از باقی شهرها بیشتر است.

شکل (۱۲) تغییرات توان حرارتی و الکتریکی را بر حسب زمان در یک روز در ژانویه، مارس، مه، ژوئیه، سپتامبر و نوامبر برای (الف) تهران، (ب) آبادان، (ج) بغداد، و (د) بصره نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این رقم برای تهران، به لطف دمای بالاتر خروجی در تیرماه، حداکثر توان حرارتی در این ماه به دست آمده است. از نظر توان الکتریکی، اگرچه افزایش تابش خورشیدی سهم تولید الکتریسیته را بهبود می‌بخشد، دمای سلول PV نیز افزایش می‌یابد که منجر به کاهش تولید برق می‌شود. البته طبق شکل، این سیستم در تمامی شهرها می‌تواند حداکثر توان الکتریکی را در ماه جولای تولید کند.

به طور کلی، سیستم PVT-ST پیشنهادی می‌تواند راندمان حرارتی رضایت بخشی را در مقایسه با سایر سیستم‌ها با مساحت کل کلکتور برابر تحت شرایط کاری یکسان به دست آورد، در حالی که در تولید برق عملکردی یکسان دارند. در همین حال، سامانه PVT-ST پیشنهادی از نظر انرژی حرارتی، با

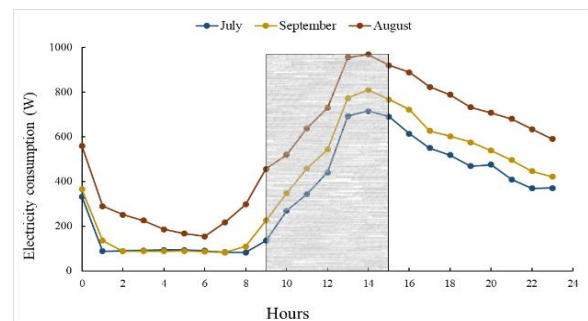


شکل ۱۲ نمودار دمای روزانه و همچنین راندمان‌های حرارتی و الکتریکی برای چهار شهر آبادان، بصره، بغداد و تهران

بررسی منزل مسکونی

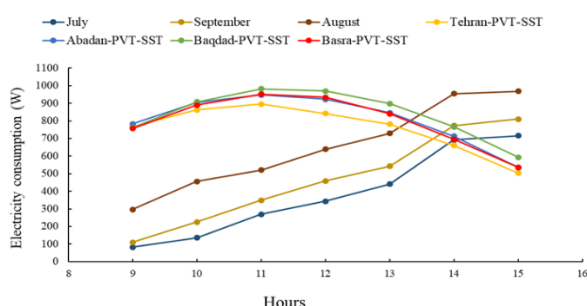
همانطور که در قسمت ۳ ذکر شد برای بررسی سیستم انرژی یک منزل مسکونی و تامین آن با سامانه ترکیبی PVT-ST، خانه‌ای به مساحت ۱۳۰ مترمربع در نظر گرفته شد است که تمامی اطلاعات مربوط به منزل مسکونی در آن قسمت توضیح داده شد. نحوه بررسی بدین صورت است که ابتدا در سه ماهه گرم سال با استفاده از نرم‌افزار Carrier میزان برق مصرفی خانه را در ساعات مختلف روز حساب کرده شکل (۱۳) و شکل (۱۴)

شکل (۱۴) سپس با استفاده از سیستم ترکیبی برای تامین برق مصرفی خانه مقایسه میکنیم. این نکته حائز اهمیت است که ساعات اوج مصرف برق یعنی ۹:۰۰ صبح تا ۱۵:۰۰ عصر مورد بررسی قرار گرفته است. توان تولیدی سیستم در ساعات مختلف متفاوت بوده به طوری این سامانه ترکیبی در اوج تابش افتاب نزدیک به ۷۷ وات برق تولید میکند. همچنین می‌توان با استفاده از روابط معادی و همکاران [27] مقدار توان حرارت تولید شده در سیستم ترکیبی را به الکتریکی معادل کرد.



شکل ۱۳ نمودار ساعتی میزان برق مصرفی در سه ماهه سرد گرم تابستان با استفاده از نرم‌افزار کریر

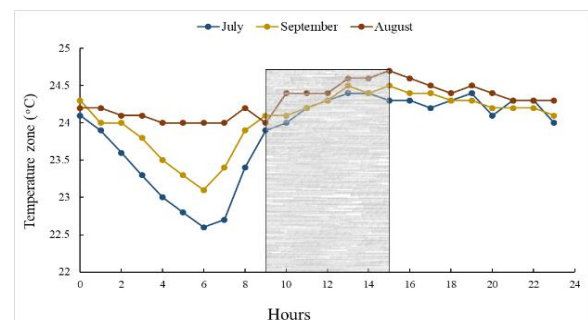
خنک سازی استفاده می‌کند. در این نوع سیستم تبخیر غیر مستقیم هوای خنک شده به طور مستقیم وارد محیط تنفس نمی‌شود بلکه با عبور از یک مبدل موجب خنک کردن هوایی می‌شود که قرار است وارد محیط سرمایش شود و جریان هوای دوم وارد منزل مسکونی می‌شود. این روش برای مناطقی مفید است که رطوبت هوا بالاست. دمای مطلوب داخل منزل مسکونی همانند سه ماهه گرم ۲۷ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۳) و شکل (۱۴) قابل مشاهده است که ماه آگوست به دلیل تابش شدید افتاب و گرمای زیاد بیشترین میزان مصرف برق را داریم. سپس با فرض ۸ سامانه موازی برای تامین برق خانه مسکونی در سه ماهه گرم سال به مقایسه توان تولیدی برق می‌پردازیم. همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود در ساعات ابتدایی روز به دلیل تابش بیشتر افتاب و عدم استفاده از سیستم‌های روشنایی میزان برق تولیدی تا قبل از ساعت ۱۳ به خوبی پاسخگوی مصرف خانگی است به‌صورتی که میتوان حتی مازاد برق تولیدی را ذخیره نمود. همچنین در ساعات ابتدایی روز به دلیل عدم استفاده از تجهیزات روشنایی میزان برق تولیدی از برق مصرفی بیشتر است و مانند قبل میتوان برق تولیدی را تا قبل از ساعت ۱۳ ذخیره نمود. اما بعد از ساعت ۱۳ در شکل (۱۵) به دلیل استفاده بیشتر از تجهیزات الکترونیکی میزان مصرف افزایش میابد به طوری که برق تولیدی توان تامین مصرف خانه را ندارد. اما همانطور که ذکر شد در ساعات ابتدایی روز به دلیل کمینه بودن میزان مصرف می‌توان برق تولیدی را ذخیره نمود و در ساعات اوج مصرف از آن ظرفیت استفاده نمود.



شکل ۱۵ نمودار ساعتی میزان برق مصرفی در سه ماهه سرد گرم برای سرمایش خانه و مقایسه آن با سیستم موازی در چهار آب و هوای مختلف

نتیجه‌گیری

این مطالعه عددی عملکرد یک سیستم خورشیدی جدید معرفی شده به نام ماژول PVT و کلکتور ST را به‌صورت سری (PVT-ST)



شکل ۱۴ نمودار ساعتی تغییرات دمای محیط خونه در سه ماه تابستان

در این قسمت به بررسی میزان برق مصرفی در سه ماهه گرم سال یعنی تابستان می‌پردازیم. در این بررسی ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر را مورد بررسی قرار دادیم. سامانه سرمایش کولر آبی می‌باشد که از روش سرمایش تبخیری غیرمستقیم جهت

۳. با مقایسه راندمان حرارتی سیستم‌های PVT-ST، تک PVT و تک ST در تیرماه در تهران، بازده حرارتی بهینه برای سیستم تک ST در دبی جرمی $0,0304$ کیلوگرم بر ثانیه و معادل $85,7$ درصد به دست آمد. توسط سیستم‌های PVT-ST و PVT به ترتیب با 78% و $72,9\%$ علاوه بر این، حداکثر بازده الکتریکی در بالاترین نرخ جریان جرمی، برابر با $12,56\%$ برای هر دو سامانه PVT-ST و PVT به دست آمد.

۴. سیستم PVT-ST با افزایش تابش خورشیدی می‌تواند آب گرم را در دمای بالاتری نسبت به سیستم PVT فراهم کند. یعنی تحت تابش زیاد، سیستم PVT-ST مزایای بیشتری دارد، اما این مزیت به تدریج با افزایش دمای آب ورودی کاهش می‌یابد.

۵. سیستم‌های ترکیبی توان تامین بیشتر برق مصرفی یک خانه مسکونی را دارند اما باید این نکته را در نظر داشت که در ساعات اوج مصرف این مقدار تولید برق پاسخگوی ظرفیت خانه نمی‌باشد که میتوان هم از برق ذخیره شده از باتری استفاده نمود و هم اینکه می‌توان کسری از کمبود برق را از شبکه شهری تامین نمود.

تقدیر و تشکر

ST) ارزیابی کرد که می‌تواند انرژی حرارتی با دمای بالا و همچنین توان الکتریکی را به طور همزمان تولید کند. بدین منظور عملکرد سامانه از نظر قوانین اول و دوم ترمودینامیک در چهار شهر ایران و عراق مورد بررسی قرار گرفت. این شهرها شامل تهران، آبادان، بغداد و بصره بودند که برای روزهای آفتابی مناسب با شدت تابش خورشیدی بالا در طول سال انتخاب شدند. علاوه بر این، اثرات رژیم سیال انتقال حرارت، از جمله رژیم‌های آرام و آشسته، بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، مقایسه‌ای بین PVT-ST و سیستم‌های PVT تک و تک ST انجام شد. یافته‌های این مطالعه به شرح زیر است:

۱. با توجه به مطالعه رژیم سیال کاری، دمای خروجی در رژیم آرام، به دلیل ضریب انتقال حرارت بیشتر و سرعت جریان جرمی، بالاتر از رژیم آشسته است. دمای سطح PV در رژیم آشسته پایین‌تر از جریان آرام است. علاوه بر این، اثر دبی جرمی بر دمای خروجی با افزایش دبی جرمی به ویژه در رژیم آشسته کاهش یافت.

۲. قدرت حرارتی با افزایش دبی جرمی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، جایی که در بالاترین تابش خورشیدی در تیرماه در تهران، با تغییر دبی جرمی از $0,0394$ کیلوگرم بر ثانیه به $0,0304$ کیلوگرم بر ثانیه، توان حرارتی از 558 به 722 وات بر متر مربع افزایش یافت.

مراجع

- [1] A. Kazemian, A. Parcheforosh, A. Salari, and T. Ma, "Optimization of a novel photovoltaic thermal module in series with a solar collector using Taguchi based grey relational analysis," *Solar Energy*, vol. 215, pp. 492-507, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.006>
- [2] S. Farah, W. Saman, and M. Belusko, "Integrating solar heating and PV cooling into the building envelope," in *Sustainability in Energy and Buildings*: Springer, vol. 22, pp. 887-901, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36645-1_79
- [3] S. Fakouriyan, Y. Saboohi, and A. Fathi, "Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production," *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 1362-1368, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.054>
- [4] Z. Han, K. Liu, G. Li, X. Zhao, and S. Shittu, "Electrical and thermal performance comparison between PVT-ST and PV-ST systems," *Energy*, vol. 237, pp. 121589, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121589>
- [5] Chandan, V. Suresh, S. Md. Iqbal, K. S. Reddy, and B. Pesala, "3-D numerical modelling and experimental investigation of coupled photovoltaic thermal and flat plate collector," *Solar Energy*, vol. 224, pp. 195-209,

2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.079>
- [6] A. Al-Salaymeh, Z. Al-Hamamre, F. Sharaf, and M. R. Abdelkader, "Technical and economical assessment of the utilization of photovoltaic systems in residential buildings: The case of Jordan," *Energy conversion and management*, vol. 51, no. 8, pp. 1719-1726, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.026>
- [7] T. Ma, H. Yang, W. Gu, Z. Li, and S. Yan, "Development of walkable photovoltaic floor tiles used for pavement," *Energy Conversion and Management*, vol. 183, pp. 764-771, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.035>
- [8] M. Li, T. Ma, J. Liu, H. Li, Y. Xu, W. Gu, and L. Shen, "Numerical and experimental investigation of precast concrete facade integrated with solar photovoltaic panels," *Applied Energy*, vol. 253, pp. 113509, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113509>
- [9] T. Ma, J. Zhao, and Z. Li, "Mathematical modelling and sensitivity analysis of solar photovoltaic panel integrated with phase change material," *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1147-1158, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.145>
- [10] L. W. Florschuetz, "Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors," *Solar energy*, vol. 22, no. 4, pp. 361-366, 1979. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90190-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90190-7)
- [11] H. A. Zondag, W. G. J. Van-Helden, M. Bakker, P. Affolter, W. Eisenmann, H. Fechner, M. Rommel, A. Schaap, H. Soerensen, and Y. Tripanagnostopoulos, "PVT roadmap. A European guide for the development and market introduction of PVT technology," 2006.
- [12] M. Valizadeh, F. Sarhaddi, and M. M. Adeli, "Exergy performance assessment of a linear parabolic trough photovoltaic thermal collector," *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 1028-1041, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.039>
- [13] A. Nahar, M. Hasanuzzaman, N. A. Rahim, and S. Parvin, "Numerical investigation on the effect of different parameters in enhancing heat transfer performance of photovoltaic thermal systems," *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 284-295, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.008>
- [14] R. Alayi, A. Kasaeian, and F. Atabi, "Thermal analysis of parabolic trough concentration photovoltaic/thermal system for using in buildings," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 38, no. 6, p. 13220, 2019. <https://doi.org/10.1002/ep.13220>
- [15] S. R. Maadi, A. Kolahan, M. Passandideh-Fard, M. Sardarabadi, and R. Moloudi, "Characterization of PVT systems equipped with nanofluids-based collector from entropy generation," *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 515-531, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.039>
- [16] M. Abdolzadeh and T. Zarei, "Optical and thermal modeling of a photovoltaic module and experimental evaluation of the modeling performance," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 277-293, 2017. <https://doi.org/10.1002/ep.12493>
- [17] Z. H. Lu, and Q. Yao, "Energy analysis of silicon solar cell modules based on an optical model for arbitrary layers," *Solar Energy*, vol. 81, no. 5, pp. 636-647, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.014>

- [18] N. Dimri, A. Tiwari, and G. N. Tiwari, "Comparative study of photovoltaic thermal (PVT) integrated thermoelectric cooler (TEC) fluid collectors," *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 343-356, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.105>
- [19] O. Rejeb, M. Sardarabadi, C. Ménézo, M. Passandideh-Fard, M. H. Dhaou, and A. Jemni, "Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system," *Energy Conversion and Management*, vol. 110, pp. 367-377, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.063>
- [20] S. R. Maadi, A. Navegi, E. Solomin, H. S. Ahn, S. Wongwises, and O. Mahian, "Performance improvement of a photovoltaic-thermal system using a wavy-strip insert with and without nanofluid," *Energy*, vol. 234, pp. 121190, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121190>
- [21] E. Skoplaki, and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Solar energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614-624, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
- [22] Z. Qiu, X. Zhao, P. Li, X. Zhang, S. Ali, and J. Tan, "Theoretical investigation of the energy performance of a novel MPCM (Microencapsulated Phase Change Material) slurry based PV/T module," *Energy*, vol. 87, pp. 686-698, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.040>
- [23] A. Kolahan, S. R. Maadi, A. Kazemian, C. Schenone, and T. Ma, "Semi-3D transient simulation of a nanofluid-base photovoltaic thermal system integrated with a thermoelectric generator," *Energy Conversion and Management*, vol. 220, pp. 113073, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113073>
- [24] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 8thth. Reading, MA: John Wiley & Sons, 2018.
- [25] W. Daungthongsuk, and S. Wongwises, "A critical review of convective heat transfer of nanofluids," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 11, no. 5, pp. 797-817, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.005>
- [26] A. Kolahan, S. R. Maadi, A. Kazemian, C. Schenone, and T. Ma, "Semi-3D transient simulation of a nanofluid-base photovoltaic thermal system integrated with a thermoelectric generator," *Energy Conversion and Management*, vol. 220, pp. 113073, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113073>
- [27] S. R. Maadi, H. Sabzali, A. Kolahan, and D. Wood, "Improving the performance of PV/T systems by using conical-leaf inserts in the coolant tubes," *Solar Energy*, vol. 212, pp. 84-100, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.011>



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 Analysis of the Obstacle Effect with Different Geometry on the Heat Transfer of Nanofluid Flow in a Rectangular Channel

Research Article

Kourosh Javaherdeh¹, Habib Karimi²

DOI: [10.22067/jacsm.2023.69607.1020](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.69607.1020)

1. Introduction

Study of increasing heat transfer is so important for influence on efficiency of heat transfer in channel. Several of increasing heat transfers are divided to three categories inactive, active and hybrid. Inactive method is based on generator of turbulence or change of flow behavior in fluid that obstacles with different geometry. This study investigated heat transfer of Nanofluid laminar flow in a channel with obstacles along different geometry such as triangular, rectangular and half-cylinder and the impact of adding Nano particles on based flow. The results showed that the average Nusselt number increased with an increasing volumetric fraction of nano-particles. However, the increasing average Nusselt number depends on the type of obstacles geometry that rectangular shape is more than others, because area of heat transfer is more than other obstacles.

2. Geometry and equations

The impact of heat transfer on two dimension channel with obstacles along different geometry such as triangular, rectangular and half-cylinder was studies. Figure 1 shows geometry of channel with obstacles.

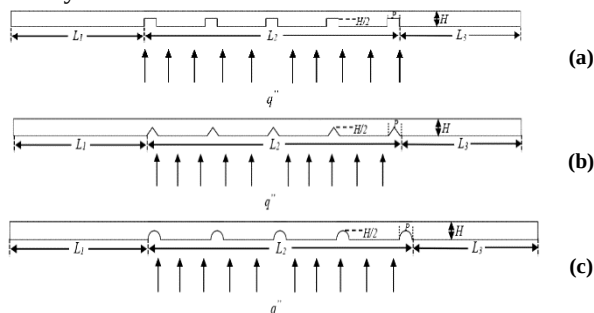


Figure 1. Channel with three obstacles

Some assumptions were considered such as incompressible fluids and laminar flow. Continuity, momentum and energy equations are expressed as finite volume for nano-fluid.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \times \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

Aluminum oxide is as nano particles. Table 1 shows the physical properties. Also, effective density ρ_{nf} , effective dynamic viscosity μ_{nf} , thermal capacity $(\rho c_p)_{nf}$ and effective thermal conductivity k_{nf} are follow :

Table 1. Physical properties of aluminium dioxide

Aluminum oxide	Based fluid	
Al_2O_3	H2O	sign
3900	1000	Density (kg/m^3)
880	4200	C_p ($J/kg \cdot K$)
42.34	0.6	Coefficient of heat transfer ($W/m \cdot K$)

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (7)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (8)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s \quad (9)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (10)$$

3. Numerical solution method

Its used constant heat flux condition for boundary condition. Also, it's assumed incompressible flow condition. Temperature of inner flow is 280 K and constant heat flux is 1000 W/m² from below wall.

The above plate, the length of the inlet and outlet of the channel are assumed to be insulated. However, it is assumed that the relative pressure of fluid is zero in outer section. For numerical study, the governing equations are solved based on finite element, steady and implicit

*Manuscript received: April 1, 2021 . Revised, November 14, 2022, Accepted, April 3, 2023.

1. Corresponding author. Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Email: javaherdeh@guilan.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of mechanical Engineering, Roudsar and Amlash branch, Islamic Azad University, Roudsar, Iran.

discretization. Moreover, simple algorithm was used to correct the relationship between velocity and pressure fields. It used non-uniform Mesh in channel, however in places close to the wall, it used smaller mesh than others for increasing computational accuracy.

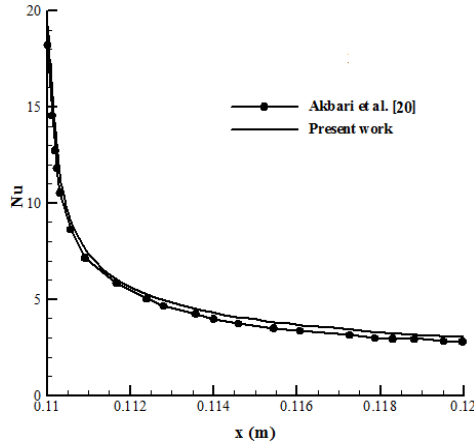


Figure 2. Nusselt number on below wall by $\phi=1.5\%$ compared with [20]

For validation, the results were compared with others. Volumetric friction is 1.5%. Figure 2 shows Nusselt number of this study compared with others.

4. Results

This research investigated the impact various obstacles and adding nano particles as an inactive method for increasing heat transfer. The vortices around of the obstacles were increased the fluid momentum transfer and coefficient of heat transfer. Nusselt number increased with the increase of Reynolds number. The maximum Nusselt number in rectangular obstacle is almost 30% more than circular obstacle. Figure 3 shows local Nusselt number in different Reynolds numbers and different inlet velocities in the volume fraction of 1% nanoparticles on walls with heat flux.

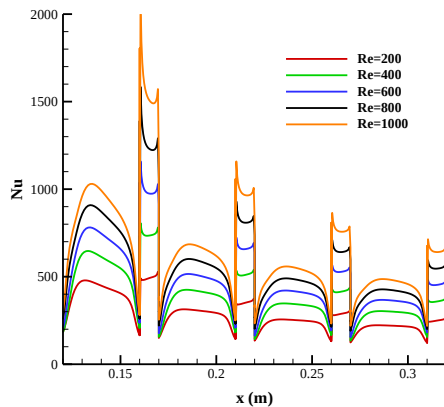


Figure 3. Nusselt number on below wall with rectangular obstacle

According to the constant flux on the below wall, it is obvious that fluid is heated from entering in the left side of the channel to exiting from the right side. Moreover, in the channel with rectangular obstacles, due to the larger Nusselt number, the fluid absorbed more heat, so the outlet temperature in the channel with rectangular obstacles is higher than the outlet temperature from the channel with positive and circular obstacles. With increasing volume fraction of nanoparticles, the average Nusselt number increased in the channel with different obstacles, because the number and surface area of the

particles in contact with the wall increased. This increasing Nusselt number in the based fluid is almost 10% more than the fluid with a volume fraction of 1%. It seems that in the place of obstacles, despite the higher volume fraction of solid nanoparticles in the based fluid, the viscosity of the fluid increases and the possibility of displacement and molecular collision of the nano-fluid decrease compared with the based fluid. Therefore, the heat transfer rate decreases and the Nusselt number is lower for nano-fluids with a higher volume fraction.

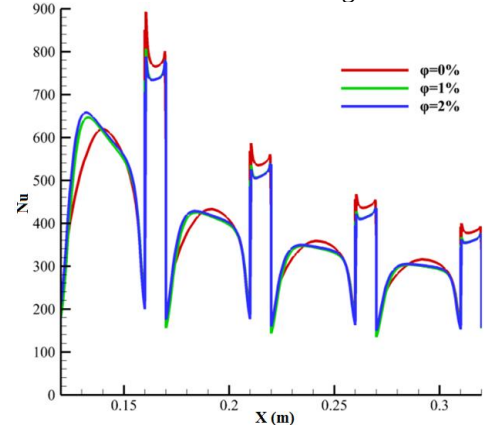


Figure 4. Nusselt number on below wall with rectangular obstacle in $Re=400$

5. Conclusion

In this study, investigated obstacle effect with different geometry on the heat transfer in the laminar flow. Moreover, the effective parameters such as Reynolds number, percentage of nanoparticles, the type of obstacle on heat transfer, and pressure drop were investigated. The most important results obtained are as follows:

1. With increasing Reynolds number, at a fixed value of the volume fraction of solid nanoparticles in the based fluid for all different arrangements of the obstacle geometry, due to the turbulence of the fluid molecules and the heat transfer received from the channel walls into the fluid, the heat transfer rate, and as a result, the Nusselt number increase.
2. With increase in the volume fraction of nanoparticles in the base fluid for a constant Reynolds number, due to the increase in the heat conduction coefficient of the nano-fluid, the rate of heat absorption from the channel walls into the fluid mass increases, and as a result, the average Nusselt number in the channel increases.
3. In the channel with rectangular obstacles, due to the increasing in the heat transfer surface compared to other obstacles, the rate of heat transfer from the channel walls to the fluid increases and as a result, the Nusselt number increases.



مطالعه عددی تاثیر موانع با هندسه متفاوت بر انتقال حرارت جریان نانوسیال در یک کانال مستطیلی*

مقاله پژوهشی

حبیب کریمی^(۱)

کوروش جواهرده^(۱)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.69607.1020

چکیده در این پژوهش به بررسی انتقال حرارت جریان نانوسیال تحت شرایط جریان آرام در کانال با موانع مختلف شامل هندسه‌های دایروی، مثلثی و مستطیلی پرداخته شده است. تاثیر موانع با هندسه متفاوت بر روی رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی در رژیم جریان آرام، تاثیر افزودن نانوذرات به سیال پایه و تغییرات عدد رینولدز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش درصد کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط در کانال با موانع متفاوت افزایش می‌یابد. این افزایش عدد ناسلت در کانال با مانع مستطیلی نسبت به دیگر موانع بیشتری بوده که به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت است، علی‌رغم آنکه ارتفاع این موانع در کانال یکسان می‌باشد. ماکزیمم عدد ناسلت در مانع مستطیلی به میزان تقریباً ۳۰٪ بیشتر از عدد ناسلت در مانع دایروی است. استفاده از موانع با هندسه متفاوت و اضافه شدن نانوذرات به سیال پایه، سبب افزایش شاخص عملکرد هیدرولیکی-حرارتی تا ۴۴٪ می‌شود.

واژه‌های کلیدی مطالعه عددی، موانع با هندسه متفاوت، نانوسیال، کانال مستطیلی.

Numerical Analysis of the Obstacle Effect with Different Geometry on the Heat Transfer of Nanofluid Flow in a Rectangular Channel

Kourosh Javeherdeh

Habib Karimi

Abstract In this study, investigated heat transfer of Nanofluid laminar flow in a channel with obstacles along different geometry such as triangular, rectangular and half-cylinder and the effect of adding Nano particles on based flow. The result showed that the average Nusselt number increased with an increasing volumetric fraction of nano particles. However, the increasing average Nusselt number is dependent on the type of obstacles geometry that rectangular shape is more than others, because area of heat transfer is more than other obstacles. The Nusselt number with rectangular geometry is 30% more than the Nusselt number with half-cylinder geometry. Also, using obstacles with different geometry and the adding of the nanoparticles, the hydraulic-thermal performance has been increased up to 44%. The local Nusselt number for nanofluid of volume fraction with 1% is 2.38% higher than volume fraction of nanofluid with 2%. The local Nusselt number of volume fraction of nano particle with 1% is 10% less than based fluid.

Key Words Numerical Study, Vortex Generator, Nanofluid, Rectangular Channel.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۰۱/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۰۱/۱۴ می‌باشد.

Email: javaherdeh@guilan.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران،

(۲) گروه مکانیک، واحد رودسر و املش، دانشگاه آزاد اسلامی، رودسر، ایران

مقدمه

بررسی روش‌های افزایش نرخ انتقال حرارت به دلیل تأثیر آن در میزان کارایی کانال‌ها و سیستم‌های انتقال حرارت از اهمیت بسیاری برخوردار است. روش‌های مختلف بهبود کنترل جریان و افزایش انتقال حرارت، به سه دسته کلی غیرفعال، فعال و ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های غیرفعال نیازمند اعمال توان خارجی نبوده و بر اساس تولید آشفتگی یا تغییر رفتار جریان در سیال ایجاد گشته که موانع با هندسه متفاوت جز این روش‌ها برای افزایش انتقال حرارت می‌باشند [1]. مانع قطعه‌ای فلزی بوده که به صورت جوشکاری و یا پرسکاری بر روی سطح کانال قرار داده می‌شود [2]. نانوسیال عبارت است از سیالاتی که با ذرات نانو به سیال پایه اضافه شده و منجر به بهبود خواص حرارتی آنان می‌شوند [3]. یکی از مسائلی که امروزه در فرآیندهای انتقال حرارت مطرح می‌شود، لزوم افزایش شار حرارتی و کوچک‌سازی تجهیزات انتقال حرارت است [4,5]. اکثر مطالعات به صورت تجربی و یا عددی بر مبنای بررسی تأثیر افزودن نانوذرات به سیال پایه [6,7] صورت گرفته است. ژای و همکاران [7] به بررسی هدایت حرارتی نانوسیال آب-سیلیکون کاربید و اتیلن گلیکول-سیلیکون کاربید پرداخته و نشان دادند که افزایش ضریب هدایت حرارتی متناسب با کسر حجمی نانوذرات جامد بوده و وابسته به سیال پایه نیست. همچنین هندسه و اندازه ذرات در انتقال حرارت تأثیر قابل توجهی دارد. ژوان و لی [8] به بررسی افزایش انتقال حرارت در جریان مغشوش در لوله‌ها پرداخته و دریافتند که ضریب انتقال حرارت در یک سرعت یکسان برای نانوسیال آب-مس با درصد حجمی ۲٪ از نانوذرات، حدود ۴۰٪ بیشتر از آب است. نتایج بررسی آن‌ها نشان دهنده افزایش فوق‌العاده‌ی عدد ناسلت نانوسیال نسبت به سیال پایه آب است، به طوری که مدل‌های تئوری مرسوم برای پیش‌بینی عدد ناسلت کارآمد نبوده و آن‌ها مدلی برای تطبیق نتایج خود ارائه کردند. وجها و داس [9] نیز به بررسی تجربی اثر هدایت حرارتی برای سه نانوذره شامل اکسید آلومینیوم، اکسید مس و اکسید روی پرداخته و نشان دادند که افزایش در هدایت حرارتی نانوسیالات در مقایسه با سیال پایه به صورت چشم‌گیر افزایش می‌یابد. آن‌ها برای نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید آلومینیوم، افزایش ۲۹٪ هدایت حرارتی را برای غلظت ۱۰٪ حجمی نانوذره مشاهده کردند. همچنین هدایت حرارتی نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید روی، ۴۸٪ افزایش نسبت

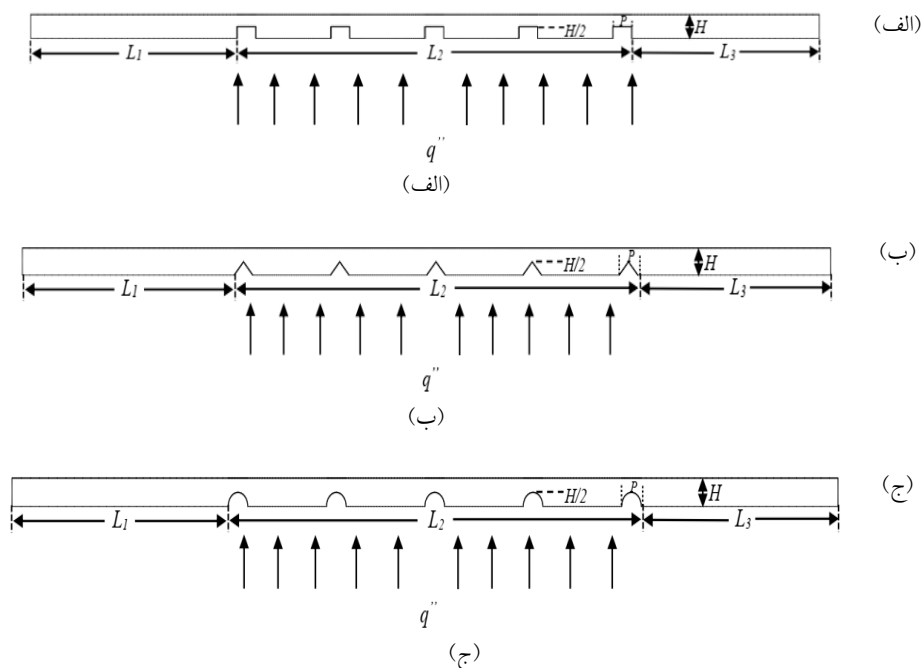
به سیال پایه برای غلظت ۷٪ حجمی نانوذره داشته است. فتوکیان و همکاران [10] افت فشار و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید مس را در داخل لوله‌ی دایروی با شرط مرزی دما ثابت برای جریان مغشوش در غلظت حجمی نانوسیال کمتر از ۰,۳٪ بررسی و نشان دادند که افت فشار جریان لزوماً با افزایش غلظت نانوذرات افزایش نمی‌یابد. همچنین، افزایش غلظت بهینه برای هر نانوسیال، انتقال حرارت بیشتر و افت فشار کمتر را سبب می‌شود. میر معصومی و بهزاد مهر [11] به بررسی عددی جابه‌جایی ترکیبی سیال آب و نانوذره اکسید آلومینیوم در یک لوله پرداختند. حقیقی و همکاران [12] به مطالعه تجربی جریان نانوسیالات مختلف در لوله پرداخته و نشان دادند که عدد ناسلت برای نانوسیال با آنچه برای سیال تک‌فازی تعریف شده مطابقت خوبی داشته و در عدد رینولدز یکسان سیال پایه انتقال حرارت کمتری نسبت به نانوسیال دارد. همچنین نشان دادند که در قدرت پمپ مساوی، نانوسیال و سیال پایه به یک میزان انتقال حرارت داشته و حتی استفاده از نانوذره تیتانیوم اکسید از ۱۶٪ کمتر است. دلاچ و همکاران [13] تأثیر استفاده از موانع در مبدل حرارتی پوسته و لوله را بر روی انتقال حرارت و افت فشار به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها اثرات زاویه‌های مانع و همچنین ارتفاع مانع بر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغییرات این پارامترها می‌تواند موجب افزایش انتقال حرارت شود اما با افزایش افت فشار همراه است. افت فشار با افزایش زاویه و ارتفاع موانع افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند که انتقال حرارت به طور قابل توجهی به هندسه و موقعیت قرارگیری موانع وابسته است. اسدی و همکارانش [14] به بررسی مدل جدیدی از موانع استوان‌های در امتداد کف کانال پرداخته و نشان دادند که بر مبنای عملکرد ترموهیدرولیکی در میکروکانال‌ها، موانع با شعاع کمتر، قابلیت انتقال حرارت بهتری دارد. ژنگ و همکاران [15] به بررسی عددی ویژگی‌های حرارتی هیدرولیکی لوله تحت شرایط شار گرمای یکنواخت با یک مانع جدید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که موانع سبب افزایش قابل توجه انتقال حرارت در لوله شده که با افزایش افت فشار همراه بوده و عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز، افزایش و با افزایش عدد پراتل کاهش می‌یابد. محققان دیگری [16,17] به شبیه‌سازی عددی چند بعدی بر روی ویژگی‌های حرارتی هیدرولیکی در یک کانال با سه نوع مانع مختلف

در این مطالعه، تاثیر موانع با هندسه‌های مختلف شامل مثلثی، مستطیلی و دایروی بر پدیده انتقال حرارت نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، به بررسی شاخص‌های هیدرودینامیکی و انتقال حرارتی در نانوسیال تحت شرایط جابه‌جایی اجباری در کانال با موانع متفاوت و تاثیر درصد کسر حجمی نانوسیال پرداخته شده تا بتوان به شرایط بهینه عملکردی در درون کانال‌ها دست یافت. همچنین، استفاده از نانوذره اکسید آلومینیوم و تاثیر درصد کسر حجمی نانوذره بر انتقال حرارت بررسی و افت فشار جریان درون کانال‌ها بررسی شد.

هندسه و خواص فیزیکی مسئله

هندسه مسئله، کانالی شامل موانع مختلف بوده که در فواصل مشخص در فضای بین دو صفحه‌ی کانال، با اندازه و هندسه‌های مختلف قرار گرفته شده است. نمایی از هندسه کلی همراه با موانع مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۱)، کانال به سه قسمت L_1 ، L_2 و L_3 تقسیم شده و شار حرارتی فقط بر L_2 وارد شده و بررسی جریان فقط در این ناحیه صورت می‌گیرد. در جدول (۱) پارامترهای مورد مطالعه به همراه مشخصات هندسی کانال ارائه شده‌اند.

پرداختند. آن‌ها تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل نوع هندسه مانع، عدد رینولدز، تعداد و زاویه‌ی قرارگیری موانع را بررسی کرده و نشان دادند که هر یک از این پارامترها، اثر قابل توجه‌ای بر عملکرد حرارتی هیدرولیکی دارد. علاوه بر این، نشان دادند که نتایج حاصل از دیدگاه اصل هم افزایی زمینه‌ای، کاهش زاویه بین سرعت و گرادیان دما از دلایل اصلی برای افزایش عملکرد انتقال حرارت است. همچنین، ولته و همکارانش [18]، الگوهای چرخشی و رتیبستی در دنباله یک مانع دارای بالچه مستطیلی شکل در لایه مرزی آشفته را با استفاده از روش سرعت سنجی تصویر ذرات به صورت تجربی به دست آوردند. شیخ الاسلامی و همکاران [19] به بررسی عددی انتقال حرارت و افت فشار سیال آب، در کانال مستطیلی با موانع متفاوت در محدوده عدد رینولدز آشفته پرداختند آن‌ها پنج نوع مانع با ارتفاع یکسان را مورد مطالعه قرار داده و مکانیزم مربوط به انتقال حرارت را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. همچنین افزایش انتقال حرارت و افت فشار با استفاده از پارامترهای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که بر اساس شاخص‌های عملکرد ترمو هیدرولیکی مانع نیم سیلندر بهترین عملکرد را داراست.



شکل ۱ شماتیک کانال همراه با موانع: (الف) مستطیلی، (ب) مثلثی، (ج) دایروی

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_f \quad (5)$$

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی نانوذر اکسید آلومینیوم [19]

ماده	سیال پایه	اکسید آلومینیوم
نشانه	H ₂ O	Al ₂ O ₃
چگالی (kg/m ³)	۱۰۰۰	۳۹۰۰
C _p (J/kg·K)	۴۲۰۰	۸۸۰
ضریب هدایت حرارتی (W/m·K)	۰٫۶	۴۲٫۳۴

که در آن ρ_{np} چگالی نانوذرات و ρ_f چگالی سیال پایه است. گرمای ویژه نانوسیال: [19]

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_{np} + (-\phi) (\rho C_p)_f \quad (6)$$

ضریب رسانایی هدایت نانوسیال [19]:

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}(T)} = 1 + 8.733\phi \quad (7)$$

شرایط مرزی

برای شرایط مرزی دیواره‌ها، شار حرارتی ثابت در نظر گرفته شده و سیال عامل، تراکم‌ناپذیر با دمای ۲۸۰ K وارد کانال شده و با دیواره پایینی کانال به طول L2 با شار حرارتی W/m² ۱۰۰۰۰ تبادل حرارتی انجام می‌دهد. صفحه بالایی، طول ورودی و خروجی کانال به صورت عایق حرارتی فرض شده است. همچنین فرض شده که سیال با فشار نسبی برابر با صفر از کانال خارج شود. شرایط مرزی مورد نظر در جدول (۳) بیان شده است.

جدول ۳ شرایط مرزی دما و جریان [20]

مرز	مؤلفه y سرعت	مؤلفه x سرعت	دما
ورودی	uy = 0	ux = U _∞	T = T _∞
خروجی	$\frac{\partial u_y}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$
صفحه بالایی	= 0uy	= 0ux	$q'' = -K \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
صفحه پایینی (طول L1)	= 0uy	= 0ux	$q'' = -K \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
صفحه پایینی (طول L2)	= 0uy	= 0ux	$q'' = -K \frac{\partial T}{\partial y} = \text{cte}$
صفحه پایینی (طول L3)	= 0uy	= 0ux	$q'' = -K \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
موانع	= 0uy	= 0ux	$q'' = -K \frac{\partial T}{\partial y} = \text{cte}$

جدول ۱ مشخصات هندسی کانال و موانع

مؤلفه هندسی		اندازه
H	ارتفاع کانال	۱۰ mm
P	ضخامت مانع	۱۰ mm
L1	طول ورودی	۱۱۰ mm
L2	طول کانال	۲۰۰ mm
L3	طول خروجی	۱۱۰ mm
	تعداد موانع گردابه	۵

معادلات حاکم

برای تحلیل جریان از مدل تک فاز استفاده شده که در این مدل، معادلات پیوستگی، ممتوم و انرژی به صورت حجم محدود برای نانوسیال بیان می‌شود. معادلات حاکم بر میدان جریان و انتقال حرارت برای نانوسیال با فرض جریان تراکم‌ناپذیر، دو بعدی، آرام و پایا به صورت زیر بیان می‌شود [10]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

انرژی:

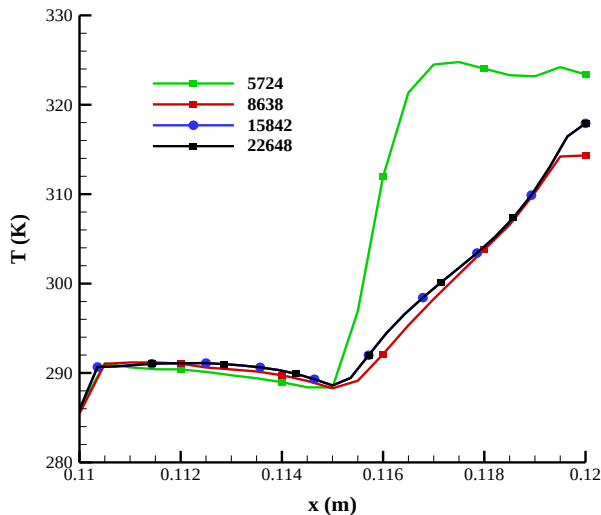
$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

در این مطالعه، نانوسیال در حالت تک فاز بررسی شده و اختلاف سرعت و دما بین سیال و ذره‌ها وجود ندارد. همچنین، از نانوذر اکسید آلومینیوم استفاده شده که خواص ترموفیزیکی آن در جدول (۲) ارائه شده است. روابط مربوط به تأثیر افزودن نانوذر به سیال پایه، شامل ویسکوزیته، چگالی، ضریب هدایت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی و گرمای ویژه برای نانوسیالات مختلف آورده شده است [19].

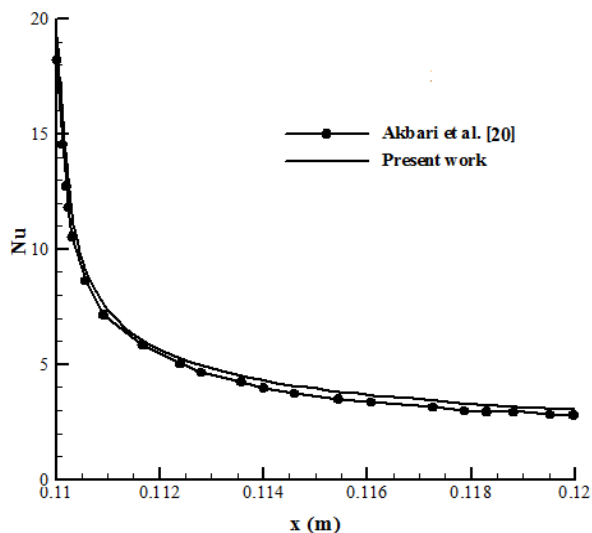
برای محاسبه ویسکوزیته نانو سیال از رابطه (۴) استفاده شده که برای نانوذرات کروی و غلظت‌های حجمی کمتر از ۵٪ به کار می‌رود [19]:

$$\mu = (1 + 2.5\phi) \mu_f \quad (4)$$

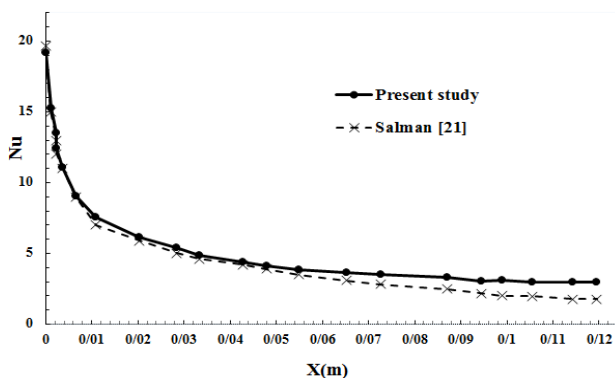
در رابطه‌ی (۴)، μ_f ویسکوزیته سیال پایه و ϕ کسر حجمی نانوذرات است. چگالی نانو سیال از رابطه (۵) بدست می‌آید: [19]



شکل ۳ بررسی استقلال شبکه برای مانع مثلثی در نانوسیال برای درصد کسر حجمی 1%، $Re = 600$



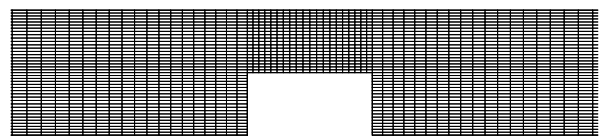
شکل ۴ عدد ناسلت موضعی روی دیواره پایین کانال (L2) برای دو عدد رینولدز در نانوسیال برای درصد کسر حجمی 1.5%



شکل ۵ عدد ناسلت موضعی در نانوسیال برای درصد کسر حجمی 1% و $Re = 90$

روش حل عددی

به منظور حل عددی، معادلات حاکم بر اساس روش حجم محدود، پایا و به صورت ضمنی گسسته سازی شده است. همچنین برای تصحیح ارتباط میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. شبکه بندی دامنه محاسباتی به صورت سازمان یافته و غیر یکنواخت می باشد. به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان های نزدیک به دیواره ها و موانع که گرادیان های شدید وجود دارد، از شبکه بندی با تراکم بیشتری استفاده شده تا نتایج مربوط به شبیه سازی در لایه مرزی دارای دقت بیشتری باشد. در شکل (۲) نمایی از شبکه محاسباتی نشان داده شده است.



شکل ۲ نمایی از شبکه محاسباتی

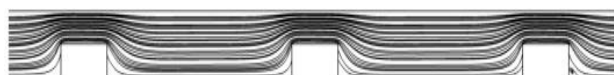
به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، دمای روی دیواره پایین کانال در بخشی با طول L2 برای کانال با مانع مثلثی به عنوان پارامتر مستقل از شبکه انتخاب شده است. همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می شود، از چهار شبکه بندی مختلف در عدد رینولدز ۶۰۰ و درصد کسر حجمی نانوذره ۱٪ استفاده شده است. با توجه به شکل (۳)، با تغییر تعداد شبکه از ۱۵۸۴۲ به ۲۲۶۴۸ تفاوت اندکی در جواب ها مشاهده می شود. بنابراین شبکه با تعداد ۱۵۸۴۲ به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به عنوان شبکه مناسب انتخاب شد. لازم به ذکر است که استقلال از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور بررسی صحت نتایج ارائه شده و اعتبارسنجی آن ها، نتایج عددی حاضر با نتایج عددی اکبری و همکاران [20] مقایسه شده که عدد ناسلت متوسط بر روی دیواره یک کانال را برای نانوسیال با درصد کسر حجمی $\phi = 1.5\%$ مورد بررسی قرار دادند. همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می شود، تطابق خوبی بین نتایج مطالعه حاضر با نتایج عددی اکبری و همکاران [20] برقرار است. همچنین نتایج حاضر با نتایج سلمان و همکاران [21] در درصد کسر حجمی نانوذرات ۱٪ نیز مقایسه شده که در شکل (۵) نشان داده می شود.

$f_{\text{non-fin}}$ و $Nu_{\text{non-fin}}$ به ترتیب عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سیال پایه در داخل یک کانال مستقیم با همان قطر هیدرولیکی می‌باشند.

تأثیر عدد رینولدز

یکی از پارامترهای مؤثر در جریان‌های جابه‌جایی اجباری، سرعت جریان ورودی سیال می‌باشد. شکل (۶) خطوط جریان برای مانع مستطیلی در فضای درون کانال برای سه عدد رینولدز متفاوت در درصد کسر حجمی نانوذره ۱٪ را نشان داده است. گردابه‌هایی موجود در اطراف مانع سبب افزایش انتقال مومنت سیال و افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به حالت کانال بدون مانع می‌گردد. همچنین، به منظور ارزیابی تأثیر مانع بر انتقال حرارت، عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف و سرعت‌های ورودی مختلف در درصد کسر حجمی نانوذره ۱٪ بر روی دیواره‌های دارای شار حرارتی (طول L_2) در شکل (۷) تا (۹) نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، با افزایش عدد رینولدز، در تمامی چیدمان‌های مختلف مانع، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) مشخص است، ماکزیمم عدد ناسلت در مانع مستطیلی به میزان تقریباً ۳۰٪ بیشتر از عدد ناسلت در مانع دایروی است. این افزایش در بیشینه عدد ناسلت موضعی در مانع مستطیلی به میزان تقریباً ۲۵٪ بیشتر از مانع مثلی است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶ خطوط جریان درون کانال با مانع مستطیلی در نانو سیال برای درصد کسر حجمی $\phi = 1\%$ در (الف) $Re=200$ ، (ب) $Re=400$ ، (ج) $Re=600$

نتایج

در این تحقیق، تأثیر موانع و اضافه نمودن نانوذره به سیال پایه به‌عنوان یک روش غیر فعال جهت افزایش انتقال حرارت در کانال‌های مسطح مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی انتقال حرارت در شرایط مختلف از کمیت‌های ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط استفاده می‌شود. پارامترهای بدون بعد در ادامه معرفی می‌شوند.

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu}, \quad Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad (۸)$$

شار حرارتی بصورت رابطه (۹) تعیین می‌شود:

$$q = \frac{\dot{m} C_p (T_i - T_o)}{\pi d_h L} \quad (۹)$$

ضریب انتقال حرارت موضعی:

$$h_x = \frac{q}{(T_w - T_b)} \quad (۱۰)$$

که در آن T_b دمای توده‌ای سیال به‌صورت موضعی در مقاطع مختلف کانال مورد بررسی می‌باشد.

عدد ناسلت:

$$Nu_x = \frac{h_x d_h}{K} \quad (۱۱)$$

که در آن h_x ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی و k ضریب هدایت حرارتی و Nu_x عدد ناسلت موضعی است. همچنین عدد ناسلت متوسط به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (۱۲)$$

ضریب اصطکاک (f) از معادله (۱۳) محاسبه شده که در آن Δp افت فشار در طول لوله، d_h قطر هیدرولیکی و u سرعت میانگین سیال در داخل کانال است.

$$f = \frac{2 \Delta p d_h}{\rho u^2 L} \quad (۱۳)$$

همچنین به منظور مطالعه همزمان میزان افزایش انتقال حرارت و ضریب اصطکاک، پارامتر ضریب بهبود عملکرد هیدرولیکی - حرارتی به‌صورت رابطه (۱۴) بیان می‌شود:

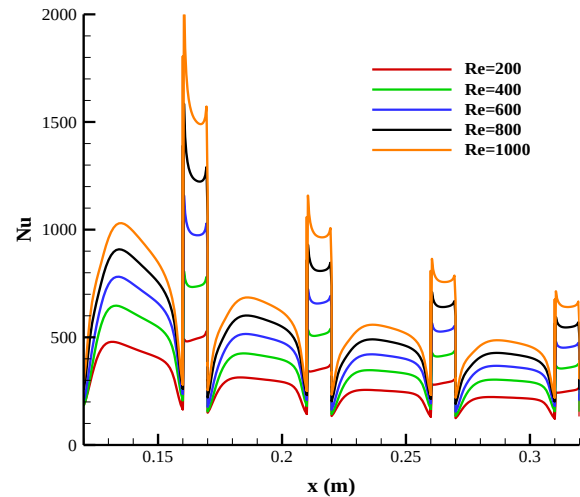
$$\eta = \left(\frac{Nu_{\text{fin}}}{Nu_{\text{non-fin}}} \right) \left(\frac{f_{\text{non-fin}}}{f_{\text{fin}}} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (۱۴)$$

که Nu_{fin} عدد ناسلت، f_{fin} ضریب اصطکاک جریان و

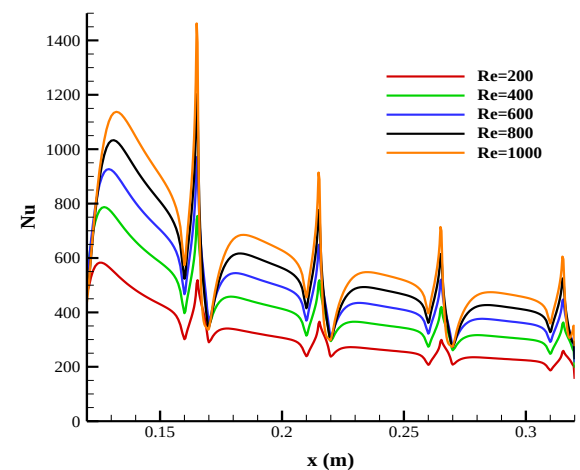
تاثیر افزودن نانوذرات بر انتقال حرارت

کانتور توزیع دما درون کانال بر حسب درصد کسر حجمی نانوذرات در عدد رینولدز ۶۰۰ برای کانال با موانع گوناگون در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به شار ثابت دیواره پایینی، بدیهی ست که سیال از ورود از قسمت چپ کانال تا خروج از قسمت راست در حال گرم شدن بوده که در کانتور دمای موجود شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) به خوبی نشان داده شده است. همچنین در کانال با موانع مستطیلی به سبب عدد ناسلت بزرگتر سیال دارای گرمای بیشتری را جذب نموده لذا دمای خروجی در کانال با موانع مستطیلی بزرگتر از دمای خروجی از کانال با موانع مثبثی و دایروی است.

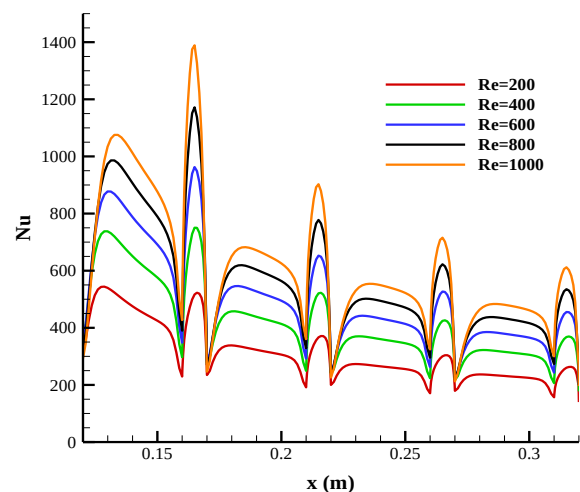
همچنین، برای نمایش تاثیر درصد کسر حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت، عدد ناسلت بر روی دیواره پایین کانال در بخشی با طول L_2 برای موانع متفاوت در اعداد رینولدز ۴۰۰ و ۸۰۰ در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با افزایش درصد کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط در کانال با موانع مختلف، افزایش می‌یابد. دلیل این امر آنست که با افزایش درصد کسر حجمی نانوذرات، تعداد و سطح ذرات در تماس با دیواره بیشتر شده و در نتیجه آن گرماگیری به طریق رسانش افزایش می‌یابد. به تبع آن انتقال گرما به درون سیال و نفوذ گرمایی بیشتر شده که در نتیجه میزان ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. میزان عدد ناسلت در کسر حجمی ۱٪ نسبت به کسر حجمی ۲٪ به میزان ۲،۳۸٪ بیشتر است. این افزایش در میزان عدد ناسلت در سیال پایه تقریباً ۱۰٪ بیشتر از سیال با کسر حجمی ۱٪ است. به نظر می‌رسد که در محل موانع با وجود کسر حجمی بالاتر نانوذرات جامد در سیال پایه، ویسکوزیته سیال افزایش یافته و امکان جابه‌جایی و تصادم مولکولی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه کمتر می‌گردد. لذا نرخ انتقال گرما نیز کاهش یافته و در نتیجه آن عدد ناسلت برای نانوسیال با کسر حجمی بالاتر، کمتر می‌باشد.



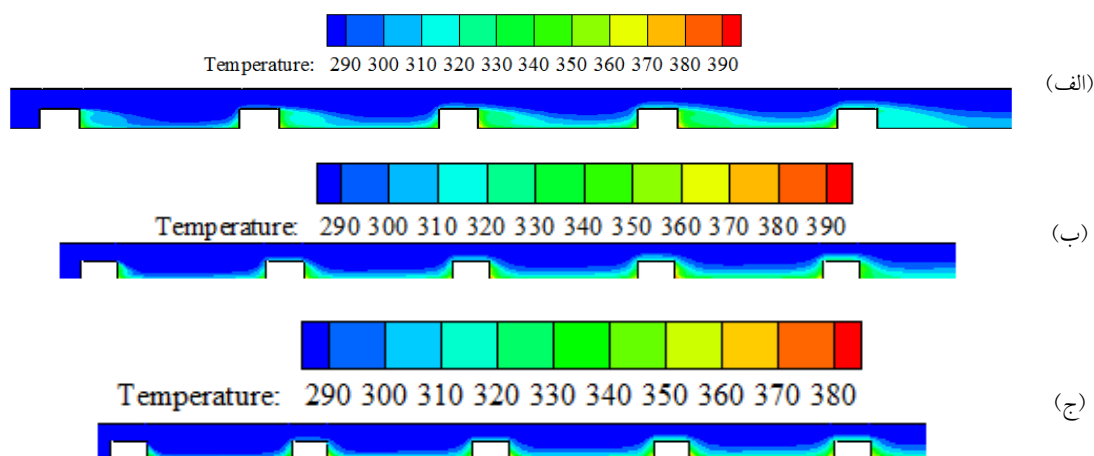
شکل ۷ عدد ناسلت موضعی روی دیواره پایینی کانال با مانع مستطیلی در نانوسیال برای درصد کسر حجمی ۱٪



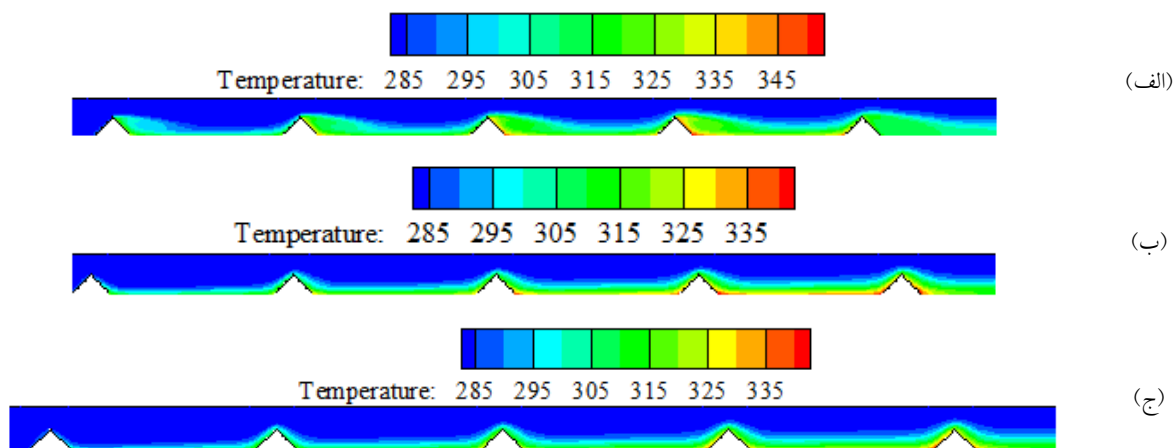
شکل ۸ عدد ناسلت موضعی روی دیواره پایینی کانال با مانع مثلثی در نانوسیال برای درصد کسر حجمی ۱٪



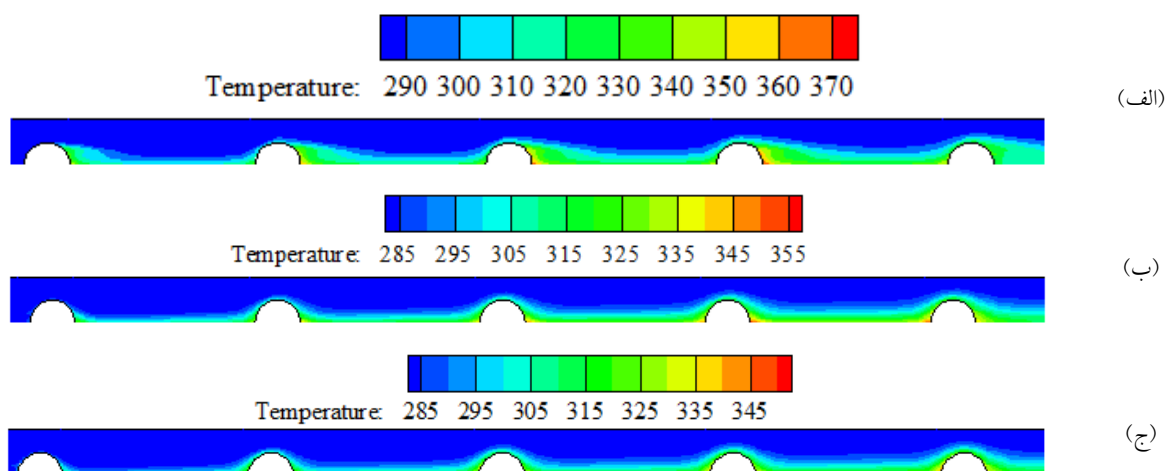
شکل ۹ عدد ناسلت موضعی روی دیواره پایین کانال با مانع دایروی در نانوسیال برای درصد کسر حجمی ۱٪



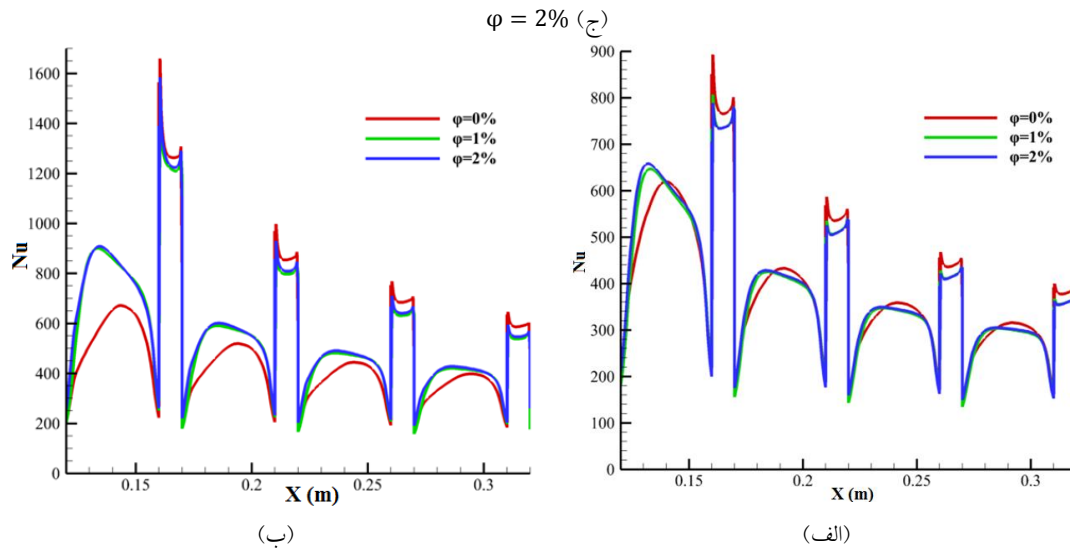
شکل ۱۰ توزیع دما بر حسب کلونین درون کانال با مانع مستطیلی در نانو سیال برای درصد کسر حجمی $Re=600$ (الف) $\phi = 0\%$ (ب) $\phi = 1\%$ (ج) $\phi = 2\%$



شکل ۱۱ توزیع دما بر حسب کلونین درون کانال با مانع مثلثی در نانو سیال برای درصد کسر حجمی $Re=600$ (الف) $\phi = 0\%$ (ب) $\phi = 1\%$ (ج) $\phi = 2\%$



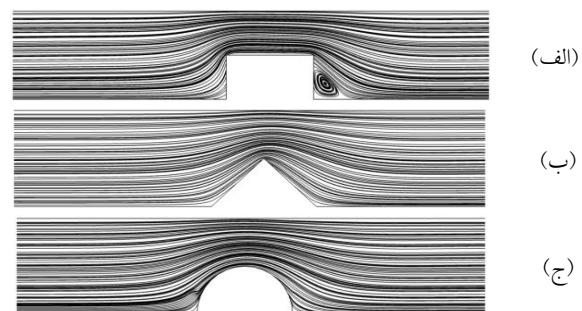
شکل ۱۲ توزیع دما بر حسب کلونین درون کانال با مانع نیم دایره‌ای در نانو سیال برای درصد کسر حجمی $Re=600$ (الف) $\phi = 0\%$ (ب) $\phi = 1\%$



شکل ۱۳ عدد ناسلت موضعی روی دیواره پایین کانال با مانع مستطیلی در طول L2 در نانوسیال برای درصد کسر حجمی مختلف: (الف) $Re=400$ ، (ب) $Re=800$

تاثیر نوع مانع با هندسه متفاوت بر انتقال حرارت

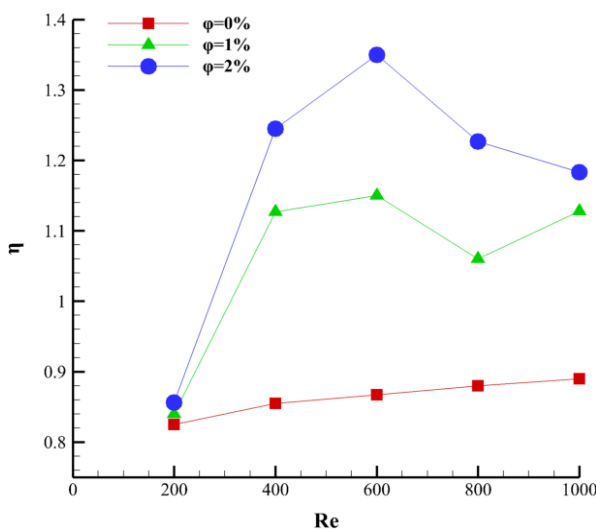
شکل (۱۴) خطوط جریان مربوط به تغییر هندسه موانع را نشان می‌دهد. بر این اساس، با تغییر نوع مانع، گردابه تولیدی در پشت مانع نیز تغییر می‌کند. اختلاف فشار جریان در پشت مانع مستطیلی نسبت به جریان اصلی بیشتر از اختلاف فشار در موانع مثلی و دایروی می‌باشد. لذا گردابه در ساین بزرگتر و محسوس‌تر در پشت مانع مستطیلی به وجود می‌آید. هر چند همه موانع به یک نسبت در محل خروج جریان در پشت مانع گردابه ایجاد می‌کنند، اما مانعی که گردابه بیشتری به علت تلاطم جریان تولید می‌نماید، می‌تواند گرماگیری بیشتری را از سطح ایجاد نماید. با توجه به شکل (۱۴) مشخص می‌گردد، مانع مستطیلی نقش ایجاد گردابه بزرگتری داشته و لذا این مانع نقش بیشتری در انتقال گرما داشته است. لذا گردابه تولید شده در پشت موانع به‌عنوان مکان کلیدی در افزایش انتقال گرما محسوب می‌گردد.



شکل ۱۴ خطوط جریان اطراف موانع در نانوسیال برای درصد کسر حجمی ۲٪ و $Re=1000$ (الف) مستطیلی، (ب) مثلثی، (ج) نیم‌دایره‌ای

ارزیابی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی

در شکل (۱۵) مقادیر شاخص عملکرد هیدرولیکی-حرارتی برای نانوسیال بر حسب عدد رینولدز برای مانع مستطیلی نشان داده شده است.



شکل ۱۵ عملکرد هیدرولیکی-حرارتی بر حسب عدد رینولدز به ازای درصد کسر حجمی نانوذرات مختلف در مانع مستطیلی

به ازای استفاده از نانوذرات، شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی-حرارتی نسبت به سیال پایه در موانع مختلف افزایش داشته است. اگرچه با افزایش عدد رینولدز از حد مشخصی، این

شاخص مقدار کمی افت می‌کند، اما همواره بزرگتر از یک بوده که نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از نانوذره و موانع با هندسه متفاوت بر افزایش انتقال حرارت درون کانال می‌باشد. بر اساس شکل (۱۵)، برای کانال با مانع مستطیلی، بزرگترین عملکرد هیدرولیکی-حرارتی برای عدد رینولدز ۶۰۰ با درصد کسر حجمی نانوسیال ۲٪، در حدود ۱/۳۶ می‌باشد. همچنین برای موانع مثلثی در درصد کسر حجمی نانوذره ۲٪ و عدد رینولدز ۸۰۰، شاخص عملکرد هیدرولیکی-حرارتی تا ۴۴٪ افزایش یافته که دلیل آن به بیشتر بودن افزایش انتقال حرارت در مقابل افزایش افت فشار به هنگام استفاده از موانع در کانال است.

نتیجه گیری

در این مطالعه، استفاده از نانوذرات و موانع با هندسه متفاوت به یک کانال مستطیلی در رژیم جریان آرام به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون عدد رینولدز، درصد نانوذرات و نوع موانع بر انتقال حرارت و افت فشار بررسی شده است. علاوه بر این، نتایج تحقیق فعلی با نتایج سایر مراجع مقایسه شده که نشان دهنده تطابق مطلوبی است. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده به‌صورت زیر می‌باشد:

۱. با افزایش عدد رینولدز، در یک مقدار ثابت کسر حجمی نانوذرات جامد در سیال پایه برای تمامی چیدمان‌های مختلف هندسه موانع، به واسطه تلاطم مولکول‌های سیال و انتقال گرمای دریافتی از دیواره‌های کانال به داخل سیال، نرخ انتقال گرما و در نتیجه عدد ناسلت افزایش می‌یابد.
۲. با افزایش درصد کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه برای یک عدد رینولدز ثابت، به علت افزایش ضریب رسانش حرارتی نانوسیال نرخ گرماگیری از دیواره‌های کانال به داخل توده سیال افزایش یافته و در نتیجه متناسب با آن عدد ناسلت متوسط در کانال نیز افزایش می‌یابد.
۳. در کانال با موانع مستطیلی به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت نسبت به دیگر موانع، نرخ انتقال گرما از دیواره‌های کانال به سیال بیشتر شده و در نتیجه عدد ناسلت نیز افزایش بالاتری دارد.
۴. استفاده از موانع با هندسه مثلثی و دایروی نسبت به مانع مستطیلی به دلیل کاهش افت فشار سیال و افزایش نسبی انتقال گرما باعث بهبود ضریب عملکرد کلی هیدرولیکی و حرارتی

کانال می‌گردد.

۵. حداکثر مقدار عدد ناسلت در مانع مستطیلی تقریباً ۳۰٪ بیشتر از عدد ناسلت در مانع دایروی است. این افزایش در حداکثر مقدار عدد ناسلت موضعی نیز برای مانع مستطیلی تقریباً ۲۵٪ بیشتر از مانع مثلثی می‌باشد. این افزایش به علت بیشتر بودن سطح انتقال حرارت مانع مستطیلی نسبت به موانع مثلثی و دایروی است، علی‌رغم اینکه ارتفاع این موانع در کانال یکسان می‌باشد.

۶. مقدار عدد ناسلت در کسر حجمی ۱٪ نانوذرات جامد در سیال پایه در مقایسه با کسر حجمی ۲٪ به میزان ۲,۳۸٪ در محل موانع بالاتر است و این افزایش در مقدار عدد ناسلت در سیال پایه تقریباً ۸٪ بیشتر از سیال با کسر حجمی ۱٪ در روی موانع است. به نظر می‌رسد که در محل موانع با وجود کسر حجمی بالاتر نانوذرات جامد در سیال پایه، ویسکوزیته سیال افزایش یافته و امکان جابه‌جایی و تصادم مولکولی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه کمتر می‌گردد. لذا نرخ انتقال گرما نیز کاهش یافته و در نتیجه آن عدد ناسلت برای نانوسیال با کسر حجمی بالاتر، کمتر می‌باشد.

فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه ($J/kg\ K$)
d_h	قطر هیدرولیکی (m)
d_p	قطر نانوذرات (m)
f	ضریب اصطکاک
H	ارتفاع کانال (m)
K	ضریب هدایت حرارتی ($W/m\ K$)
L	طول کانال (m)
Nu	عدد ناسلت
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
P	فشار (Pa)
Pr	عدد پرانتل
Pr_t	عدد پرانتل آشفتگی
q''	شار حرارتی (W/m^2)
r	شعاع الکتروود تزریق کننده (m)
Re	عدد رینولدز

مختصات	x, y	زمان (s)	t
		دما (K)	T
تقدیر و تشکر		مؤلفه سرعت (m/s)	u
		پتانسیل الکتریکی (V)	v

مراجع

- [1] S. Z. Heris, S. H. Noie, E. Talaii and J. Sargolzaei, "Numerical investigation of Al₂O₃/water nanofluid laminar convective heat transfer through triangular ducts," *Nanoscale Research Letters*, vol. 6, no. 179, 2011. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-179>
- [2] S. Javad, A. H. Muhammad, H. bahar, M. S. Khan, M. M. Janjua, and M. A. Bashir, "Internal convective heat transfer of nanofluids in different flow regimes: A comprehensive review," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 538, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122783>
- [3] M. H. Esfe, M. Bahiraei, H. Hajbarati, and M. Valadkhani, "A comprehensive review on convective heat transfer of nanofluids in porous media: Energy-related and thermos hydraulic characteristics," *Applied Thermal Engineering*, vol. 178, no. 1, pp. 115487, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115487>
- [4] S. Dutta, N. Goswami, A. K. Biswas, and S. Pati, "Numerical investigation of magnetohydrodynamic natural convection heat transfer and entropy generation in a rhombic enclosure filled with Cu-water nanofluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 136, Pages 777-798, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.024>
- [5] M.R. Daneshvar-Garmroodi, A. Ahmadpour, and F. Talati, "MHD mixed convection of nanofluids in the presence of multiple rotating cylinders in different configurations: A two-phase numerical study," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 150, pp. 247-264, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.037>
- [6] Y. Zheng, H. Yang, H. Mazaheri, and A. Aghaei, "An investigation on the influence of the shape of the vortex generator on fluid flow and turbulent heat transfer of hybrid nanofluid in a channel," *Journal of Therm Analysis and Calorimetry*, vol. 143, no. 2, pp. 1425–1438, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09415-2>
- [7] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, and F. Ai, "Thermal conductivity of suspension containing SiC particles," *Journal of materials science letters*, vol. 21, pp. 193-195, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1014742722343>
- [8] Y. Xuan, and Q. Li, "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids," *Journal of Heat transfer*, vol. 125, no. 1, pp. 151-155, 2003. <https://doi.org/10.1115/1.1532008>
- [9] R. S. Vajjha, and D. K. Das, "Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 21-22, pp. 4675-4682, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.027>
- [10] S. M. Fotukian, and M. N. Esfahany, "Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 2, pp. 214-219, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.10.003>

- [11] S. Mirmasoumi, and A. Behzadmehr, "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model," *Applied Thermal Engineerin*, vol. 28, no. 7, pp. 717–727, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.06.019>
- [12] E. B. Haghighi, A. T. Utomo, M. Ghanbarpour, A. I. T. Zavareh, H. Poth, R. Khodabandeh, A. Pacek, and B. E. Palm, "Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids in Turbulent Flow: Methods of Comparison of Their Performance," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 57, pp. 378–387, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.05.019>
- [13] B. Delac, A. Trp, and K. Lenic, "Numerical investigation of heat transfer enhancement in a fin and tube heat exchanger using vortex generators," *International Journal Heat Mass Transfer*, vol. 78, no. 11, pp. 662–669, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.027>
- [14] M. T. Al-Asadi, F. S. Alkasmoul, and M. C. T. Wilson, "Heat transfer enhancement in a micro-channel cooling system using cylindrical vortex generators," *International Communications Heat and Mass Transfer*, vol. 74, pp. 40–47, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.002>
- [15] N. Zheng, P. Liu, F. Shan, J. Liu, Z. Liu, and W. Liu, "Numerical studies on thermohydraulic characteristics of laminar flow in a heat exchanger tube fitted with vortex rods," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 100, pp. 448–456, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.09.008>
- [16] B. Lotfi, B. Sundén, and Q. Wang, "An investigation of the thermo-hydraulic performance of the smooth wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers utilizing new type vortex generators," *Applied Energy*, vol. 162, pp. 1282–1302, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.065>
- [17] E. Ebrahimnia-Bajestan, M. C. Moghadam, H. Niazmand, W. Daungthongsuk, and S. Wongwises, "Experimental and numerical investigation of nanofluids heat transfer characteristics for application in solar heat exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 92, pp. 1041-1052, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.107>
- [18] C. M. Velte, M. O. L. Hansen, and V.L. Okulov, "Multiple vortex structures in the wake of a rectangular winglet in ground effect," *Experimental Thermal Fluid Science*, vol. 72, pp. 31–39, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.10.026>
- [19] K. Javaherdeh, and H. Karimi, "Numerical analysis of mix convection of sodium alginate non-Newtonian fluid with Al₂O₃ nanoparticle in a channel with block," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 93-110, 2021. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.40042>
- [20] O. A. Akbari, D. Toghraie, A. Karimipour, A. Marzban, G. R. Ahmadi, "The effect of velocity and dimension of solid nanoparticles on heat transfer in non-Newtonian nanofluid," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 86, pp. 68-75, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.10.013>
- [21] B. H. Salman, H. A. Mohammed, and A. Sh. kherbeet, "Numerical and experimental investigation of heat transfer enhancement in a microtube using nanofluids," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 59, pp. 88–100, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.10.017>



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 Effects of CNC Milling Machine Parameters and Machining Tool Specifications on Surface Roughness of Wooden Products

Research Article

Saeed Yaghoubi¹, Farshad Rabiei² 

DOI: [10.22067/jacsm.2023.81172.1167](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81172.1167)

1. Introduction

Wood and wood-based materials have numerous applications due to their low cost, high strength and low energy consumption. In the production of wooden parts and tools, such operations as drilling, cutting and engraving are the main parts of the work, which have been performed manually by skilled craftsmen since ancient times. Nowadays, computer numerical control (CNC) process is a dominant operation in the machining industries. CNC machines are widely employed in different manufacturing processes such as plastic cutting, steel machining and wood working industries. Computer numerical control operation is strictly reined via software program and needs limited human interaction aside from initial setup and data feeding. Moreover, CNC machines are employed for exact speed and positioning control. For this reason, CNC machine is capable to manufacture complex geometries using various substances.

In order to enhance the quality of CNC machining, several criteria such as machining forces, accuracy, and surface roughness can be introduced. One of the main factors that have been investigated by many researchers is surface quality of the product. This criterion is remarkable in finishing processes of products. For this purpose, this current research examines the impact of machining parameters (feed speed, rotational speed, and step over) and tool parameters (diameter, number of cutting edge, and type of cutting edge) on the surface roughness of beech wood.

2. Experimental procedures

A 3-axis CNC machine with 6 KW spindle power and spindle speed of 32,000 rpm is used to investigate the impacts of several parameters on surface quality of wooden product. Figure 1 shows the wood CNC machine employed in this study.



Figure 1. Numerical control milling machine in the present study

The material used in this research is Beech wood with a thickness of 18 mm. It should be mentioned that the cut depth was fixed and considered to be 3 mm. Tideway brand machining tools with diameters of 3 mm, 4 mm, and 6 mm for milling operation of wood workpiece were used. To measure surface roughness of specimen, Time 3110 portable roughness meter was employed.

*Manuscript received: February 16, 2023, Revised, March 7, 2023, Accepted, April 4, 2022.

¹. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran.

² Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran.

Email: F.rabiei@ilam.ac.ir

3. Results and discussion

Figure 2 shows changes in surface roughness versus variations in tool diameter for three different types of tools (single spiral, double spiral, and straight double). This diagram shows that the surface roughness value increases with the enhancing of the tool diameter. This parameter has the maximum value for straight two-point tools and the minimum value for spiral two-point tools.

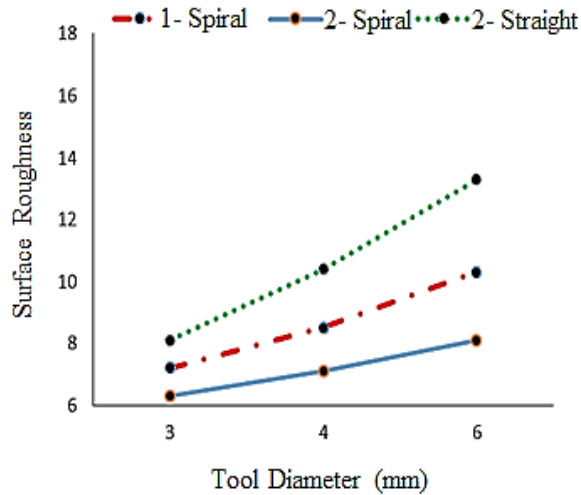


Figure 2. Surface roughness changes in relation to different conditions

4. Conclusion

This study deals with the effects of machining and tool parameters on surface roughness of beech wood. A summary of the results is as follows:

1. A tool with a double-edged spiral creates a better surface quality than a single-edged spiral tool and leads to the improvement of machining conditions;
2. By increasing the feed speed from 20 to 60 (mm/min), especially in tools with a larger diameter, the machining conditions tend towards instability and the surface roughness increases.



بررسی اثر پارامترهای دستگاه فرز CNC و مشخصات ابزار ماشین کاری بر زبری سطح محصولات چوبی*

مقاله پژوهشی

فرشاد ربیعی^(۲)سعید یعقوبی^(۱)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81172.1167

چکیده امروزه محصولات چوبی به وفور در صنعت مبلمان، تابلوهای هنری، ظروف چوبی و غیره گسترش یافته است. روش های تولید سنتی و دستی تولید این محصولات توان رقابت با روش های تولید مکانیزه، خصوصاً ماشین های کنترل عددی را ندارند. از این رو، استفاده از این دستگاه ها همواره در حال افزایش است. با این وجود، یکی از پارامترهایی که سرعت تولید را تحت تأثیر قرار می دهد، زبری سطح بوده و کارگاه ها مجبور به صرف زمان زیاد برای سنباده زنی و پرزگیری محصول هستند. به همین منظور و در تحقیق حاضر، تأثیر پارامترهای ماشین (سرعت پیشروی، سرعت دورانی و گام عرضی) و پارامترهای ابزار (قطر، تعداد لبه برشی و نوع لبه برشی) بر روی زبری سطح چوب راش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش نشان داد که ابزارهای با لبه برشی دو پر مارپیچ، نسبت به ابزارهای با لبه برشی مستقیم و یک پر مارپیچ، زبری سطح مطلوب تری دارند و ابزارهای با لبه مستقیم برای چوب راش مناسب نیستند. همچنین، مشاهده شد با کاهش گام عرضی از 0.7D به 0.3D (D قطر ابزار است)، زبری سطح کمتری ایجاد می شود. با کاهش قطر ابزار از ۶ به ۴ و ۳ میلی متر، کاهش سرعت پیشروی از ۶۰ به ۲۰ میلی متر بر دقیقه و افزایش سرعت دورانی از ۱۵۰۰۰ به ۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه، زبری سطح محصول نهایی به صورت قابل توجهی کاهش پیدا نمود.

واژه های کلیدی فرزکاری CNC، مصنوعات چوبی، تعداد لبه برشی، گام عرضی، سرعت پیشروی، سرعت دورانی.

Investigating the Effects of CNC Milling Machine Parameters and Machining Tool Specifications on Surface Roughness of Wooden Products

Saeed Yaghoubi

Farshad Rabiei

Abstract Today, wooden products are widely spread in the industry of furniture, art boards, wooden dishes, etc. The traditional and manual manufacturing methods of producing these artefacts cannot compete with mechanized production methods, especially computer numerical control (CNC) machines. Therefore, using of these devices is always increasing. Nevertheless, one of the parameters that affect the production speed is the surface roughness, and the workshops have to spend a lot of time on polishing the products. For this reason, in the present research, the effect of machine parameters (feed speed, rotational speed and transverse step) and tool characteristics (diameter, number of cutting edge and type of cutting edge) on surface roughness of beech wood has been investigated. The outcomes demonstrated that cutting tools with two spiral cutting edges have a more favorable surface roughness than cutting tools with a straight cutting edge and one spiral cutting edge, and tools with a straight edge are not suitable for beech wood. It was also observed that by reducing the transverse step from 0.7D to 0.3D, a lower surface roughness is created. By reducing the tool diameter from 6 to 4 and 3 (mm), reducing the feed speed from 60 to 20 (mm/min) and increasing the rotational speed from 15000 to 25000 (rpm), the surface roughness of final product was improved, significantly.

Key Words CNC Milling, Wooden Products, Cutting Edges Number, Step Over, Feed Speed, Rotational Speed.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۱/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۱/۱۴ می باشد.

(۱) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران



شکل ۱ یک تابلو چوبی ایجاد شده به وسیله فرز کنترل عددی

یکی از روش‌هایی که بررسی کمی و عددی کیفیت سطح را ممکن می‌سازد، اندازه‌گیری زبری سطح است. تحقیقات محدودی به‌صورت تجربی و آماری خصوصاً در چند سال گذشته در سطح کشوری و حتی جهانی در مورد پارامترهای موثر در این زمینه صورت گرفته است و عمدتاً تحقیقات در زمینه چوب‌های بومی کشور نگارنده مقاله انجام پذیرفته است [5-8]. هزیر و همکاران گزارش دادند که بسیاری از مشکلات مصنوعات چوبی ناشی از انتخاب نامناسب پارامترها بوده و انتخاب بهینه پارامترها جهت دستیابی به کیفیت سطح بهتر ضروری است [9]. آقاخانی و همکاران تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری در فرزکاری چوب پالونیا را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند که افزایش سرعت برشی باعث کاهش زبری سطح و بهبود کیفیت سطح می‌شود [10].

امروزه در صنعت چوب ایران، انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری و پارامترهای موثر بر کیفیت سطح عمدتاً بر اساس تجربه اپراتور بوده و منابع علمی بسیار محدودی در این زمینه وجود دارد. از این‌رو و در تحقیق حاضر، با توجه به اشتغال نگارنده در تولید مصنوعات چوبی و کمبود منابع علمی در زمینه ماشین‌کاری کنترل عددی موجود در کشور سعی شده است به‌صورت علمی تأثیر پارامترهای ماشین و مشخصه‌های ابزار بر روی کیفیت سطح چوب را که رایج‌ترین چوب مورد استفاده در صنعت ایران است مورد بررسی قرار گیرد.

زبری سطح

زبری سطح در صنایع چوبی با مقیاس Ra اندازه‌گیری می‌شود که نشان‌دهنده میانگین ارتفاع‌های زبری سطح است. شکل (۲) نحوه انجام تست زبری را نشان می‌دهد که پروپ

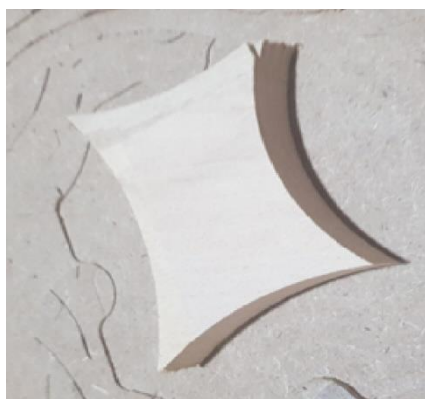
مقدمه

به واسطه در دسترس بودن چوب برای جوامع بشری، فراوری چوب و چوب‌تراشی یکی از قدیمی‌ترین صنایع تولیدی بوده است که در سازه‌ها، مبلمان، ظروف و نیز آلات موسیقی مورد استفاده قرار گرفته است [1].

با پیشرفت علم و ورود ماشین‌های ابزار به صنایع مختلف، از این تجهیزات در صنایع چوبی هم استفاده شد. در ادامه و جهت تسلط بر بازار، می‌بایست محصولات با شکل سه‌بعدی و پیچیده و با سرعت و دقت بیشتر تولید می‌شد. از این‌رو ماشین‌های ابزار با کنترل عددی کامپیوتری (Computer Numerical Control = CNC) رفته رفته جایگزین ماشین‌های ابزار سنتی شدند. این ماشین‌آلات، با استفاده از موتورهای استپ یا سروو قابلیت حرکت در چند محور به‌صورت کنترل شده را دارا بوده و از این‌رو قابلیت تولید شکل‌های پیچیده را دارند و تا حدود زیادی ساخت و تولید محصولات چوبی را تسهیل کرده‌اند. این دستگاه‌ها خصوصاً برای تولید مصنوعات با شکل پیچیده و سه‌بعدی، باعث کاهش هزینه‌های تولید، کاهش زمان تولید و نیز بهبود کیفیت سطح می‌شوند. راجا و باسکار گزارش داده‌اند که استفاده از دستگاه‌های کنترل عددی در صنعت مبلمان‌سازی باعث کاهش زمان‌های اتلافی و متعاقباً افزایش 2.5 برابری بهره‌وری شده است [2]. سوتسو و همکاران نیز کاهش هزینه‌های کارگری و بهبود کیفیت سطح را از نتایج استفاده از دستگاه‌های کنترل عددی در صنعت چوب دانسته‌اند [3].

یکی از اصلی‌ترین پارامترهایی که در تولید مصنوعات چوبی مورد توجه قرار می‌گیرد، کیفیت سطح محصول است؛ چراکه به شدت بر روی کیفیت مراحل پرداخت‌کاری نظیر پوشش‌دهی و رنگ‌کاری تأثیرگذار است. از سوی دیگر، هر چه کیفیت سطح محصول بعد از ماشین‌کاری بهتر باشد، زمان لازم برای عملیات‌های سنباده‌زنی و پرزگیری کاهش یافته و بهره‌وری مجموعه افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که بسیاری از مصنوعات هنری در صنایع مبلمان و تابلوهای هنری به‌صورت سه‌بعدی بوده و سنباده‌زنی و پرزگیری نهایی می‌بایست بسیار با دقت انجام شود که منجر به آسیب نشود (شکل ۱). از این‌رو، کیفیت سطح محصولاتی که از فرایند کنترل عددی تولید می‌شوند به‌صورت مستقیم بر روی زمان تولید نهایی، هزینه‌ای کارگری، کیفیت نهایی و عملیات‌های پرداخت نهایی (پوشش‌دهی و رنگ‌کاری) تأثیرگذار است [4].

دستگاه زبری سنج، ۸ میلی متر از سطح نمونه را طی و جاروب می کند.

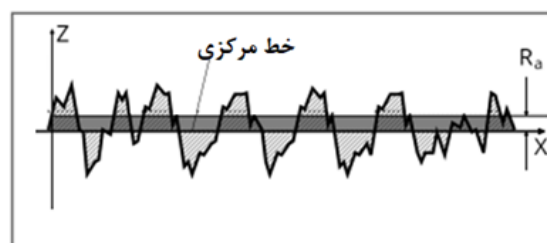


شکل ۲ نحوه اندازه گیری زبری سطح



شکل ۴ نمونه های چوب راش مورد استفاده

در این مسافت پستی و بلندی هایی وجود دارد که با اندازه گیری آن ها مقدار زبری سطح محاسبه می گردد. اگر پراکندگی پستی و بلندی ها مشابه شکل (۳) باشد خط مرکزی به گونه ای تعریف می شود که مجموع مساحت های شکل ها بالای خط با مجموع مساحت های پایین خط برابر باشند. این مقدار را می توان با مساحت یک مستطیل برابر گرفت که مقدار عرض آن مقدار زبری سطح را نشان می دهد.



شکل ۳ شماتیک زبری سطح، خط مرکزی و مفهوم زبری سطح

شرایط آزمایشگاهی

برای انجام تست های تجربی چوب راش صنعتی مورد استفاده قرار گرفت. تمامی نمونه ها به مدت یک ماه در دستگاه خشک کن قرار گرفتند و به رطوبت نسبی ۱۰ درصد رسیدند. ابعاد نمونه ها ۴ در ۶ سانتی متر هستند (که از ضایعات مراحل قبلی تولید ایجاد شده اند) (شکل ۴).

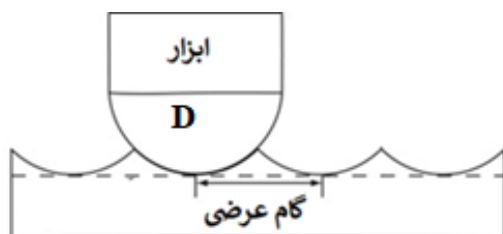
از دستگاه فرز کنترل عددی سه محور ساخت شرکت سپنتا ایران دارای اسپیندل ۶ کیلووات و سرعت دورانی ۳۲ هزار دور بر دقیقه جهت انجام تست های تجربی استفاده شد (شکل ۵).



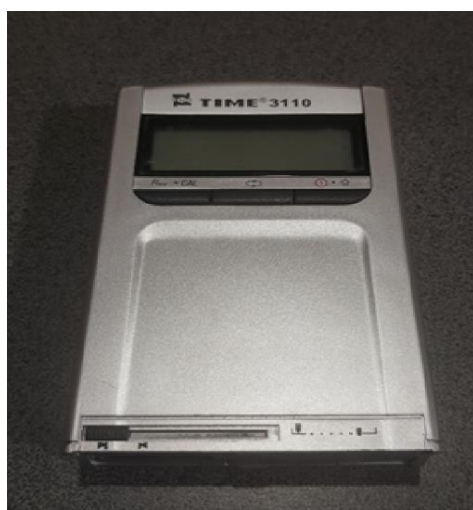
شکل ۵ دستگاه فرزکاری کنترل عددی مورد استفاده

گردید.

برای بررسی تأثیرات شش پارامتر مورد مطالعه بر روی زبری سطح، انجام تست‌ها در چهار مرحله و به صورت فول فاکتوریل مطابق جدول (۱) انجام گرفت.



شکل ۸ شماتیک مفهوم گام عرضی



شکل ۹ دستگاه زبری سنج مورد استفاده

در انجام تمامی آزمایش‌ها، جهت ایجاد شرایط یکسان، ماشین‌کاری در جهت "راه چوب" انجام گرفت (شکل ۶).

راه چوب →



شکل ۶ مفهوم راه چوب

در تمامی تست‌ها، عمق برش ثابت و برابر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ابزار مسیری با عرض ۲۰ میلی‌متر در طول ۶۰ میلی‌متر را فرزکاری می‌کند. برای انجام تست‌ها از ۹ ابزار برند Tideway ساخت ترکیه استفاده شده است. این ابزارها دارای قطرهای ۳، ۴ و ۶ میلی‌متر بوده و در سه نوع دوپر مارپیچ، تک پر مارپیچ، و دو پر مستقیم مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۷).



شکل ۷ ابزارهای ۶ میلی‌متر به ترتیب از راست به چپ: دوپر مارپیچ، تک پر مارپیچ، دو پر مستقیم

در تست‌ها از پارامتر گام عرضی استفاده شده است که به صورت درصدی از قطر ابزار (D) معرفی می‌شود (شکل ۸).

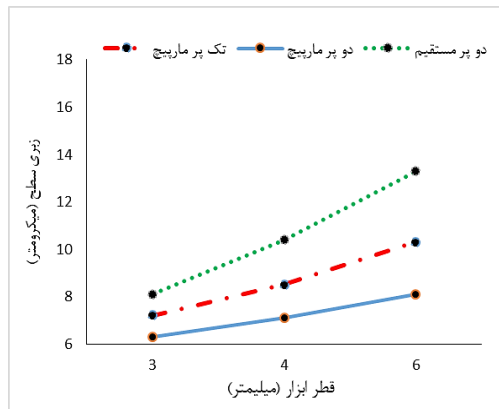
برای اندازه‌گیری زبری سطح از دستگاه زبری‌سنج پرتابل Time 3110 استفاده شد (شکل ۹). برای هر نمونه، ۵ بار تست زبری سطح با طول جاروب ۸ میلی‌متر انجام شد و پس از حذف داده‌های پرت، میانگین داده‌ها به عنوان زبری سطح ثبت

جدول ۱ روند انجام تست‌های تجربی و پارامترهای مورد استفاده

مراحل	پارامترهای مورد استفاده
مرحله اول	
عمق برش	۳ میلی‌متر
سرعت پیشروی	۲۰ و ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه
سرعت دورانی	۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه
گام عرضی	0.5D (نصف قطر ابزار در هر مرحله)
قطر ابزار (D)	۳، ۴ و ۶ میلی‌متر
شکل تیغه ابزار	تک پر ماریچ، دو پر ماریچ، دو پر مستقیم
مرحله دوم	
عمق برش	۳ میلی‌متر
سرعت پیشروی	۴۰ میلی‌متر بر دقیقه
سرعت دورانی	۱۵۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه
گام عرضی	0.5D (نصف قطر ابزار در هر مرحله)
قطر ابزار	۳، ۴ و ۶ میلی‌متر
شکل تیغه ابزار	تک پر ماریچ، دو پر ماریچ، دو پر مستقیم
مرحله سوم	
عمق برش	۳ میلی‌متر
سرعت پیشروی	۴۰ میلی‌متر بر دقیقه
سرعت دورانی	۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه
گام عرضی	0.3D و 0.7D
قطر ابزار	۳، ۴ و ۶ میلی‌متر
شکل تیغه ابزار	تک پر ماریچ، دو پر ماریچ، دو پر مستقیم
مرحله چهارم	انتخاب پارامترهای بهینه

نتایج و بحث

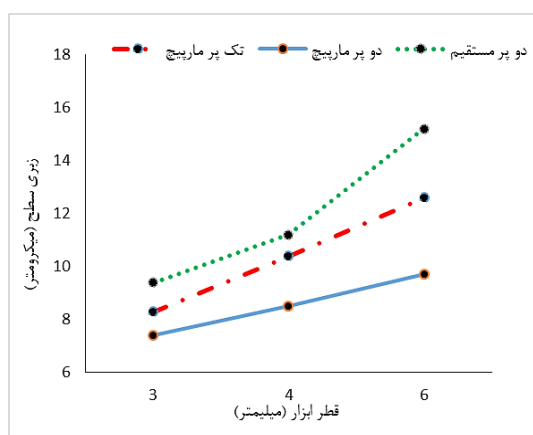
شکل (۱۰) تغییرات زبری سطح نسبت به تغییرات قطر ابزار را برای سه نوع ابزار مختلف (تک پر ماریچ، دو پر ماریچ و دو پر مستقیم) نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش قطر ابزار، مقدار زبری سطح افزایش می‌یابد و این پارامتر برای ابزارهای دو پر مستقیم دارای بیشینه مقدار و برای ابزارهای دو پر ماریچ دارای کمینه مقدار است. علت این امر را می‌توان به تغییرات نیرو و ارتعاش در ابزار نسبت داد. با افزایش قطر ابزار، مساحت درگیر ابزار با قطعه کار افزایش می‌یابد و اسپیندل نیروی بیشتری برای برش نیاز دارد. این نیرو از ابزار به چوب وارد شده و عکس‌العمل آن از چوب به ابزار وارد می‌شود. این افزایش نیرو باعث لرزش و ارتعاش ابزار شده و منجر به افزایش زبری سطح می‌شود.



شکل ۱۰ تغییرات زبری سطح نسبت به قطر و شکل‌ها مختلف ابزار، عمق برش ۳ میلی‌متر، سرعت پیشروی ابزار ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، گام عرضی 0.5D

ابزارهای دو پر ماریچ نسبت به ابزارهای دو پر مستقیم و نیز تک پر ماریچ دارای بهترین صافی سطح در تمامی قطرهای ۳، ۴ و ۶ میلی‌متر هستند. این مشاهده را می‌توان به میزان باربرداری هر لبه برشی نسبت داد. هر لبه ابزار دو پر ماریچ در هر دوران ابزار، به میزان ۱۸۰ درجه با چوب درگیر است و ۱۸۰ درجه دوم لبه دوم درگیر می‌شود و برای یک حجم ثابت براده‌برداری، هر لبه براده‌برداری نصف این حجم را بر عهده دارد؛ در حالی که در ابزار تک‌پر ماریچ، تمامی حجم براده‌برداری فقط توسط یک لبه برداشته می‌شود. با ثابت بودن سرعت دورانی مشخص می‌شود که به ازای هر دور چرخش ابزار، ابزار دو پر ماریچ، نیروی کمتری را متحمل می‌شود. از این رو می‌توان انتظار داشت که عملکرد ماشین‌کاری بهبود یابد و با کاهش نیرو و متعاقباً لرزش و ارتعاش، سطح با کیفیت‌تری از منظر زبری سطح تولید شود. از سوی دیگر این شکل تأثیر شکل لبه برشی بر زبری سطح را نیز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ابزار دو پر مستقیم علی‌رغم داشتن دو لبه برشی دارای نامطلوب‌ترین کیفیت سطح است. با بررسی شکل لبه‌های برشی می‌توان به علت این مسأله پی برد. در ابزارهای ماریچ، لبه برشی به صورت پیوسته و رفته رفته و به آرامی وارد قطعه کار می‌شود که منجر به افزایش طول درگیری لبه ابزار و قطعه کار می‌شود؛ در حالی که در ابزار با لبه مستقیم، به یک‌باره تمام لبه برشی (به اندازه ۳ میلی‌متر عمق برش) با قطعه کار درگیر می‌شود و این تماس در تمام طول مسیر برش ادامه دارد که منجر به تشدید نیروها و شرایط نامناسب ماشین‌کاری می‌گردد. لذا،

به‌طور کلی، ابزار ۳ میلی‌متر دارای کمترین زبری سطح بوده و نیز ابزار دو پر ماریچ بهترین کیفیت سطح را ایجاد کرده است. همچنین در این تست‌ها نیز ابزار با قطر ۶ میلی‌متر با دو لبه مستقیم دارای نامطلوب‌ترین کیفیت سطح است. با مقایسه دو نمودار که برای سرعت‌های دورانی ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه ترسیم شده‌اند تأثیر این پارامتر به وضوح مشخص شده است. با افزایش سرعت دورانی، تعداد چرخش هر لبه برشی در واحد زمان افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با فرض ثابت بودن سرعت پیشروی و عمق برش، ابزار در هر دوران مقدار کمتری براده برداری می‌کند. لذا، با افزایش سرعت دورانی شرایط ماشین‌کاری مطلوب‌تر شده و نیروی کمتری به ابزار وارد می‌شود. از سوی دیگر با ایجاد براده‌های ریزتر به واسطه سرعت دورانی بیشتر، ابزار دیرتر کند شده و سلامت سطح را تضمین می‌کند. با افزایش عمق برش، تأثیر این پارامتر کمتر می‌شود و ابزار با حجم براده‌برداری بیشتری مواجه شده که منجر به کاهش کیفیت سطح می‌شود.

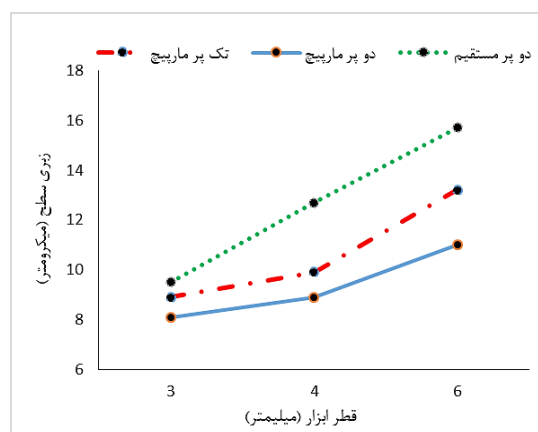


شکل ۱۲ تغییرات زبری سطح نسبت به قطر و شکل‌ها مختلف ابزار، عمق برش ۳ میلی‌متر، سرعت پیشروی ابزار ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، گام عرضی ۰.۵D

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) تغییرات زبری سطح برای قطرهای مختلف ابزار و سه نوع ابزار با لبه‌های برشی متفاوت را برای دو گام عرضی ۰.۳D و ۰.۷D نشان می‌دهد. برای مقاطعی که عرض آن‌ها از قطر ابزار بیشتر است ابزار نمی‌تواند در یک مرحله مقطع را براده برداری کند. از این‌رو برای این مقاطع، پارامتر گام عرضی به‌صورت درصدی از قطر ابزار تعریف می‌شود. همان‌طور که این دو شکل نشان می‌دهند، ابزار با قطر

این ابزارها در تمامی قطرهای ۳، ۴ و ۶ میلی‌متر دارای نامطلوب‌ترین نتایج زبری سطح هستند. به نظر می‌رسد با توجه به ماهیت پیوسته و رشته‌ای مواد در ساختار چوب راش، استفاده از ابزارهای با لبه مستقیم مناسب نباشد.

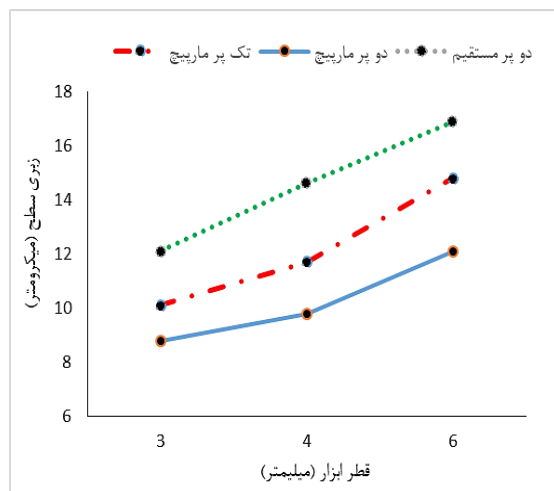
در شکل (۱۱) تغییرات برای سرعت پیشروی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. با مقایسه نتایج این شکل با شکل (۱۰) که مربوط به سرعت پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه است تأثیر این پارامتر نیز مشخص می‌شود. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در شرایط یکسان، با افزایش ۳ برابری سرعت پیشروی در تمامی آزمایش‌ها، نتایج زبری سطح افزایش یافته است. میزان این تأثیر در تست‌های مختلف متفاوت بوده و به اندرکنش پارامترها وابسته است. هر چه سرعت پیشروی بیشتر شود ابزار در زمان یکسان حجم بیشتری را براده برداری می‌کند. به عبارت دیگر، نرخ برداشت براده با افزایش سرعت پیشروی و ثابت بودن عمق برش افزایش می‌یابد. بنابراین شرایط ماشین‌کاری سخت‌تر می‌شود و ابزار می‌بایست نیروی بیشتری صرف برداشت براده کند. به همین دلیل، با افزایش سرعت پیشروی لرزش ابزار بیشتر شده و زبری سطح نامطلوب‌تری ایجاد می‌شود.



شکل ۱۱ تغییرات زبری سطح نسبت به قطر و شکل‌ها مختلف ابزار، عمق برش ۳ میلی‌متر، سرعت پیشروی ابزار ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، گام عرضی ۰.۵D

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) تغییرات زبری سطح برای قطرهای ابزار مختلف و ابزارهای با هندسه مختلف و سرعت‌های دورانی متغیر نشان داده شده است. در این شکل‌ها هم نتایج کیفی مشابهی نسبت به شکل‌ها (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود.

۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه، گام عرضی 0.3D



شکل ۱۵ تغییرات زبری سطح نسبت به قطر و شکل‌ها مختلف ابزار، عمق برش ۳ میلی‌متر، سرعت پیشروی ابزار ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه، گام عرضی 0.7D

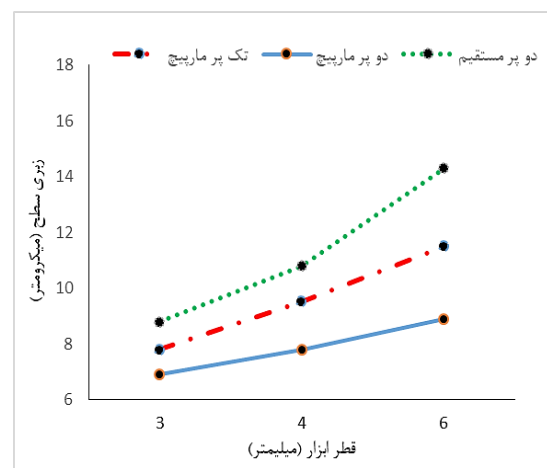
در مرحله آخر، انجام آزمایش‌ها و پس از مشخص شدن نحوه تأثیر هر پارامتر بر زبری سطح، بهینه‌ترین حالت یعنی استفاده از ابزار دو پر مارپیچ، قطر ۳ میلی‌متر، سرعت دورانی ۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه و گام عرضی 0.3D آزمایش شد و مقدار عددی زبری برابر ۵/۴ میکرومتر برای آن به ثبت رسید که کمترین زبری سطح در تمامی تست‌ها است.

نتیجه‌گیری

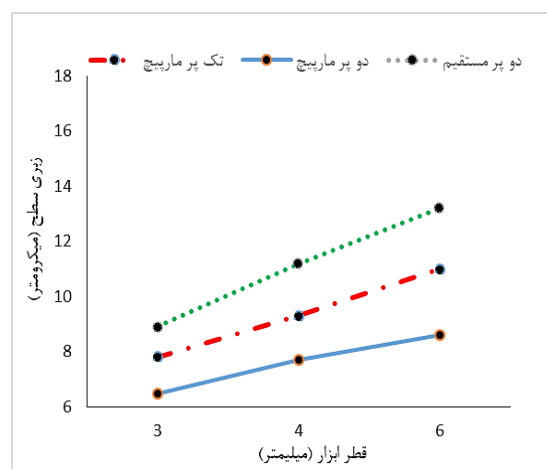
در این تحقیق، تأثیر شش پارامتر بر روی زبری سطح در فرایند فرزکاری کنترل عددی چوب راش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱. با افزایش قطر ابزار از ۳ به ۴ و ۶ میلی‌متر زبری سطح افزایش می‌یابد. این مسأله برای ابزارهای با شکل لبه متفاوت و نیز سرعت‌های پیشروی و دورانی مختلف، برقرار است.
۲. ابزار با دولبه مارپیچ نسبت به ابزار تک لبه مارپیچ از نظر زبری سطح کیفیت بهتری ایجاد می‌کند و منجر به بهبود شرایط ماشین‌کاری می‌شود.
۳. ابزار با لبه مستقیم برای برشکاری چوب راش مناسب نیست و برای تمامی تست‌ها نسبت به ابزارهای با لبه مارپیچ زبری سطح نامطلوب‌تری ارائه می‌دهد.

۳ میلی‌متر و دارای دو لبه برشی مارپیچ همچنان دارای بهترین کیفیت سطح و ابزار ۶ میلی‌متر با دو لبه مستقیم دارای بدترین کیفیت سطح است. همچنین با مقایسه دو نمودار مشاهده می‌شود کیفیت سطح با گام عرضی 0.3D، برای تمامی تست‌ها بهتر از کیفیت سطح با گام عرضی 0.7D است. در حالت کلی، هر چه گام عرضی بیشتر باشد اگرچه حجم بیشتری از ماده برداشته شده و قطعه‌کار سریعتر ماشین‌کاری می‌شود اما کیفیت سطح نامطلوب می‌گردد؛ چرا که ابزار نرخ برداشت براده بیشتری دارد و مجبور است با حجم بیشتری از مواد تماس داشته باشد. بنابراین نیروها افزایش می‌یابد و لرزش ایجاد شده در ابزار باعث افزایش زبری می‌شود.



شکل ۱۳ تغییرات زبری سطح نسبت به قطر و شکل‌ها مختلف ابزار، عمق برش ۳ میلی‌متر، سرعت پیشروی ابزار ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه، گام عرضی 0.5D



شکل ۱۴ تغییرات زبری سطح نسبت به قطر و شکل‌ها مختلف ابزار، عمق برش ۳ میلی‌متر، سرعت پیشروی ابزار ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه، سرعت دورانی

پیشروی ۲۰۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و گام عرضی ۰.۳ قطر ابزار است که مقدار عددی زبری برابر ۵/۴ میکرومتر برای آن به ثبت رسیده است.

تقدیر و تشکر

در پایان از مجموعه عوامل محترم شرکت دانش بنیان ممتاز صنعت همادیس و کارگاه تولیدی آیلارچوب بابت تمامی حمایت‌های مادی و معنوی کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۴. با افزایش سرعت پیشروی از ۲۰ به ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه خصوصاً در ابزارهای با قطر بزرگتر، شرایط ماشین‌کاری به سمت ناپایداری می‌گراید و زبری سطح افزایش می‌یابد.

۵. با افزایش سرعت دورانی از ۱۵۰۰۰ به ۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه کاهش زبری سطح مشاهده می‌شود.

۶. با افزایش گام عرضی از ۰.۳D به ۰.۷D، اگرچه نرخ برداشت ماده بیشتر می‌شود اما زبری سطح افزایش می‌یابد.

۷. کمترین زبری سطح مربوط به ابزار دو پر ماریچ، قطر ۳ میلی‌متر، سرعت دورانی ۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت

مراجع

- [1] A. A. Krimpenis, N. A. Fountas, T. Mantziouras, and N. M. Vaxevanidis, "Optimizing CNC wood milling operations with the use of genetic algorithms on CAM software," *Wood Material Science & Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 102-115, 2014.
<https://doi.org/10.1080/17480272.2014.961959>
- [2] S. Bharathi Raja, and N. Baskar, "Particle swarm optimization technique for determining optimal machining parameters of different work piece materials in turning operation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 8, pp. 445-463, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2958-y>
- [3] A. Sutcu, and U. Karagoz, "The influence of process parameters on the surface roughness in aesthetic machining of wooden edge-glued panels (EGPs)," *BioResources*, vol. 8, no. 4, pp. 5435-5448, 2013.
- [4] A. A. Krimpenis, and M. Chrysikos, "3D parametric design and CNC manufacturing of custom solid wood electric guitars using CAD/CAM technology," *Wood Material Science & Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 66-80, 2019.
<https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1379035>
- [5] H. Pelit, M. Korkmaz, and M. Budakç, "Surface roughness of thermally treated wood cut with different parameters in CNC router machine," *BioResources*, vol. 16, no. 3, pp. 5133-5147, 2021.
- [6] M. Sedlecký, M. Kvietková, and R. Kminiak, "Medium-density fiberboard (MDF) and edge-glued panels (EGP) after edge milling-surface roughness after machining with different parameters," *BioResources*, vol. 13, no. 1, pp. 2005-2021, 2018.
- [7] H. Pelit, and Ö. Yaman, "Influence of processing parameters on the surface roughness of solid wood cut by abrasive water jet," *BioResources*, vol. 15, no. 3, pp. 6135-6148, 2020.
- [8] A. Jankowska, "Understanding of surface roughness of wood based on analysis its structure and density," *Annals of WULS Forestry and Wood Technology*, vol. 111, pp. 27-31, 2020. doi: 10.5604/01.3001.0014.6421)
- [9] E. Hazir, and K. H. Koc, "Optimization of wood machining parameters in CNC routers: Taguchi orthogonal array based simulated angling algorithm," *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 21, no. 4, pp. 493-510, 2019.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000406>
- [10] M. Aghakhani, A. Khazaeian, and M. Madhoshi, "Different CNC machining condition of paulownia wood by CNC; Influence on the abbott roughness parameters," *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, vol. 28, no. 2, pp. 301-312, 2013. (In persian). <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2013.2935>

Investigating the Impacts of Moving Surface on NACA 0012 Airfoil in High Speed Ratio

Research Article

H. Abolghasemi Golafshani¹, Mohammad Javad Amiri², E. Roohi³ 

DOI: [10.22067/JACSM.2023.77061.1124](https://doi.org/10.22067/JACSM.2023.77061.1124)

Introduction

Since the introduction of the concept of boundary layer and its separation by Prandtl, researchers have been trying to control the boundary layer and prevent its separation. Since the flow separation starts from the boundary layer, the purpose of flow control is to control the boundary layer. Flow control is an important issue to improve the performance of flying devices. In this philosophy, flow separation is prevented by transferring energy to the boundary layer and keeping it close to the wall. A moving surface tries to do this in two ways: Minimizing the relative motion between the surface and the free stream, it prevents the initial growth of the boundary layer and injects energy into the existing boundary layer. Magnus studied the force produced by the rotation of a body moving in a fluid and used its effect to build a ship with a vertically rotating cylinder that replaced the sail, and since then this effect has been named the Magnus effect.

This research used the research geometry of Sahu et al. The speed of the moving surface is determined based on its ratio with the free flow speed and is expressed as the speed ratio. In other studies, the speed ratio for the moving surface is low. The purpose of this study is to investigate the effect of moving surfaces in high-speed ratios. We would like to investigate the effect of this increase in speed, so we increase the speed at a certain rate. Therefore, in this research, the impact of a circular cylinder on the leading edge of the NACA 0012 airfoil at the speed ratio of 5, 10, 15, and 20 on the lift and drag coefficients is investigated. This investigation is two-dimensional and K- ω SST turbulence model is employed. Moreover, according to Sahu et al., the free flow speed is 1 meter per second, the flow pressure is 101,325 Pa, the flow temperature is 298 K, and the length of the airfoil's chord is 1 meter.

2. Numerical setup

The desired airfoil is NACA 0012 with a chord length of 1 meter, and a circular cylinder with a diameter of 0.1 chord length and a distance of 0.001 chord length is placed on the leading edge of the airfoil. The mesh is structured and boundary layer network in such a way that y^+ becomes less than one or at most one. Also, the size of the computing space in the front, top and bottom directions is considered to be 10 times the length of the chord, and at the end 20 times the chord

length of the airfoil. At the rotating edge and near the surface of the airfoil, the mesh is finer due to its sensitivity and greater impact on the results. ANSYS FLUENT software was used for numerical simulation. A pressure-based solver was chosen because the Mach number was less than 0.3 and the density was constant. For the rotating part, we used mesh motion and applied the desired speeds.

3. Results

What can be seen at first glance from Figure 1 is the great impact of the moving surface placed on the airfoil's leading edge. The drag force coefficient has decreased with the increase of the speed ratio. With the increase of the speed ratio, not only the drag coefficient decreases, but also the propulsive force is created. From the speed ratio of 10 and above, the drag coefficient is negative, which indicates the creation of propulsive force. Another advantage of the moving surface, as expected, is the prevention of flow separation. By increasing the speed ratio to 20 and increasing the energy injected into the boundary layer, the flow separation has been completely prevented.

The reason for creating the propulsive force (negative drag in Figure 1-b) can be found in the contribution of the pressure drag to the total drag and drawing of the pressure coefficient on the surface. This research is done for an angle of attack of 24 degrees. As it is clear from Table 1, in the case of an airfoil without a moving surface, the pressure drag has a more dominant contribution than the frictional drag, so it is possible to ignore the frictional drag. But by using the moving surface at the leading edge of the airfoil, at a speed ratio of 5, the pressure drag significantly reduced and became less than the frictional drag. The frictional drag, however, is increased, which is the result of the increase in the speed of the boundary layer flow due to the injection of energy into the boundary layer by the moving surface. As Table 1 shows, not only is there no pressure drag, but its amount is negative, which indicates the creation of propulsive force. Although the frictional drag increases with the increase in the speed ratio, the pressure drag becomes more negative, which causes the total drag to become negative. So the propulsive force created is due to negative pressure drag.

*Manuscript received: June 6, 2022. Revised, August 17, 2022, Accepted, April 18, 2023.

¹. MSc., Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

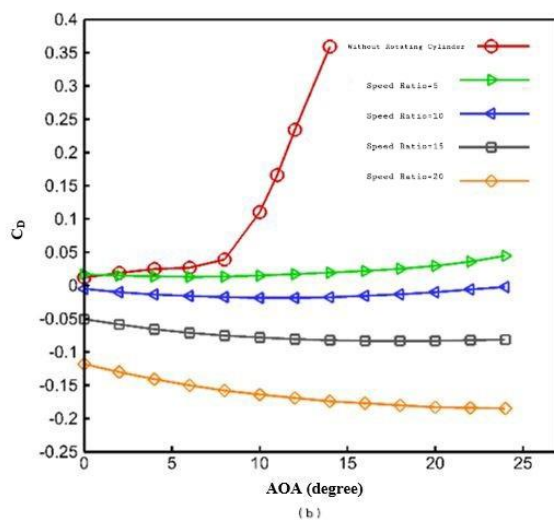
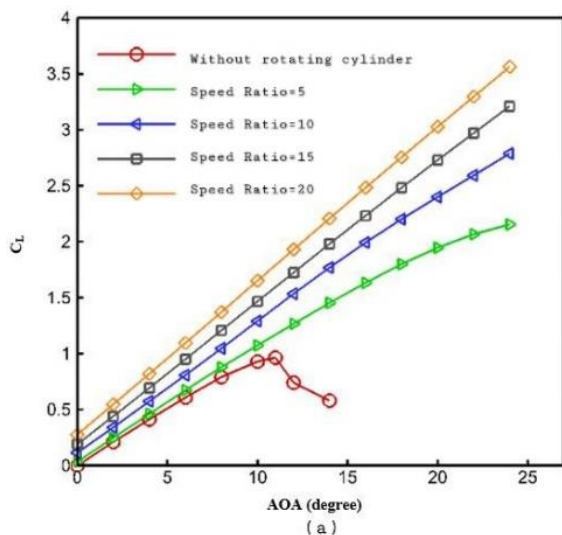
². BSc., Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

³. Corresponding author. Professor, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Email: e.roohi@um.ac.ir

Table 1. Total, pressure, and frictional drag coefficients

Drag type	Total drag	Pressure drag	Frictional drag
Without rotating cylinder	0.7736	0.7724	0.0012
Speed ratio of 5	0.0447	-0.0116	0.0331
Speed ratio of 10	-0.0023	-0.0734	0.0711
Speed ratio of 15	-0.0812	-0.1939	0.1127
Speed ratio of 20	-0.185	-0.342	0.157

**Figure 1. Lift and drag coefficients on an airfoil without a moving surface and with a moving surface at different speed ratios a) Lift coefficient b) drag coefficient**

4. Conclusion

The use of a moving surface prevents flow separation and airfoil stalling. It increases lift and reduces drag. The higher the speed ratio, the better its aerodynamic effect. As the speed ratio increases, the energy injected into the boundary layer increases, and the flow separation is delayed. As a result, the back pressure caused by the separation of the flow is greatly reduced. Among the examined modes, the speed ratio of 20 at the angle of attack of 24 degrees with a drag coefficient of 3.564 and a drag coefficient of -0.185 has the most favorable aerodynamic performance.

The most crucial achievement of this research is the negative drag coefficient. The negative drag coefficient is a sign of creating a propulsive force. The source of the propulsive force created is negative pressure drag. In the high-speed ratio, the above results are obtained, and since lower speed ratios were investigated in other articles, such results have not been reported so far, and this is the main difference between the current research and previous research.

In general, it can be stated that the use of a moving surface in the form of a rotating cylinder placed at the leading edge of the NACA 0012 airfoil at high speeds has significantly improved the aerodynamic performance of the airfoil, and the moving surface itself can be used as an airplane propulsion engine.



بررسی اثر سطح متحرک بر ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در نسبت سرعت بالا*

مقاله پژوهشی

حسن ابوالقاسمی گل افشانی^(۱) محمد جواد امیری^(۲) احسان روحی^(۳) 

DOI: 10.22067/JACSM.2023.77061.1124

چکیده طراحی و توسعه ایرفویل‌هایی با کارایی بالا برای پیشرفت صنعت هوانوردی از اهمیت اساسی برخوردار است. در زاویه‌های حمله بزرگتر، نیروی برآ بیشتر و باند پرواز کوتاه‌تر حاصل می‌شود. اما در زاویه حمله بالا، پدیده جدایش جریان رخ می‌دهد به طوری که بعد از زاویه واماندگی جریان به طور کامل از سطح بالای بال جدا شده و افت شدید برآ و افزایش پسا را به همراه دارد. در این پژوهش تلاش شده با استفاده از سطح متحرک در نسبت سرعت‌های بالا بر روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲، از جدایش جریان جلوگیری و با افزایش نیروی برآ و کاهش نیروی پسا، عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ بهبود یابد. منظور از نسبت سرعت، نسبت سرعت سطح متحرک به سرعت جریان آزاد است. در این پژوهش از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت و همچنین مدل آشفتگی $k-\omega$ -SST با الگوریتم حل سیمپل استفاده شده است و شبیه‌سازی به صورت دوبعدی انجام شده است. نوع گسسته‌سازی معادلات به صورت پیش فرض بوده و در ابتدا از حل گر فشار مبنا استفاده شده است. استفاده از سطح متحرک به صورت یک استوانه دوار در لبه حمله ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در نسبت سرعت‌های بالا علاوه بر جلوگیری از جدایش جریان و افزایش برآ، پسا را منفی کرده که نشان از ایجاد نیروی پیشران دارد. از بین تمامی حالات شبیه‌سازی شده، نسبت سرعت ۲۰ در زاویه حمله ۲۴ درجه با ضریب برآ ۳/۵۶۴ و ضریب پسا -۰/۱۸۵، مطلوب‌ترین عملکرد آیرودینامیکی را داشته است.

واژه‌های کلیدی جدایش جریان، سطح متحرک، ناکا ۰۰۱۲، کنترل جریان، برآ، پسا.

Investigating the Effect of Moving Surface on NACA 0012 Airfoil in High Speed Ratio

Hasan Abolghasemi Golafshani

Mohammad Javad Amiri

Ehsan Rouhi

Abstract The design and development of high-performance airfoils is essential for the development of the aviation industry. At larger angles of attack, higher lift and shorter flight bands are achieved. But at high angle of attack, the phenomenon of flow separation occurs so that after the stall angle, the flow is completely separated from the upper surface of the wing, resulting in a sharp drop in lift and drag increase. In this study, an attempt has been made to prevent the separation of flow by using the moving surface in the ratio of high velocities on NACA 0012 airfoil and to improve the aerodynamic performance of NACA 0012 airfoil by increasing the lift force and reducing the drag force. The velocity ratio means the ratio of the moving surface velocity to the free flow velocity. This research was performed by numerically in two dimensions using Ansys Fluent and $k-\omega$ -SST turbulence model with SIMPLE algorithm. The use of a moving surface in the form of a rotating cylinder at the leading edge of the NACA 0012 airfoil at a high speed ratio, in addition to preventing current separation and increasing the lift, has negatively affected the drag, which indicates its propulsive force contribution. Of all the simulated states, the velocity ratio of 20 at attack angle of 24 with a lift coefficient of 3.564 and a drag coefficient of -0.185 had the most favorable aerodynamic performance.

Key Words Flow Separation, Moving Surface, NACA 0012, Flow control, Lift, Drag.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۲/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۵/۸ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) کارشناس، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) نویسنده مسئول، استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

از زمان معرفی مفهوم لایه مرزی و نحوه جدایش آن توسط پرندل (Prandtl)، محققان در تلاش برای کنترل لایه مرزی و جلوگیری از جدایش آن می‌باشند. از آنجایی که جدایش جریان از لایه مرزی شروع می‌شود، پس هدف از کنترل جریان، کنترل لایه مرزی است. به دلیل مضر بودن پدیده جدایش و اتلاف زیاد انرژی، کنترل جریان یک امر مهم در جهت بهبود عملکرد وسایل پرنده است. در این فلسفه با انتقال انرژی به لایه مرزی و نگه داشتن آن نزدیک به دیواره با استفاده از روش‌ها و وسایلی مانند: مکش فعال، مکش غیر فعال، دمش، ایجاد حفره در سطح، مولد گردابه، زبری، شکل دادن به لبه حمله، انتقال حرارت، برانگیختگی صوتی، پلاسما و دیواره متحرک از جدایش جریان جلوگیری می‌شود.

یک سطح متحرک تلاش می‌کند تا از دو طریق این کار را انجام دهد: با به حداقل رساندن حرکت نسبی بین سطح و جریان آزاد از رشد اولیه لایه مرزی جلوگیری و انرژی را به لایه مرزی موجود تزریق می‌کند. نیوتن احتمالاً اولین کسی بود که عملکرد کنترل لایه مرزی را در مسیر توپ در حال چرخش مشاهده کرد، اگرچه اساس کارایی کاملاً شناخته نشده بود. تقریباً ۲۰۰ سال بعد، مگنوس (Magnus) نیروی تولید شده توسط گردش جسم در حال حرکت در سیال را مورد مطالعه قرار داد و از اثر آن برای ساخت کشتی با استوانه چرخان عمودی که جایگزین بادبان بود استفاده کرد و از آن به بعد این اثر به اثر مگنوس نام‌گذاری شده است [1]. استفاده از اثر مگنوس در مهندسی توسط سیفرت (Seifert) خلاصه شده است [2]. گلدشتاین اصل کنترل لایه مرزی را با استفاده از یک سیلندر چرخان در لبه جلویی یک صفحه صاف نشان داد [1].

با این حال، عملی‌ترین کاربرد یک سطح متحرک برای کنترل لایه مرزی توسط فاور (Favre) نشان داده شد. وی با استفاده از یک ایرفویل با سطح بالایی که توسط یک کمر بند روی دو غلتک حرکت می‌کرد، توانست جدایی را به تأخیر بیاورد تا اینکه زاویه حمله واماندگی به ۵۵ درجه برسد، جایی که حداکثر ضریب بالابر $3/5$ در آن محقق شده است [3].

مودی (Modi) و همکاران ویژگی‌های آیرودینامیکی تعدادی از ایرفویل‌های دارای سیلندرهای چرخان به عنوان سطوح متحرک را بررسی کردند. تحقیقات آنها حاکی از آن است که

استفاده از یک سیلندر چرخان در لبه پیشرو می‌تواند حداکثر ضریب بالابر را تا $2/73$ افزایش دهد و همچنین زاویه حمله واماندگی (Stall) را تا ۴۸ درجه به تأخیر اندازد [4,5,6].

استریکوفسکی (Strykowski) و سreenivasan (Sreenivasan) با قرار دادن مناسب سیلندر کنترل نزدیک استوانه اصلی، جریان اطراف سیلندر دایره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند می‌توانند ریزش گرداب آن را در طیف وسیعی از عدد رینولدز بین ۴۰ تا ۱۰۰ کنترل کنند [7]. همچنین مودی یک مقاله مروری در مورد کنترل لایه مرزی توسط سطح متحرک بر روی ایرفویل‌ها ارائه داد و اثرات موقعیت‌های مختلف عناصر چرخاننده مورد استفاده برای تزریق انرژی به لایه مرزی را مقایسه کرد [1]. گارنی (Garni) و همکاران از یک سیلندر چرخان در لبه حمله ایرفویل به عنوان یک سطح متحرک بر روی ایرفویل ناکا ۰۰۲۴ استفاده کرده که می‌تواند ضریب برآ را از $0/85$ به $1/63$ افزایش دهد و زاویه واماندگی را تا حدود 160% به تأخیر اندازد [8].

جریان گذشته از یک سیلندر استوانه‌ای با دو سیلندر کنترل دوار، توسط میتال (Mittal) به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. وی تأثیر فاصله بین سیلندر اصلی و کنترلی را بررسی کرد و دریافت که این فاصله یک پارامتر مهم در بدست آوردن عملکرد بهینه سیستم کنترل جریان است [9]. همچنین پاتنایک (Patnaik) و وی (Wei) برای سرکوب گردابه‌ها در پشت یک استوانه با سطح مقطع نیم دایره‌ای از طرح تزریق ممتنم زاویه‌ای با استفاده از سطح متحرک برای یکنواخت سازی میدان سرعت استفاده کردند [10]. ساهو (Sahu) و همکاران از یک سطح چرخان واقع در قسمت جلوی یک ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ برای تزریق انرژی و ممتنم به لایه مرزی استفاده کردند [11]. سلیمی پور (Salimipour) و سلیمی پور به صورت عددی اثرات مکان-های سطح متحرک بر روی قدرت و ضریب پسا و حالت ریزش گردابه‌ها در پشت یک سیلندر دایره‌ای را با چند سرعت در جریان آرام بررسی کردند. همچنین دریافتند که برخی از سطوح متحرک ضریب پسا و نیاز کل قدرت حرکت سیستم را کاهش می‌دهند [12]. همچنین آسی (Assi) و همکاران به کنترل جریان اطراف سیلندر استوانه‌ای با استفاده از هشت استوانه مدور کوچک در اطراف سیلندر اصلی در رینولدز ۱۰۰ پرداختند [13]. سلیمی پور و یزدانی به بررسی و بهینه‌سازی مکان و سرعت سطح متحرک بر روی ایرفویل توربین باد $S809$ پرداخته و تأثیر سطح متحرک

بر ضرایب برآ، پسا و توان توربین باد را بررسی کرده‌اند [14].

در پژوهش حاضر از هندسه پژوهش ساهو و همکاران [11] استفاده شده است. سرعت سطح متحرک براساس نسبت آن با سرعت جریان آزاد تعیین و با نام نسبت سرعت بیان می‌شود. در پژوهش ساهو و همکاران سطح متحرک در نسبت سرعت‌های زیر چهار بررسی شده‌است. همچنین در دیگر پژوهش‌ها نیز نسبت سرعت برای سطح متحرک پایین می‌باشد. هدف این مقاله بررسی اثر سطح متحرک در نسبت سرعت بالا است و می‌خواهیم تاثیر این افزایش سرعت را بررسی کنیم پس سرعت را با نرخ مشخصی افزایش می‌دهیم. بنابراین در این پژوهش به بررسی اثر یک استوانه مدور با قطر ۰/۱ طول وتر در لبه حمله (Leading Edge) ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در نسبت سرعت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ بر روی ضرایب برآ و پسا پرداخته شده‌است. این بررسی به‌صورت دوبعدی و عددی با مدل آشفتگی K ω -SST (Shear Stress Transport) انجام می‌شود. همچنین بر اساس پژوهش ساهو و همکاران سرعت جریان آزاد ۱ متر بر ثانیه، فشار جریان ۱۰۱۳۲۵ پاسکال، دمای جریان ۲۹۸ کلوین و طول وتر ایرفویل ۱ متر می‌باشد.

معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی و حل عددی هر جریانی باید مشخصات جریان و معادلات مربوط به آن مشخص باشد تا شبیه‌سازی دقیق و کم هزینه انجام پذیرد. سرعت جریان آزاد ۱ متر بر ثانیه و نسبت سرعت سطح متحرک ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ می‌باشند که ماخ (Mach) جریان در همه موارد کمتر از ۰/۳ خواهد بود. پس با فرض تراکم‌ناپذیر (Incompressible) بودن و لزج بودن جریان، معادلات حاکم بر جریان که برای شبیه‌سازی کافی هستند، معادلات بقا جرم و ممنتوم می‌باشد که به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{V}\vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (2)$$

در معادلات بالا $\vec{V}$ بردار سرعت، P فشار استاتیکی، ρ چگالی و $\bar{\tau}$ تانسور تنش برشی است. با توجه به اینکه جریان تراکم‌ناپذیر است و هیچگونه انتقال حرارت و چشمه حرارتی در فیزیک مساله وجود ندارد پس نیازی به معادله انرژی نخواهد

بود.

همچنین مدل آشفتگی پیشنهاد شده توسط ساهو و همکاران [11]، مدل آشفتگی K ω -SST می‌باشد. مدل K ω -SST توسط منتر [15] برای ترکیب کارآمد فرمول‌بندی دقیق و قوی مدل K- ϵ در ناحیه نزدیک دیوار با مدل K- ϵ مستقل از جریان آزاد در میدان دوردست، توسعه داده شده است. برای رسیدن به این منظور، مدل K- ϵ با فرمول‌بندی زیر به مدل K- ω تبدیل شده است:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial \tau} + \bar{u}_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = P_\kappa - \beta^* \omega \kappa + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\kappa v_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha s^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، k به انرژی سنتیکی آشفته اشاره می‌کند و ω به نرخ پخش ویژه اشاره می‌کند. P_κ محدود کننده تولید است و F_1 تابع ترکیب است. مفهوم ضرایب و متغیرهای مختلف در منتر [15] موجود است.

حل عددی

هندسه و شبکه‌بندی

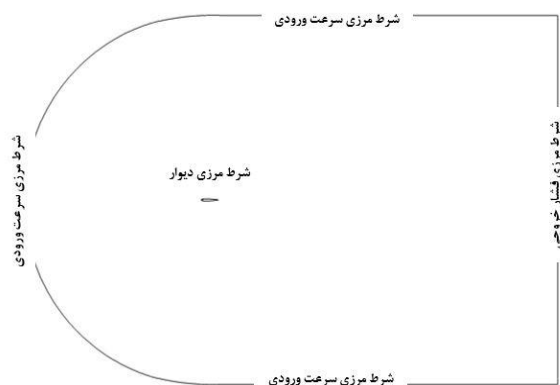
هندسه مورد نظر در این پژوهش همانند پژوهش ساهو و همکاران [11] است. بدین صورت که ایرفویل مورد نظر ناکا ۰۰۱۲ با طول وتر ۱ متر می‌باشد که در لبه حمله آن استوانه‌ای دایره‌ای شکل با قطر ۰/۱ طول وتر با فاصله ۰/۰۱ طول وتر، نسبت به ایرفویل قرار گرفته که در شکل (۱) نمایش داده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که این پژوهش به‌صورت دوبعدی انجام می‌شود.



شکل ۱ هندسه ایرفویل به همراه سطح متحرک در لبه حمله

برای رسم هندسه و شبکه‌بندی از نرم‌افزار گمبیت (Menter) استفاده شده است. شبکه بندی انجام شده از نوع با

برای سطح ایرفویل و دیواره دایروی که نشان‌دهنده سطح متحرک می‌باشد، اعمال می‌شود. همچنین به سطح متحرک حول مبدأ مختصات دوران داده می‌شود. در شرط مرزی دیوار هیچگونه شار حرارتی اعمال نمی‌شود و با اعمال شرط عدم لغزش، سرعت بر روی دیواره نیز صفر است.



شکل ۳ شرایط مرزی

تنظیمات مدل آشفتگی

برای تنظیمات مدل آشفتگی، تنظیمات پیش‌فرض فلوئنت برای مدل آشفتگی K ω -SST اعمال شده است.

تنظیمات حل گر

برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار انسیس فلوئنت (Fluent) نسخه (۱-۱۹) استفاده شده است. در ابتدا نوع حل گر فشار مینا (Pressure-Based) انتخاب می‌شود چون عدد ماخ کمتر از ۰/۳ است، چگالی ثابت است و این نوع حل گر مناسب‌تر است. برای الگوریتم حل روش سیمپل (Simple) انتخاب شده و نوع گسسته‌سازی معادلات به صورت پیش‌فرض است. همچنین برای تمامی معادلات ضرایب تخفیف (Under Relaxation Factors) ۰/۲ قرار داده شده است. برای قسمت چرخان از mesh motion استفاده می‌کنیم و سرعت‌های مدنظر را اعمال می‌کنیم.

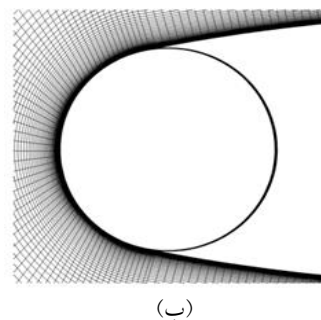
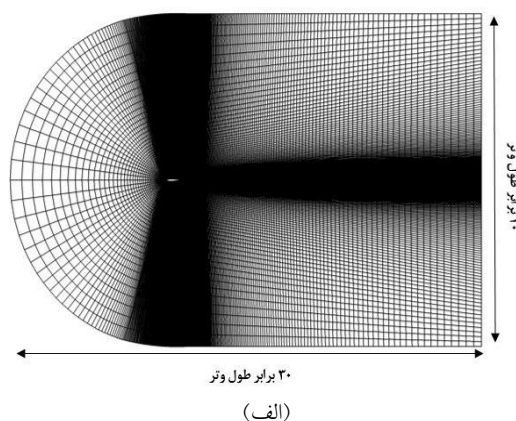
معیار همگرایی برای حل به گونه‌ای است که ضرایب برآ و پسا در هر تکرار از حل، ثابت و یا نوسانات تکراری و مشابه داشته باشند.

نتایج

استقلال از تعداد شبکه

قبل از آنکه به شبیه‌سازی عددی پرداخته شود باید از عدم

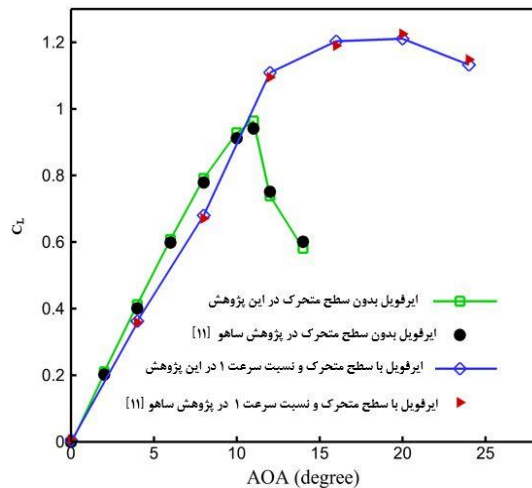
سازمان (Structured) و شبکه لایه مرزی به گونه‌ای است که y^+ کمتر از یک یا حداکثر یک شود. همچنین اندازه فضای محاسباتی در راستای جلو، بالا و پایین به اندازه ۱۰ برابر طول وتر و در انتها به اندازه ۲۰ برابر طول وتر ایرفویل در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) نمای کلی از فضای محاسباتی، شبکه‌بندی و نمای نزدیک از شبکه‌بندی بر روی ایرفویل با سطح متحرک قابل مشاهده است. در لبه چرخان و نزدیک سطح ایرفویل به دلیل حساسیت و تاثیر بیشتر بر نتایج، مش ریزتر شده است تا لایه مرزی با کیفیتی داشته باشیم و تغییرات نواحی چرخان را بهتر دریافت کنیم.



شکل ۲ (الف) نمای کلی از فضای محاسباتی، شبکه‌بندی و (ب) نمای نزدیک از شبکه‌بندی

شرایط مرزی

در این پژوهش از سه نوع شرط مرزی (Boundary Conditions) سرعت ورودی (Velocity Inlet)، فشارخروجی (Pressure Outlet) و دیوار (Wall) استفاده شده که در شکل (۳) به نمایش درآمده است. در شرط مرزی سرعت ورودی، سرعت و راستای جریان ورودی تعیین می‌شود. در شرط مرزی فشارخروجی نیز مقدار فشار در مرز خروجی اعمال شده است. شرط مرزی دیوار



شکل ۵ اعتبارسنجی با نتایج ساهو و همکاران [11] بر روی ایرفویل بدون سطح متحرک و به همراه سطح متحرک در نسبت سرعت ۱

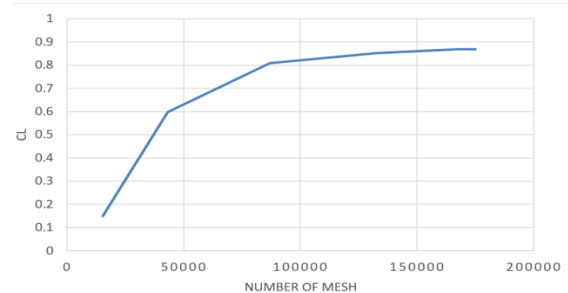
نتایج حاصل از شبیه سازی

حال که از استقلال نتایج نسبت به تعداد شبکه و صحت حل عددی اطمینان حاصل شد نوبت به شبیه سازی ایرفویل به همراه سطح متحرک در نسبت سرعت های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و حالت بدون سطح متحرک می رسد. ضریب نیروهای برآ و پسا نسبت به زاویه حمله برای تمامی نسبت سرعت ها در شکل (۶-۶) آمده است.

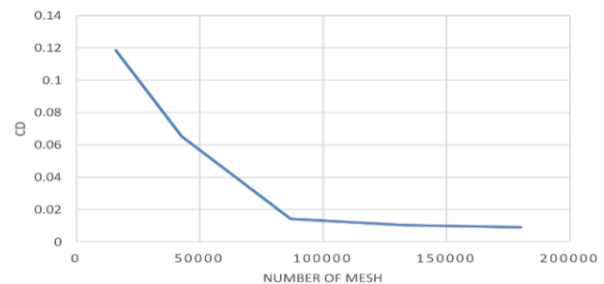
آنچه که در نگاه اول از شکل (۶) نمایان است تاثیر بسزای سطح متحرک قرار گرفته در لبه حمله ایرفویل می باشد. ضریب نیروی برآ با افزایش نسبت سرعت افزایش و ضریب نیروی پسا کاهش یافته است. مهم ترین دستاورد، در کاهش نیروی پسا می باشد. با افزایش نسبت سرعت نه تنها ضریب پسا کاهش می یابد بلکه نیروی پیشران نیز ایجاد می شود. از نسبت سرعت ۱۰ به بالا ضریب پسا منفی می باشد که حاکی از ایجاد نیروی پیشران است.

مزیت دیگر سطح متحرک همانگونه که انتظار می رفت، جلوگیری از جدایش جریان است. این مزیت برای زاویه حمله ۲۴ درجه در شکل (۷) مشخص است. در شکل (۷) کانطور (Contour) سرعت به همراه خطوط جریان (Streamline) در زاویه ۲۴ درجه برای ایرفویل بدون سطح متحرک و به همراه سطح متحرک در نسبت سرعت های ۵ و ۲۰ به نمایش درآمده است. ایرفویل بدون سطح متحرک در زاویه حمله ۲۴ درجه در حالت واماندگی قرار دارد به طوری که جریان کاملاً از سطح

تاثیرپذیری نتایج از تعداد و ابعاد شبکه محاسباتی اطمینان حاصل شود. برای این کار، استقلال نتایج برآ و پسا از تعداد شبکه بر روی ایرفول ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۱۰ درجه، بررسی شده است. این زاویه، بر روی جریان اعمال خواهد شد. همانطور که از شکل (۴) مشخص است، نتایج برای تعداد شبکه 150000 به بیشتر، تغییرات چندانی ندارد پس می توان بیان نمود که در این تعداد از شبکه، نتایج مستقل از تعداد شبکه است.



(الف)

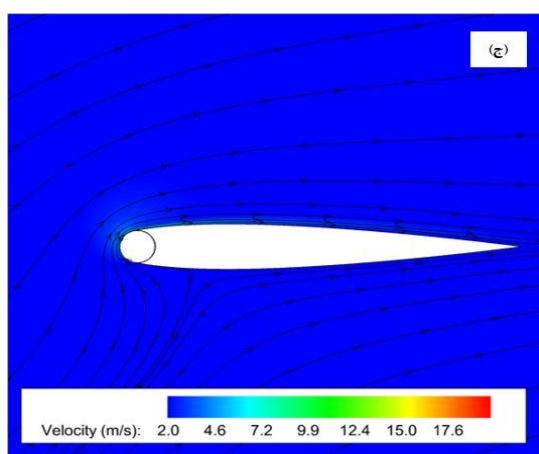
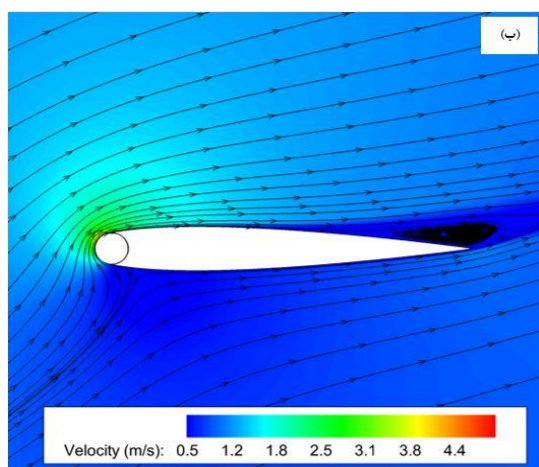
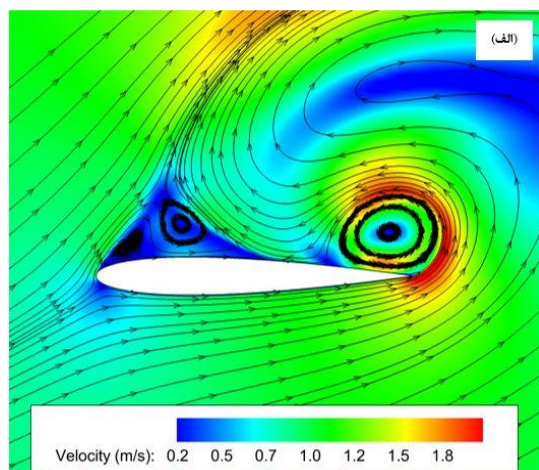


(ب)

شکل ۴ استقلال نتایج از تعداد شبکه در زاویه حمله ۱۰ درجه. (الف) ضریب برآ، (ب) ضریب پسا

اعتبارسنجی (Validation) حل عددی

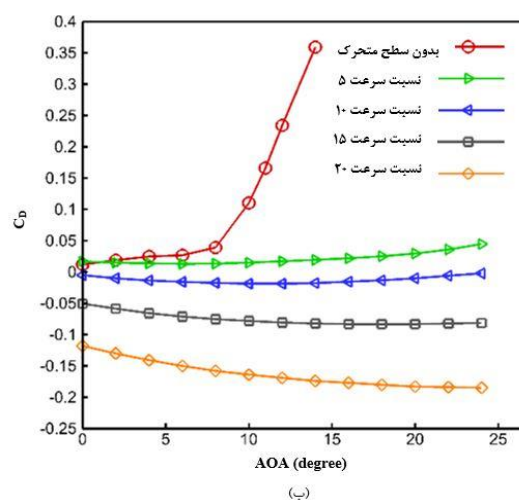
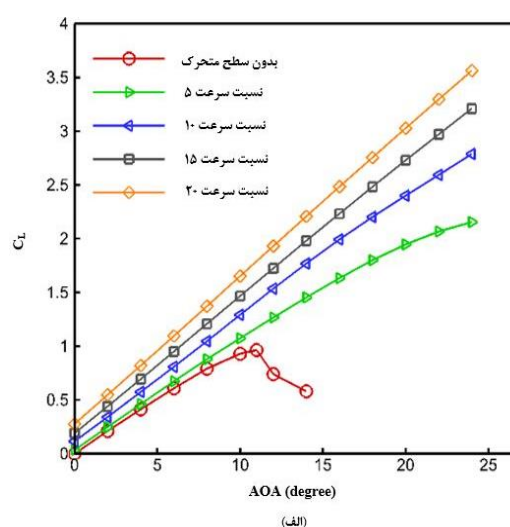
برای انجام شبیه سازی با مدل آشفتگی K ω -SST، در ابتدا باید از صحت حل عددی اطمینان حاصل شود. برای انجام این کار یک اعتبارسنجی بر روی ضریب برآ برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ بدون سطح متحرک و اعتبارسنجی دیگری بر روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ به همراه سطح متحرک با نسبت سرعت ۱ با نتایج ارائه شده از پژوهش ساهو و همکاران [11] انجام شده که در شکل ۶، ۵ به نمایش درآمده است. شکل (۵) به خوبی، صحت حل عددی با مدل آشفتگی K ω -SST را در این پژوهش نشان می دهد.



شکل ۷ کانتور سرعت و خطوط جریان برای زاویه حمله ۲۴ درجه: (الف) ایرفویل بدون سطح متحرک، (ب) ایرفویل به همراه سطح متحرک در نسبت سرعت ۵، (ج) ایرفویل به همراه سطح متحرک در نسبت سرعت ۲۰

همانطور که بیان شد مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، ایجاد نیروی پیشران در نسبت سرعت‌های بالا می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان در سهم پسای فشاری نسبت به پسای کل و رسم ضریب فشار بر روی سطح جست و جو کرد. این جست و جو

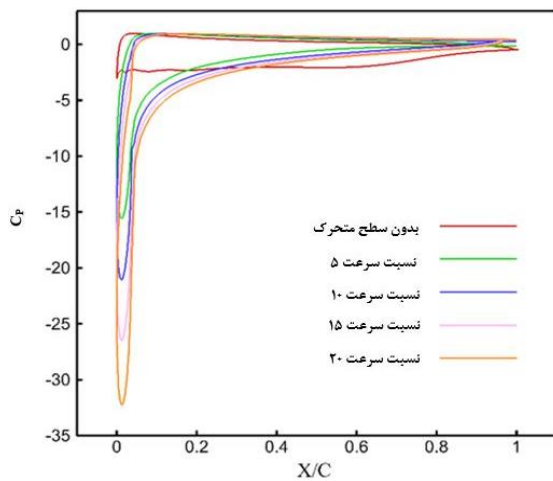
بالایی ایرفویل جدا شده است و با استفاده از سطح متحرک و افزایش نسبت سرعت، ناحیه جدایش جریان محو و از جدایش جریان جلوگیری شده است. دلیل این امر تزریق انرژی به لایه مرزی توسط سطح متحرک می‌باشد. هرچه نسبت سرعت بیشتر باشد، انرژی تزریق شده به لایه مرزی نیز بیشتر خواهد بود. در شکل (۷) هنگامی که نسبت سرعت ۵ می‌باشد، گرچه از جدایش جریان به میزان زیادی جلوگیری شده است اما هنوز جدایش جریان از سطح بالایی ایرفویل مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت سرعت به ۲۰ و افزایش انرژی تزریق شده به لایه مرزی از جدایش جریان به طور کامل جلوگیری شده است.



شکل ۶ ضرایب برآ و پسا بر روی ایرفویل بدون سطح متحرک و به همراه سطح متحرک در نسبت سرعت‌های متفاوت (الف) ضریب برآ (ب) ضریب پسا

افزایش سرعت جریان لایه مرزی به واسطه تزریق انرژی به لایه مرزی توسط سطح متحرک است.

در ادامه با رسم نمودار ضریب فشار بر روی سطح ایرفویل و سطح متحرک، علت منفی شدن پسای فشاری مشخص شده است. در شکل (۸) نمودار ضریب فشار بر روی سطح برای ایرفویل بدون سطح متحرک و به همراه سطح متحرک در نسبت سرعت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ رسم شده است. همانطور که از شکل (۸) مشخص است در حالت ایرفویل با سطح متحرک، ضریب فشار در لبه حمله به شدت افت می‌کند و هرچه نسبت سرعت بیشتر باشد افت ضریب فشار نیز بیشتر خواهد بود. از طرفی ضریب فشار در اکثر نواحی دیگر افزایش می‌یابد.



شکل ۸ نمودار ضریب فشار بر روی سطح برای ایرفویل بدون سطح متحرک و به همراه سطح متحرک در نسبت سرعت‌های مختلف

شکل (۹) حالت شماتیکی از نیروهای فشاری اعمال شده بر سطح ایرفویل و برآیند آنها را نشان می‌دهد. براساس شکل (۸) ضریب فشار در لبه حمله بسیار کمتر از سایر نقاط روی سطح ایرفویل می‌باشد پس نیروی فشاری در لبه حمله بسیار کوچک‌تر از سایر نقاط است. در نتیجه انتظار می‌رود برآیند نیروهای فشاری از لبه فرار (Trailing Edge) به سمت لبه حمله باشد که با تجزیه این بردار نیرو سهمی از آن در راستای Y و سهمی دیگر در خلاف جهت جریان یعنی جهت X- قرار می‌گیرد. سهمی از بردار برآیند نیروهای فشاری که در راستای X است، سبب ایجاد نیروی پیشران می‌شود. پس می‌توان به این نتیجه دست یافت که کاهش فشار و ضریب فشار در لبه حمله سبب ایجاد پسای فشاری منفی می‌شود و هرچه نسبت

برای زاویه حمله ۲۴ درجه انجام شده است. در جدول (۱) ضریب پسای کل و سهم پسای فشاری و اصطکاکی برای زاویه حمله ۲۴ درجه در تمامی نسبت سرعت‌ها و ایرفویل بدون سطح متحرک گزارش شده است. همانگونه که از جدول (۱) مشخص است در حالت ایرفویل بدون سطح متحرک، پسای فشاری سهم غالب‌تری نسبت به پسای اصطکاکی دارد به گونه‌ای که می‌توان از پسای اصطکاکی در مقابل پسای فشاری صرف نظر نمود. اما با استفاده از سطح متحرک در لبه حمله ایرفویل، در نسبت سرعت ۵، به میزان قابل توجهی از پسای فشاری کاسته و کمتر از پسای اصطکاکی شده است. البته پسای اصطکاکی افزایش یافته که حاصل از افزایش سرعت جریان لایه مرزی به واسطه تزریق انرژی به لایه مرزی توسط سطح متحرک است. گرچه پسای فشاری در نسبت سرعت ۵ کاهش چشمگیری داشته اما همچنان میزان مثبتی می‌باشد، در نتیجه پسای کل مثبت است. با رجوع به شکل (۷) و مشاهده کانتور سرعت در نسبت سرعت ۵، مشاهده می‌شود که گرچه به میزان قابل توجهی از جدایش جریان جلوگیری شده اما همچنان جدایش جریان از سطح بالایی ایرفویل مشاهده می‌شود. به همین دلیل در نسبت سرعت ۵، پسای فشاری سهم قابل ملاحظه‌ای از پسای کل را دارد.

جدول ۱ ضریب پسای کل، فشاری و اصطکاکی در زاویه حمله ۲۴ درجه

نوع پسای	پسای کل	پسای فشاری	پسای اصطکاکی
بدون سطح متحرک	۰/۷۷۳۶	۰/۷۷۲۴	۰/۰۰۱۲
نسبت سرعت ۵	۰/۰۴۴۷	-۰/۰۱۱۶	۰/۰۳۳۱
نسبت سرعت ۱۰	-۰/۰۰۲۳	-۰/۰۷۳۴	۰/۰۷۱۱
نسبت سرعت ۱۵	-۰/۰۸۱۲	-۰/۱۹۳۹	۰/۱۱۲۷
نسبت سرعت ۲۰	-۰/۱۸۵	-۰/۳۴۲	۰/۱۵۷

در ادامه با افزایش نسبت سرعت از جدایش جریان به‌طور کامل جلوگیری می‌شود و هماگونه در جدول (۱) گزارش شده، تنها پسای فشاری ایجاد نمی‌شود بلکه میزان آن منفی بوده که نشان از ایجاد نیروی پیشران می‌باشد. گرچه با افزایش نسبت سرعت پسای اصطکاکی افزایش می‌یابد اما پسای فشاری منفی‌تر شده که در مجموع باعث منفی شدن پسای کل می‌شوند. پس نیروی پیشران ایجاد شده ناشی از پسای فشاری منفی است. دلیل افزایش پسای اصطکاکی همانطور که بیان شد

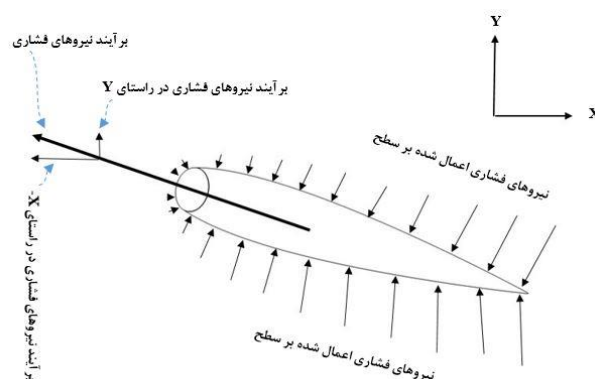
نسبت سرعت بیشتر باشد نیروی پیشرانیش ایجاد شده نیز بیشتر است. منبع نیروی پیشرانیش ایجاد شده پسای فشاری منفی می باشد. دلیل ایجاد پسای فشاری منفی، کاهش شدید فشار در لبه حمله ایرفویل می باشد که باعث می شود برآیند نیروهای فشاری اعمال شده بر سطح از لبه فرار به سمت لبه حمله باشد. با تجزیه این بردار نیرو سهمی از آن در راستای Y و سهمی دیگر در خلاف جهت جریان یعنی جهت $-X$ قرار می گیرد. سهمی از بردار برآیند نیروهای فشاری که در راستای $-X$ است، سبب ایجاد نیروی پیشرانیش و سهمی از بردار برآیند نیروهای فشاری که در راستای Y است، سبب افزایش نیروی برآ می شود (به شکل ۹ رجوع شود). از طرفی با افزایش نسبت سرعت، پسای اصطکاکی نیز افزایش می یابد که این امر به دلیل افزایش سرعت جریان لایه مرزی به واسطه تزریق انرژی توسط سطح متحرک به جریان لایه مرزی است. اما در مجموع به دلیل منفی بودن پسای فشاری، پسای کل مقداری منفی دارد که نمایانگر ایجاد نیروی پیشرانیش است. در نسبت سرعت بالا، نتایج فوق حاصل شده است و از آنجایی که در سایر مقالات نسبت سرعت های پایین تر بررسی شده است، چنین نتایجی گزارش نشده است و این اختلاف اصلی میان این پژوهش با پژوهش های پیشین است.

در مجموع می توان بیان نمود که استفاده از سطح متحرک به صورت استوانه چرخشی قرار گرفته در لبه حمله ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در نسبت سرعت های بالا، عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل را به میزان چشم گیری بهبود بخشیده و می توان از خود سطح متحرک نیز به عنوان موتور پیشرانیش هواپیما استفاده نمود.

فهرست علائم

وتر ایرفویل	C
ضریب پسا	C_D
ضریب برآ	C_L
ضریب فشار	C_p
فشار، Pa	P
مکان و جهت	X
مکان و جهت	Y
سرعت سیال، m/s	V

سرعت بیشتر شود افت فشار در لبه حمله بیشتر، پسای فشاری منفی تر و نیروی پیشرانیش بیشتری ایجاد می شود. همچنین سهمی از بردار برآیند نیروهای فشاری که در راستای Y است سبب افزایش نیروی برآ می شود.



شکل ۹ شماتیکی از نیروهای فشاری اعمال شده بر سطح ایرفویل و برآیند آنها

نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر سطح متحرک به صورت استوانه چرخشی قرار گرفته در لبه حمله ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در نسبت سرعت های بالا پرداخته شده است. در حالت ایرفویل بدون سطح متحرک زاویه حمله و اماندگی ۱۱ درجه است و بعد از این زاویه حمله، جریان به طور کامل از سطح بالایی ایرفویل جدا می شود که در این حالت پسای فشاری سهم غالب تری نسبت به پسای اصطکاکی بر پسای کل دارد.

استفاده از سطح متحرک سبب جلوگیری از جدایش جریان، و اماندگی ایرفویل، افزایش برآ و کاهش پسا می شود. اثر سطح متحرک در نسبت سرعت های مختلف متفاوت است و هرچه نسبت سرعت بیشتر باشد اثر آیرودینامیکی آن مطلوب تر است. با افزایش نسبت سرعت، انرژی تزریق شده به لایه مرزی بیشتر شده و جدایش جریان بیشتر به تأخیر می افتد در نتیجه پسای فشاری که ناشی از جدایش جریان است به میزان زیادی کاهش می یابد. از بین حالت های بررسی شده، نسبت سرعت ۲۰ در زاویه حمله ۲۴ درجه با ضریب برآ ۳/۵۶۴ و ضریب پسا ۰/۱۸۵، مطلوب ترین عملکرد آیرودینامیکی را داشته است.

مهم ترین دستاورد این پژوهش در ضریب پسای منفی است. ضریب پسای منفی نشانه ایجاد نیروی پیشرانیش می باشد. هرچه

تقدیر و تشکر

چگالی، kg/m^3 ρ

تانسور تنش برشی

 $\bar{\tau}$

مراجع

- [1] V. J. Modi, "Moving surface boundary-layer control: a review", *Journal of fluids and structures*, vol.11, no, 6, pp. 627-63, (1997).
- [2] J. A. Seifert, "review of the Magnus effect in aeronautics", *Aerospace Sciences*, vol. 55, pp. 17-45, (2012).
- [3] A. Favre., "Contribution à l'étude expérimentale des mouvements hydrodynamiques à deux dimensions" E. Blondel La Rougery, (1938).
- [4] V. J. Modi., J. L. Sun., T. Akutsu., P. Lake, K. McMillan., P. G. Swinton, D. Mullins, "Moving-Surface Boundary-Layer Control for Aircraft Operation at High Incidence", *Journal of Aircraft*, vol. 18, no, 11, pp. 963-8, (1981).
- [5] V. J. Modi., F. Mokhtarian, M. S. U. K. Fernando., T. Yokomizo., "Moving surface boundary-layer control as applied to two-dimensional airfoils", *Journal of Aircraft*, vol. 28, no,2: pp.104–112, (1991).
- [6] V. J. Modi., E. Shih, B. Ying, T. Yokomizo, "Drag reduction of bluff bodies through momentum injection", *Journal of Aircraft*, vol. 29, no, 3, pp. 429–436. (1992).
- [7] P. J. Strykowski, P. J. Sreenivasan, "On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers", *Fluid Mechanics*, 218, Pp. 71–107, (1990).
- [8] A. Z. Al-Garni, A. M. Al-Garni, S. A. Ahemd, A. Z. Sahin, "Flow control for an aerofoil with leading edge rotation: an experimental study", *Journal of Aircraft*, vol. 37, no, 4, pp. 617–622, (2000).
- [9] S. Mittal, "Control of flow past bluff bodies using rotating control cylinders", *Journal of Fluids and Structures*, vol. 15, no, 2, pp. 291-326, (2001).
- [10] B. S. V. P. Patnaik, G. W. Wei, "Controlling wake turbulence", *Phys Rev Lett*, vol. 88, no, 5, pp. 054502-54511-054502-4, (2002).
- [11] R. Sahu, B. S. V. Patnaik, "CFD simulation of momentum injection control past a streamlined body", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 21, no,8, pp. 980-1001, (2011).
- [12] E. Salimipour, A. Salimipour, "A Power minimization and vortex shedding elimination of a circular cylinder by moving surface mechanism", *Ocean Engineering*, vol. 189, P. 106408, (2019).
- [13] G. R. Assi, R. M. Orselli, M. Silva-Ortega, "Control of vortex shedding from a circular cylinder surrounded by eight rotating wake-control cylinders at $Re=100$ ", *Journal of Fluids and Structures*, vol. 89, pp. 13-24, (2019).
- [14] E. Salimipour, S. Yazdani, "Improvement of aerodynamic performance of an offshore wind turbine blade by moving surface mechanism", *Ocean Engineering*, vol. 195, P. 106710, (2020).
- [15] F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model", *Turbulence Heat and Mass Transfer*, vol. 4, no,1, pp. 625-32, (2003).



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

Simulation of Nanofluid Flow at Low Reynolds Number in a Microchannel with One-Sided Sudden Expansion under the Effect of a Magnetic Field

Research Article

Foroozan Moradi¹, Pedram Pournaderi²

DOI: [10.22067/jacsm.2023.79298.1143](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.79298.1143)

1. Introduction

One of the most important problems in industry is the control of heat transfer. Based on the available studies nanoparticles can help to improve and increase the heat transfer of the base fluid. A channel with a backward-facing step can be a sample to study the flow separation phenomenon. The flow separation and reattachment phenomenon that is occurred due to the sudden expansion of the cross-section of a channel is one of the important applied cases.

The idea of adding nanoparticles to a fluid to increase heat transfer was first introduced in 1873. Most of researchers have expressed that adding nanoparticles with higher thermal conductivity to the base fluid leads to the enhancement of the thermal performance of the obtained nanofluids.

The flow of an electrically conducting fluid under a magnetic field which is called Hartmann flow was widely investigated after experimental research of Hartmann on mercury flow in a tube under a magnetic field. A limited number of researches have been carried out on the laminar nanofluid flow in a channel with one-sided sudden expansion. Nevertheless, the impact of the magnetic field on the nanofluid flow in this geometry has not been investigated for flows with low velocities (low Reynolds numbers). In this study, the impact of a uniform magnetic field perpendicular to the flow direction on the hydrodynamics and heat transfer of Cu-water nanofluid flow in a microchannel with one-sided sudden expansion at a low Reynolds number is investigated numerically.

2. Modeling and numerical methods

Figure 1 shows that the geometry of the problem is a backward-facing step microchannel which has a length of 0.25 m, an outlet height of 0.001 m, and a step height of 600 μm . The length of the wall upstream of the step and expansion ratio are 0.1 m and 2.5, respectively. The angle of the magnetic field is 90° . A heat flux of 500 W/m^2 is applied on the wall that is downstream of the step.

The governing equations include mass, momentum, and energy conservation equations in incompressible cases. The effect of the magnetic field is added as a source term to the right side of the momentum equation. These equations are solved using the finite difference method. Temporal, convection and diffusion terms are discretized using 3rd- order Runge-Kutta, second-order upwind, and second-order central approximation, respectively. The projection method is used to solve the flow equations. The homogenous model is employed to apply the effect of nanoparticles. In this model, nanofluid is considered a homogenous fluid and only its properties are modified based on the concentration of nanoparticles.

3. Results

In this section, the impact of the magnetic field on the hydrodynamics and heat transfer of Cu-water nanofluid at a low Reynolds number ($Re=1$) is investigated.

Figure 2 indicates the velocity distribution for various Hartmann numbers at a volume fraction of 0.02. It is observed that under the magnetic field, the average velocity of nanofluid is reduced and the velocity gradient on the channel wall is increased.

Figure 3 presents the average friction coefficient versus volume fraction for different Hartmann numbers. At zero

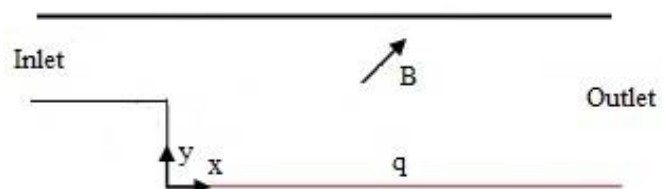


Fig. 1. Geometry of the problem

*Manuscript received, October 21, 2022. Revised, February 11, 2023, Accepted, April 25, 2022.

¹. MSc, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

². Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Email: sp.pournaderi@yu.ac.ir

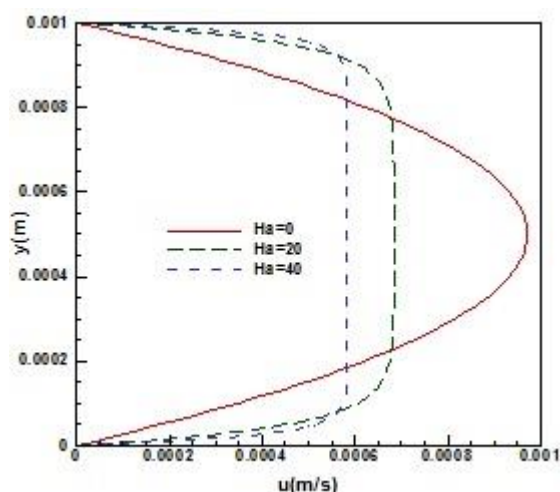


Figure 2. Velocity distribution at volume fraction of 0.02 ($x=0.01m$)

Hartmann number, the increase of volume fraction has a slight impact on the friction coefficient. According to Figure 2, by increasing of volume fraction velocity gradient and consequently shear stress on the wall increase. On the other hand, by increasing volume fraction at a constant Reynolds number, due to the increase of nanofluid kinematic viscosity, velocity and consequently dynamic pressure increase. The increase in shear stress is almost negated by the increase in dynamic pressure and therefore no change occurs in the friction coefficient. Under the magnetic field, the friction coefficient reduces by increasing the volume fraction. In this case, the increase in fluid dynamic pressure is higher than the increase in wall shear stress.

Figure 4 indicates the impact of the magnetic field and volume fraction on the average Nusselt number. At a Reynolds number of 1, by increasing of volume fraction temperature gradient on the wall decreases, and the thermal conductivity coefficient increases. Nevertheless, the reduction of the wall temperature gradient is dominant and as a result, the Nusselt number decreases. It is noteworthy that at high Reynolds numbers, the Nusselt number increases with an increase in volume fraction. According to Figure 4, the applied magnetic field has no remarkable effect on the Nusselt number. At Reynolds number of 1, the effect of convective heat transfer is slight and the conduction mechanism is dominant. Therefore, the magnetic field has no important impact on temperature distribution. This finding is in contrast with the results of previous studies for higher Reynolds numbers which show the increase of Nusselt number with Hartmann number.

4. Conclusion

In this study, the impact of a magnetic field on the hydrodynamics and heat transfer of laminar flow of Cu-water nanofluid in a channel with one-sided sudden expansion at a low Reynolds number was investigated. The governing equations include mass, momentum, and energy conservation equations. The homogenous model was used to apply the effect of nanoparticles.

By increasing the magnetic field intensity, the nanofluid velocity decreases and the velocity gradient on the wall increases. Under a magnetic field, the friction coefficient

decreases with volume fraction and increases with magnetic field strength.

At low Reynolds numbers, contrary to high Reynolds numbers, by increasing the volume fraction the Nusselt number decreases. Moreover, contrary to high Reynolds numbers, in this case, the magnetic field has no effect on the Nusselt number. At low Reynolds numbers, applying a magnetic field improves the overall performance of the system.

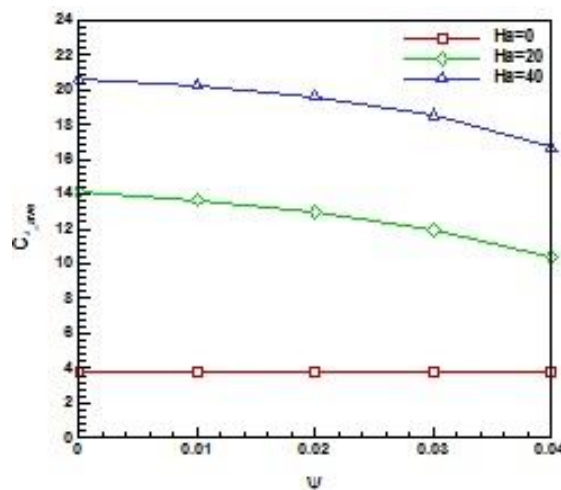


Figure 3. Effect of magnetic field on average friction coefficient

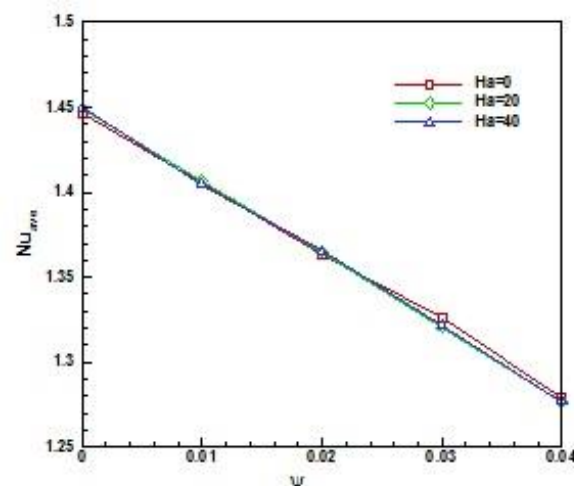


Figure 4. Effect of magnetic field on average Nusselt number



شبیه‌سازی جریان نانوسیال در عدد رینولدز پایین در یک میکروکانال با انبساط ناگهانی یک طرفه تحت اثر میدان مغناطیسی*

مقاله پژوهشی

پدram پورنادری (۲) 

فروزان مرادی (۱)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.79298.1143

چکیده در این مطالعه، تأثیر میدان مغناطیسی بر هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال در یک میکروکانال همراه با انبساط ناگهانی یک طرفه در عدد رینولدز پایین بررسی می‌شود. معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی با توسعه یک کد به زبان برنامه نویسی فرترن به روش تفاضل محدود بر روی یک شبکه جابه‌جا شده گسسته‌سازی و حل می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در عدد رینولدز پایین، گردابه‌ای بعد از پله تشکیل نمی‌گردد. در حضور میدان مغناطیسی، ضریب اصطکاک با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد. در کسر حجمی ۴ درصد، این کاهش در مقایسه با آب خالص در اعداد هارتمن ۲۰ و ۴۰ به ترتیب ۲۵ درصد و ۱۸ درصد است. با اعمال میدان مغناطیسی ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. برای نانوسیال با غلظت ۴ درصد، افزایش ضریب اصطکاک متوسط در مقایسه با آب در اعداد هارتمن ۲۰ و ۴۰ به ترتیب ۱۷۶ و ۳۳۷ درصد می‌باشد. در عدد رینولدز پایین، تأثیر میدان مغناطیسی بر روی عدد ناسلت ناچیز می‌باشد. با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت کاهش می‌یابد. در کسر حجمی ۴ درصد، تقریباً ۱۲ درصد کاهش در عدد ناسلت در مقایسه با آب مشاهده می‌گردد. بررسی معیار ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد که اعمال میدان مغناطیسی، منجر به بهبود عملکرد سیستم می‌گردد. در عدد هارتمن ۲۰ و کسر حجمی ۴ درصد، حدود ۱۱ درصد افزایش در ضریب عملکرد نسبت حالت بدون میدان مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی نانوسیال، میکروکانال، انبساط ناگهانی، میدان مغناطیسی، عدد رینولدز پایین.

Simulation of Nanofluid Flow at Low Reynolds Number in a Microchannel with One-Sided Sudden Expansion under the Effect of a Magnetic Field

Foroozan Moradi

Pedram Pournaderi

Abstract In this study, the magnetic field effect on the hydrodynamics and heat transfer of the laminar flow of a nanofluid in a microchannel with one-sided sudden expansion at a low Reynolds number is investigated. The governing equations including mass, momentum, and energy conservation equations are discretized and solved on a staggered grid using the finite difference method by developing a Fortran code. The simulation results show that at a low Reynolds number, no vortex is formed after the step. In the presence of a magnetic field, the friction coefficient decreases with volume fraction. At a volume fraction of 0.04, this reduction in comparison with water at Hartmann numbers of 20 and 40 is 25 and 18 percent, respectively. By applying the magnetic field, the friction factor increases. For nanofluid with a volume fraction of 0.04, the enhancement of average friction factor in comparison with water at Hartmann numbers of 20 and 40 is 176 and 337 percent, respectively. At a low Reynolds number, the magnetic field effect on the Nusselt number is negligible. The Nusselt number decreases with volume fraction. At a volume fraction of 0.04, a reduction of about 12 percent is observed in the Nusselt number in comparison with water. Examining the performance evaluation criteria shows that applying a magnetic field improves the system's performance. At a Hartmann number of 20 and volume fraction of 0.04, an enhancement of about 11 percent in performance coefficient is observed in comparison with the case that the magnetic field is absent.

Key Words Nanofluid, Microchannel, Sudden expansion, Magnetic field, Low Reynolds number.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۷/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۲/۵ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج.

مقدمه

یکی از مسائل مهم در صنعت، کنترل انتقال حرارت می‌باشد. طبق مطالعات انجام شده نانوذرات می‌توانند به بهبود انتقال حرارت کمک کنند و نرخ انتقال حرارت سیال پایه را افزایش دهند. هندسه کانال پله با انبساط ناگهانی می‌تواند یک نمونه مطالعاتی از پدیده جدایش جریان باشد. پدیده جدایش جریان و اتصال مجدد بعدی که به دلیل گسترش ناگهانی محل عبور جریان مانند وجود پله رخ می‌دهد، به عنوان یکی از موارد پرکاربرد مهم صنعتی مطرح می‌باشد. تحقیقات مختلفی در زمینه جریان و انتقال حرارت سیال در کانال با انبساط ناگهانی انجام شده است [1]. مفهوم نانوسیالات با تعلیق ذرات فلزی یا غیرفلزی در مایعات پایه به نوع جدیدی از سیالات انتقال حرارت اشاره دارد. متداول‌ترین سیالات پایه آب، روغن و مخلوط اتیلن-گلیکول هستند. ایده افزودن ذرات به سیال برای افزایش انتقال گرما در سال ۱۸۷۳ بیان شد [2]. در سال ۱۹۹۵، واژه نانوسیال توسط چویی (Choi) [3] برای نشان دادن محلول‌های تهیه شده توسط نانو ذرات با قطر کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر مطرح شد. بیشتر محققان استدلال می‌کنند که افزودن نانوذرات با رسانایی حرارتی بالاتر به سیال پایه منجر به افزایش عملکرد حرارتی نانوسیال‌های حاصل می‌شود [4]. خربیت و همکاران [5] مطالعات تجربی و عددی را برای بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال در یک میکرو کانال با پله پسرو انجام دادند. مطالعه عددی به صورت سه بعدی با استفاده از مدل تک‌فازی و با در نظر گرفتن اثر براونی و اعمال شار حرارتی ثابت بر روی دیواره پایین دست پله انجام شد. تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی مشاهده گردید. نتایج برای دو نانوسیال آب-اکسید سیلیسیوم و آب-اکسید آلومینیوم ارائه شدند. نتایج نشان می‌دهد نانوسیال آب-اکسید سیلیسیوم عدد ناسلت بیشتری دارد. همچنین ضریب اصطکاک هنگام استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بیشتر از نانوسیال آب-اکسید سیلیسیوم است. سلیمفندیگیل (Selimefendigil) و اوزتوپ (Oztop) [6] جریان جابه‌جایی اجباری آرام ضربانی نانوسیال را بر روی پله پسرو با استفاده از روش حجم محدود و مدل همگن بررسی کردند. بخشی از دیواره پایین دست پله موج‌دار (موج مثلثی شکل) و در دمای ثابت در نظر گرفته شد. مشاهده گردید که عدد ناسلت میانگین با افزایش

عدد رینولدز، افزایش طول و ارتفاع موج مثلثی شکل پایین دست کانال و افزایش دامنه ضربان افزایش می‌یابد. در مدت زمان طولانی، سیرکولاسیون جریان در دیواره موج‌دار می‌تواند باعث جدا شدن نانوذرات از محلول گردد. محمد و همکاران [7] به بررسی عددی اثرات چهار نوع مختلف مانع شامل مانع مدور، مانع مثلثی رو به جلو، مانع مثلثی رو به عقب و مانع دوزنقه‌ای بر جابه‌جایی ترکیبی جریان آرام نانوسیال در کانال همراه با انبساط ناگهانی یک‌طرفه با استفاده از روش حجم محدود و با فرض سیال همگن پرداختند. نتایج نشان می‌دهد مانع مثلثی شکل رو به جلو دارای بالاترین مقدار عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک و مانع دوزنقه‌ای شکل کمترین مقدار را برای این کمیت‌ها دارد. موبیدی [8] اثر جریان تزریقی نوسانی به داخل کانال با پله پسرو را روی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال به صورت عددی مطالعه کرد. او از مدل همگن برای مدل‌سازی اثر نانوذرات استفاده نمود. همچنین اثر براونی در محاسبه ضریب رسانش در نظر گرفته شد. بر طبق نتایج حاصل، جریان تزریقی نوسانی یک رفتار پریودیک در میدان جریان و انتقال حرارت ایجاد می‌کند که منجر به یک مکانیزم موثر برای افزایش انتقال حرارت می‌گردد. پورنادری و آرام [9] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال در یک کانال با پله پسرو را به روش حجم محدود بررسی کردند. اثر نانوذرات با استفاده از مدل همگن مطالعه گردید. ایجاد گردابه در پایین دست پله باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. شش نوع نانوذره دی‌اکسید تیتانیوم، اکسید آهن، اکسید مس، اکسید آلومینیوم، اکسید روی و دی‌اکسید سیلیسیوم مقایسه شدند. بیشترین عدد ناسلت متوسط مربوط به نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بود. همچنین نتیجه‌گیری شد که تأثیر نوع نانوسیال بر افت فشار قابل توجه نمی‌باشد.

یانگ و همکاران [10] جریان نانوسیال را در رژیم انتقالی روی پله پسرو به صورت آزمایشگاهی و عددی (بر اساس مدل تک‌فازی) مطالعه کردند. آنها دریافتند که طول گردابه تشکیل شده بعد از پله با افزایش عدد رینولدز و ارتفاع پله افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع پله باعث افزایش انتقال حرارت و در عین حال باعث افزایش افت فشار می‌گردد. اونیشی و یاماموتو [11] اثر نسبت منظری (Aspect ratio) نانوذرات میله‌ای شکل را روی رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی نانوسیال در جریان آرام روی پله

انتقال حرارت در حضور میدان مغناطیسی داشته باشد. حسین و احمد [16] جابه‌جایی اجباری فروسیال آب-اکسید آهن بر روی یک پله پسر و را در حضور یک استوانه چرخان بعد از پله تحت اثر میدان مغناطیسی با استفاده از مدل همگن مطالعه کردند. با افزایش عدد هارتمن، ضریب درگ افزایش و ضریب لیفت و عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابند. افزایش کسر حجمی نانوسیال، موجب کاهش ضریب درگ و افزایش ضریب لیفت و عدد ناسلت متوسط می‌گردد. گریدنمز (Geridönmez) و اوزتوپ [17] جابه‌جایی ترکیبی جریان نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-اکسید آهن تحت اثر میدان مغناطیسی بر روی پله پسر و را به کمک مدل تک‌فازی مطالعه کردند. آنها با بررسی چهار توزیع سرعت ورودی مختلف این نتیجه رسیدند افزایش نانوذرات مغناطیسی تأثیر قابل توجهی در انتقال گرمای جابه‌جایی به ویژه در حالت توزیع سرعت سینوسی دارد. نتایج حاصل نشان داد که توزیع سرعت ورودی و میدان مغناطیسی می‌تواند به‌عنوان پارامترهایی برای کنترل انتقال حرارت و جریان سیال استفاده شوند. منه (Manh) و همکاران [18] با بکارگیری مدل همگن رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی یک فروسیال را در کانال با انبساط ناگهانی تحت اثر یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش تعداد منابع (Source) میدان مغناطیسی قویا تشدید می‌گردد. قاچم و همکاران (Manh) و همکاران [19] شبیه‌سازی هایی را بر اساس مدل همگن برای ارزیابی اثرات نصب یک لایه متخلخل روی انتقال حرارت جابه‌جایی یک نانوسیال هیبریدی در یک کانال با پله پسر و در حضور میدان مغناطیسی انجام دادند. پدیده های تضعیف گردابه و افزایش انتقال حرارت که در حضور میدان مغناطیسی اتفاق می‌افتد، با افزایش تخلخل لایه نصب شده تقویت می‌شوند.

با توجه به تحقیقات پیشین مشاهده می‌شود که تحقیقات محدودی در زمینه تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان آرام نانوسیال در کانال با انبساط ناگهانی یک‌طرفه انجام شده است. با این وجود اثر میدان مغناطیسی بر جریان نانوسیال در این هندسه برای جریان‌های با سرعت‌های پایین (عدد رینولدز پایین) مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این تحقیق، اثر میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان بر هیدرودینامیک و انتقال حرارت نانوسیال آب-

پسر و با استفاده از روش حجم محدود مطالعه کردند. برای محاسبه ضریب لزجت نانوسیال از مدلی مربوط به سوسپانسیون ذرات کروی کشیده شده و برای محاسبه ضریب رسانش حرارتی از مدل همیلتون-کراسر (Hamilton-Crosser) استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که هنگامی که نانوذرات نسبت منطری بزرگ‌تری دارند، افزودن نانوذرات باعث افزایش بیشتری در انتقال حرارت می‌شود.

جریان یک سیال رسانای الکتریکی تحت یک میدان مغناطیسی عمودی در یک کانال که جریان هارتمن نامیده می‌شود، به طور گسترده بعد از تحقیق آزمایشگاهی هارتمن روی جریان جیوه در لوله تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت مورد بررسی قرار گرفت [12]. سلیمفندیگیل و اوزتوپ [13] تأثیر زاویه شیب میدان مغناطیسی بر جابه‌جایی ترکیبی جریان آرام نانوسیال در یک کانال با پله پسر و را به صورت عددی و با استفاده از مدل تک‌فازی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات جامد باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. تحت اثر میدان مغناطیسی، اندازه گردابه تشکیل شده در پشت پله کاهش می‌یابد به طوری که اگر میدان مغناطیسی به اندازه کافی قوی باشد، گردابه‌ای تشکیل نخواهد شد. با افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی و قدرت میدان مغناطیسی میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. مهرز (Mehrez) و کاسفی (Casfi) [14] جابه‌جایی اجباری جریان نانوسیال ترکیبی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کانال با انبساط ناگهانی را تحت یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت با استفاده از روش حجم محدود و با بکارگیری مدل همگن مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش عدد هارتمن سیرکولاسیون جریان پشت پله تضعیف می‌شود. برای میدان‌های مغناطیسی ضعیف‌تر، عدد ناسلت با افزایش شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد ولی برای میدان‌های قوی‌تر افزایش عدد ناسلت مشاهده می‌گردد. سلیمفندیگیل و همکاران [15] تأثیر سه مدل مختلف ضریب رسانش الکتریکی نانوسیالات در جابه‌جایی ترکیبی جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در حضور میدان مغناطیسی در کانال با پله پسر و را با استفاده از روش اجزاء محدود و بر اساس مدل تک‌فازی بررسی کردند آنها دریافتند که بکارگیری مدل‌های مختلف ضریب رسانش الکتریکی نانوسیال می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان

خصوصیات ترموفیزیکی نانوذره و آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در جدول (۱) ذکر شده‌اند. در ورودی سرعت و دمای مشخصی اعمال می‌شود. سرعت متوسط ورودی V_{in} با داشتن عدد رینولدز از رابطه (۱) به دست می‌آید. همچنین، دمای ورودی نانوسیال ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

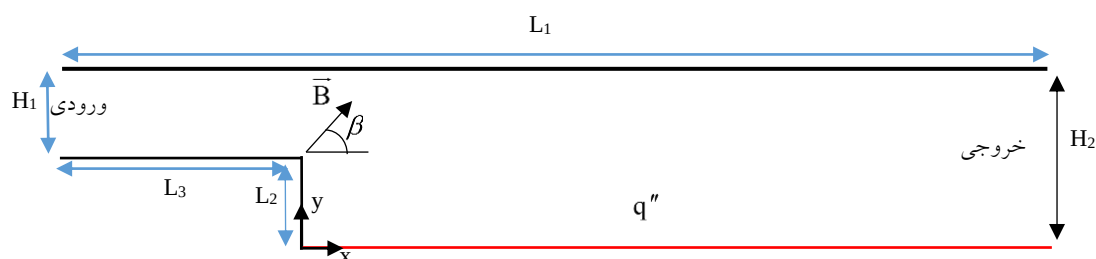
$$Re = \frac{\rho v_{in}(2 H_1)}{\mu} \quad (1)$$

در مرز ورودی با داشتن سرعت متوسط ورودی V_{in} ، از پروفیل سرعت جریان آرام، پایا و توسعه‌یافته استفاده می‌شود. روی مرز جامد شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط گرادیان صفر برای فشار در جهت عمود بر دیوار اعمال می‌گردد. در خروجی فشار ثابت و گرادیان صفر در جهت جریان برای سایر کمیت‌ها اعمال می‌شود. بر روی دیواره پایین دست کانال بعد از پله شار ثابت ۵۰۰ وات بر مترمربع اعمال می‌گردد. سایر دیواره‌ها عایق در نظر گرفته می‌شود.

مس در یک میکروکانال با انبساط ناگهانی یک‌طرفه در عدد رینولدز پایین به صورت عددی بررسی می‌شود. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در این تحقیقات تمرکز محققان بر روی مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت (تغییرات عدد ناسلت) بوده است. در این تحقیق، تاثیر میدان مغناطیسی هم بر روی هیدرودینامیک جریان (تغییرات ضریب اصطکاک) و هم بر روی انتقال حرارت (تغییرات عدد ناسلت) بررسی می‌شود و سپس عملکرد کلی سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

هندسه مسئله و شرایط مرزی

هندسه مسئله مطابق شکل (۱) میکروکانالی با پله پسرو با ابعادی به طول ۰/۲۵ متر، طول بالادست پله ۰/۱ متر، عرض خروجی کانال ۰/۰۰۱ متر، نسبت عرض خروجی به عرض ورودی کانال برابر ۲/۵ و ارتفاع پله ۶۰۰ میکرومتر است که در تحقیق انجام شده توسط خربیت و همکاران [5] استفاده شده است. میدان مغناطیسی $\vec{B}$ با زاویه β برابر با ۹۰ درجه اعمال می‌شود.



شکل ۱ هندسه مسئله

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی نانوذره مس و آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

نوع ماده	ضریب انبساط حرارتی $\beta(1/K)$	ظرفیت گرمایی ویژه $C_p(J/kgK)$	ضریب رسانش $k(W/mK)$	لزجت $\mu(kgm^{-1}s^{-1})$	چگالی $\rho(kg/m^3)$	هدایت الکتریکی $\sigma(S/m)$
آب	2.06×10^{-4}	4182.2	0.613	0.00101	998.203	0.5
مس	1.67×10^{-5}	383	400	-	8954	5.97×10^7

توقف حل معادلات برای رسیدن به حالت دائم $\sum_{i,j} |A^{n+1}_{i,j} - A^n_{i,j}| \leq 10^{-9}$ است که n گام زمانی و A کمیت موردنظر نظیر مولفه‌های سرعت و دما می باشد.

مدل همگن

در این مدل، نانوسیال به عنوان یک سیال همگن در نظر گرفته می شود و فقط خصوصیات ترموفیزیکی آن بر اساس غلظت نانوذره اصلاح می شود. در این حالت، فرض بر این است که مایع پایه و نانوذرات در تعادل گرمایی هستند و با سرعت برابر حرکت می کنند. در این پژوهش، از معادلات زیر برای تخمین خواص نانوسیال استفاده می شود. ρ_{nf} ، $C_{p,nf}$ ، β_{nf} و ϕ به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب انبساط حرارتی و کسر حجمی نانوسیال می باشند [5]. اندیس f به سیال پایه اشاره دارد.

$$\rho(1 - \phi)np_{nf} \quad (6)$$

$$(C_p)_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_{np}}{(1 - \phi)(\rho)_f + \phi(\rho)_{np}} \quad (7)$$

$$(\beta)_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\beta\rho)_f + \phi(\beta\rho)_{np}}{(1 - \phi)(\rho)_f + \phi(\rho)_{np}} \quad (8)$$

برای محاسبه لزجت نانوسیال از رابطه کورچو نه (Massimo Corcione) استفاده می شود [22]. در این رابطه d_f قطر مولکولی سیال پایه و N عدد آووگادرو (Avogadro constant) و M وزن مولکولی (Molecular weight) سیال پایه است. اندیس np به نانوذره اشاره دارد.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{1 - 34.87(d_{nf}/d_f)^{-0.3}\phi^{1.03}} \quad (9)$$

$$d_f = \left[\frac{6M}{N\pi\rho_{f0}} \right] \quad (10)$$

چگالی سیال پایه در دمای ۲۹۳ کلوین می باشد. هدایت حرارتی نانوسیال k_{nf} ، به صورت مجموع هدایت حرارتی استاتیکی و هدایت حرارتی ناشی از حرکت براونی نانوذرات در نظر گرفته می شود. برای محاسبه هدایت حرارتی مؤثر استاتیکی از مدل ماکسول-گران (Maxwell-Grant model) [2] و برای اثر براونی از مدل وجها و همکاران (Vajjha et al) [23] استفاده می شود. K_b ثابت بولتزمن و d_{np} قطر نانوذره

معادلات حاکم و روش های عددی

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی با لحاظ کردن ویژگی های ترموفیزیکی نانوسیال می باشد [13]. در معادلات، اندیس nf به نانوسیال اندیس f به سیال پایه اشاره دارد. α_{nf} ضریب پخش حرارتی نانوسیال می باشد. متغیرهای بی بعد به صورت زیر تعریف می شوند. در معادلات زیر، $D_h = 2H_1$ قطر هیدرولیکی می باشد.

$$X = \frac{x}{D_h}, \quad Y = \frac{y}{D_h}, \quad U = \frac{u}{v_{in}}, \quad V = \frac{v}{v_{in}} \quad (2)$$

$$P = \frac{p}{\rho v_{in}^2}, \quad \theta = \frac{T - T_{in}}{(q'' D_h / k)}, \quad \tau = \frac{t v_{in}}{D_h} \quad (3)$$

شکل بی بعد شده معادلات به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - U \frac{Ha^2}{Re} \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{Gr}{Re^2} \theta \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr Re} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (7)$$

اعداد بی بعد حاصل، اعداد پرانتل، رینولدز و هارتمن می باشند:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad Re = \frac{\rho v_{in} D_h}{\mu}, \quad Ha = D_h B_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}, \quad Gr = \frac{g \beta q'' D_h^4}{k v^2} \quad (8)$$

معادلات حاکم با استفاده از روش تفاضل محدود حل می شوند. جملات زمانی با استفاده از روش رانگ-کوتای (Runge-Kutta) مرتبه ۳ [20]، جملات جابه جایی با استفاده از تقریب بالادستی (Upwind) مرتبه دو و جملات پخش با استفاده از تقریب مرکزی مرتبه دو روی یک شبکه جابه جا شده گسسته سازی می شوند. برای حل معادلات جریان از روش تصویرسازی (Projection method) [20,21] استفاده می شود. معادلات حاکم به صورت غیردائم تا رسیدن به حالت دائم حل می شوند. معیار

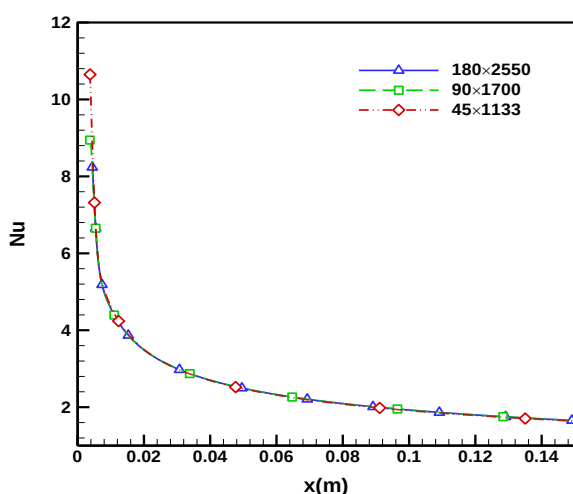
$$PEC = \frac{Nu_{nf} / Nu_f}{(C_{f,nf} / C_{f,f})^{1/3}} \quad (19)$$

استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

همانطور که قبلاً اشاره شد، هندسه مسئله میکروکانال استفاده شده در تحقیق خربیت و همکاران [5] است که ابعاد آن ذکر شده است. در شکل (۲) نتایج مطالعه شبکه برای جریان نانوسیال آب-اکسید آلومنیوم با کسر حجمی یک درصد در عدد رینولدز ۲۸۰ ارائه شده است. شبکه در راستای عرض کانال به نسبت دو برابر و در راستای طول کانال به نسبت ۱/۵ برابر ریزتر می‌شود. اختلاف نتایج در مقدار ماکزیمم عدد ناسلت مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده شبکه ۹۰×۱۷۰۰ به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌گردد.

در شکل (۳) نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی خربیت و همکاران [5] مقایسه می‌شود. با توجه به این شکل می‌توان گفت نتایج حاصل از حل عددی برای جریان نانوسیال در میکروکانال معتبر می‌باشند. مطابق شکل بلافاصله بعد از پله عدد ناسلت افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد و پس از آن در طول کانال کاهش می‌یابد.

از آنجایی که در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌ها در عدد رینولدز ۱ ارائه می‌گردد، در شکل (۴) نتایج مطالعه شبکه برای جریان نانوسیال آب-اکسید آلومنیوم در این عدد رینولدز نیز ارائه شده است. با توجه به اختلاف کم نتایج برای دو شبکه ریزتر می‌توان نتیجه گرفت که شبکه ۹۰×۱۷۰۰ شبکه مناسبی برای انجام شبیه‌سازی‌ها در عدد رینولدز ۱ می‌باشد.



شکل ۲ تغییرات عدد ناسلت در طول کانال برای شبکه‌های مختلف (Re = 280)

و برابر با ۲۸ نانومتر می‌باشد.

$$k_{nf} = k_{static} + k_{brownaian} \quad (11)$$

$$k_{nf} = k_f \left(\frac{k_{np} + 2k_f - 2\phi(k_f - k_{np})}{k_{np} + 2k_f + \phi(k_f - k_{np})} \right) + k_{brownaian} \quad (12)$$

$$k_{brownaian} = 5 \times 10^4 \times \rho_f \times \beta \times \phi \times C_{pf} \sqrt{\frac{k_b T}{\rho_{np} d_{np}}} \times f'(T, \phi) \quad (13)$$

$$f'(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} \phi + 3.917 \times 10^{-3}) \left(\frac{T}{T_0} \right) + (-3.0669 \times 10^{-2} \phi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (14)$$

T_0 بیانگر دمای مرجع می‌باشد.

محاسبه عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و معیار ارزیابی عملکرد نانوسیال

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از رابطه (۱۵) برحسب پارامترهای نانوسیال و عدد ناسلت از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شوند [24]. T_{in} دمای ورودی نانوسیال، L طول کانال بعد از پله، q'' شار اعمالی به دیواره پایین‌دست پله و T_w دمای این دیواره است. قطر هیدرولیکی کانال برابر است با $D_h = 2H_1$.

$$h = \frac{q''}{T_{bulk} - T_w} \quad (15)$$

$$T_{bulk} = T_{in} + \frac{q'' x}{\rho_{nf} v_{in} L C_{p,nf}} \quad (16)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (17)$$

ضریب اصطکاک دیواره از معادله زیر محاسبه می‌شود:

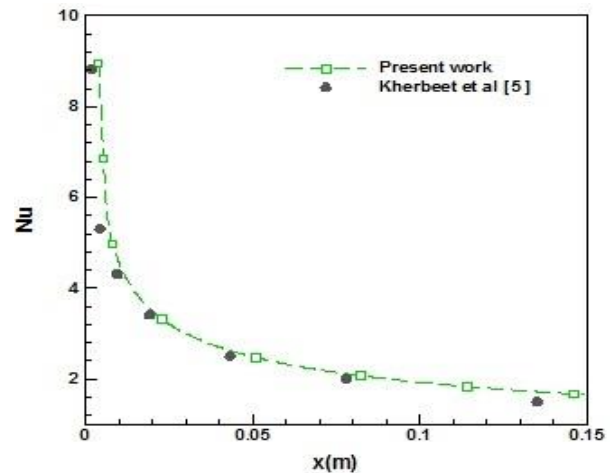
$$C_f = \frac{\mu_{nf} \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]_{y=0}}{\left(\frac{1}{2} \rho_{nf} v_{in}^2 \right)} \quad (18)$$

معادله (۱۹) معیار ارزیابی عملکرد نانوسیال نسبت به سیال پایه (آب) را تعریف می‌کند. زمانی که این کسر از عدد یک بزرگ‌تر شود بیانگر آن است که میزان انتقال حرارت بیشتر از ضریب اصطکاک است یا به عبارتی مبین میزان تأثیر بیشتر استفاده از نانوسیال نسبت به سیال خالص است [25].

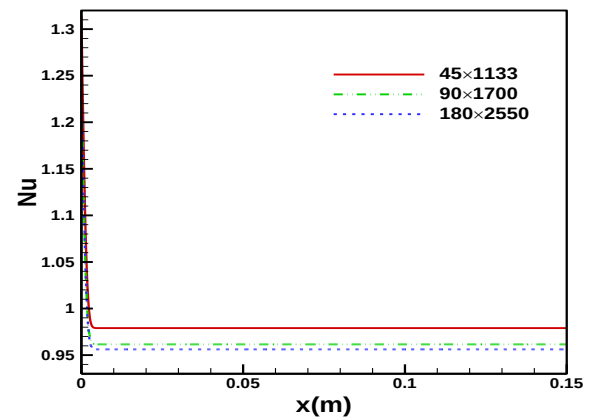
به صورت نامتقارن و در مقاطع بعدی توزیع سرعت متقارن می- باشد. در عدد رینولدز یک سرعت نانوسیال پایین بوده و بر خلاف نتایج تحقیقات در اعداد رینولدز بالا [9]، جدایش جریان از لبه تیز پله و تشکیل گردابه پشت پله اتفاق نمی افتد. با افزایش کسرحجمی در عدد رینولدز ثابت، لزجت سینماتیکی نانوسیال و در نتیجه سرعت نانوسیال افزایش می یابد. مطابق شکل، افزایش سرعت ماکزیمم نانوسیال منجر به افزایش گرادیان سرعت روی دیواره و در نتیجه افزایش تنش برشی روی دیواره می شود.

شکل (۶) توزیع سرعت در سه عدد هارتمن مختلف و کسرحجمی دو درصد را در ۴ مقطع متفاوت از کانال نمایش می دهد. با توجه به جدول (۱)، مس دارای ضریب رسانایی الکتریکی بسیار بالایی است. این مسئله باعث می شود تا نانوسیال آب-مس در کسرحجمی دو درصد دارای ضریب رسانایی الکتریکی بسیار بالایی (1194000 S/m) باشد. از آنجایی که نیروی مغناطیسی اعمالی بر واحد حجم سیال ($-\sigma_{nf} B_0 u$) [13] می باشد، نیروی بسیار زیادی در خلاف جهت جریان اعمال می گردد. این امر باعث می شود تا در در بخش قابل توجهی از عرض کانال سرعت سیال با یک کاهش قابل ملاحظه به مقدار تقریباً یکنواختی برسد. با توجه به ثابت بودن دبی حجمی در کانال شیب سرعت در نزدیک کانال به شدت افزایش می یابد. در مقطع (الف)، یک عدم تقارن در توزیع سرعت خصوصاً در اعداد هارتمن ۰ و ۲۰ مشاهده می شود که ناشی از وجود گردابه در پشت پله می باشد. در یک عدد هارتمن مشخص، با دور شدن از گردابه، در مقاطع بعدی تغییر قابل توجهی در توزیع سرعت سیال مشاهده نمی گردد.

شکل (۷) خطوط جریان در کسرحجمی دو درصد و در سه عدد هارتمن مختلف را در بخشی از کانال نشان می دهد. چنانچه ذکر شد، بر خلاف تحقیقات انجام شده در اعداد رینولدز بالا [13]، در این حالت ($Re = 1$) به دلیل سرعت پایین سیال پدیده جدایش جریان از لبه نوک تیز پله و در نتیجه تشکیل گردابه رخ نمی دهد. در این شکل با نمایش نمای بزرگی از ناحیه بعد از پله و افزایش تمرکز خطوط جریان، عدم تشکیل گردابه چه در غیاب میدان مغناطیسی و چه در حضور آن تایید شده است. چنانچه پیشتر هم ذکر شد، عمل کردن نیروی مغناطیسی اعمالی به عنوان یک نیروی مقاوم در برابر حرکت سیال باعث کاهش حداکثر سرعت نانوسیال می گردد که در این شکل نیز مشاهده می شود.



شکل ۳ مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی خربیت و همکاران [5] ($Re = 280$)



شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت در طول کانال برای شبکه های مختلف ($Re = 1$)

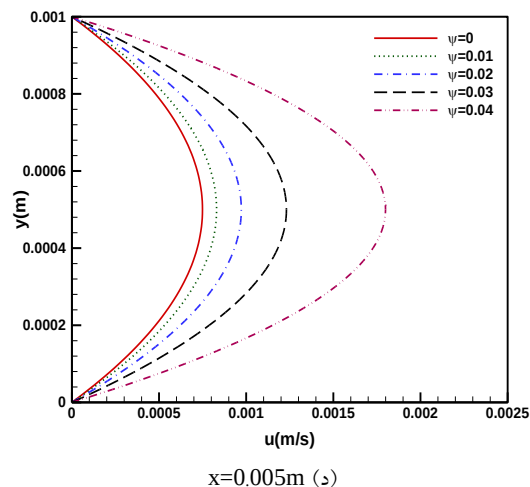
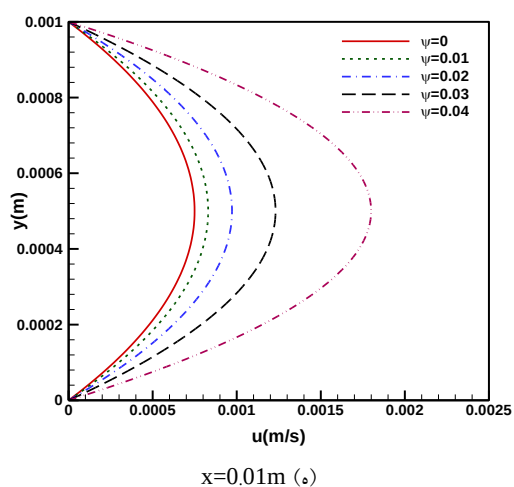
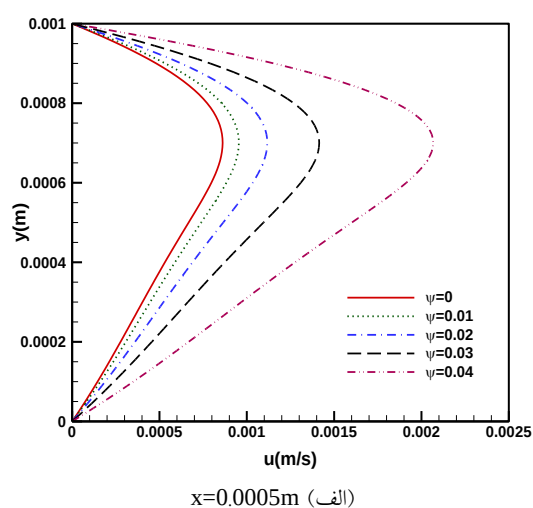
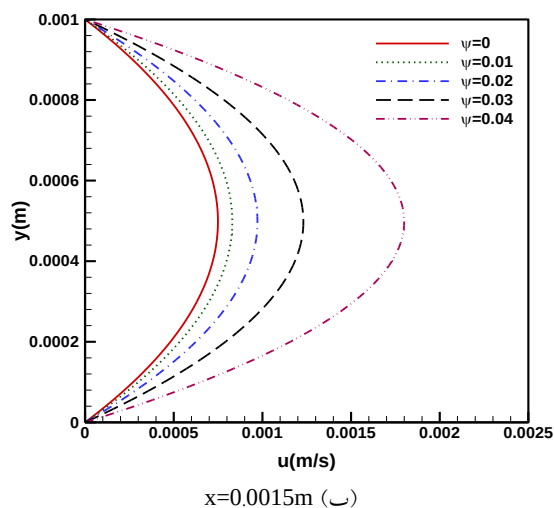
نتایج و بحث

در این بخش، تاثیر میدان مغناطیسی و کسرحجمی روی هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان نانوسیال آب-مس در عدد رینولدز پایین ($Re = 1$) بررسی می گردد. در شکل (۵) توزیع سرعت برای ۴ مقطع مختلف میکروکانال بعد از پله در غیاب میدان مغناطیسی (عدد هارتمن صفر) برای مقادیر مختلف کسرحجمی نشان داده شده است. عدد هارتمن پارامتری بعد مهم مربوط به میدان مغناطیسی می باشد $\left(Ha = D_h B_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \right)$. نمودارها ابتدا در مقاطعی نزدیک به پله و سپس با فاصله بیشتری از پله رسم شده اند. در شکل (۵-الف) که در نزدیکی پله رسم شده است به علت تغییر ناگهانی سطح مقطع توزیع سرعت

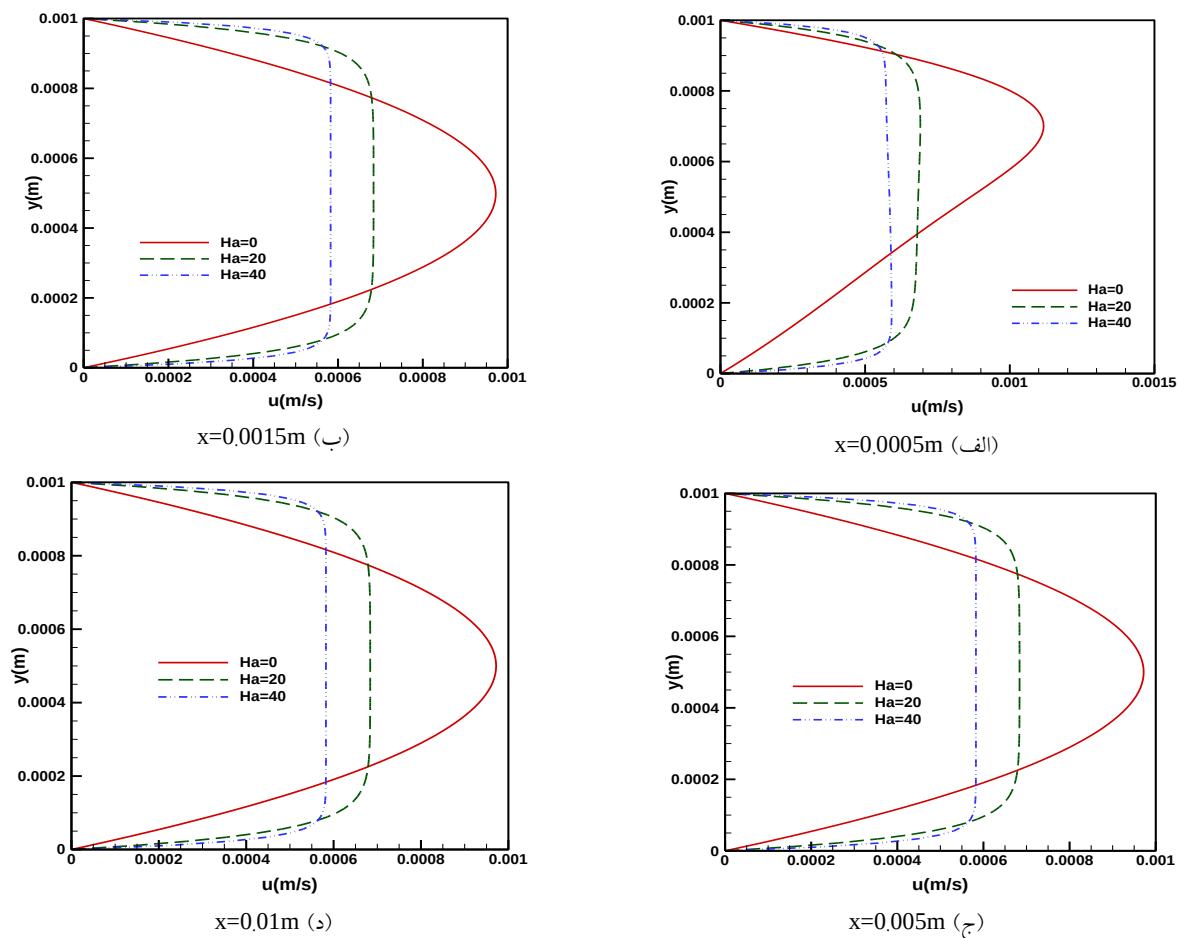
توجه در شیب سرعت در طول کانال، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. چنانچه در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، با افزایش عدد هارتمن یا به عبارتی با افزایش شدت میدان مغناطیسی، گرادیان سرعت روی دیواره افزایش می‌یابد. همانطور که در تفسیر شکل (۶) مطرح شد، علت این امر، کاهش سرعت سیال تحت اثر میدان مغناطیسی و در عین حال ثابت بودن دبی می‌باشد. در واقع، کاهش سرعت سیال در نواحی مرکزی کانال تحت اثر میدان مغناطیسی با افزایش سریع سرعت سیال در نزدیکی دیواره جبران می‌گردد. این امر منجر به افزایش ضریب اصطکاک با افزایش شدت میدان مغناطیسی می‌شود.

همچنین، چنانچه مشاهده می‌گردد نرخ کاهش سرعت ماکزیمم نانوسیال با افزایش شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل، در عدد هارتمن ۲۰ حدود ۲۰ درصد کاهش در سرعت ماکزیمم نانوسیال نسبت به عدد هارتمن صفر مشاهده می‌گردد. اما با دو برابر شدن شدت میدان مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن به ۴۰، سرعت ماکزیمم تنها حدود ۵ درصد دیگر کاهش می‌یابد.

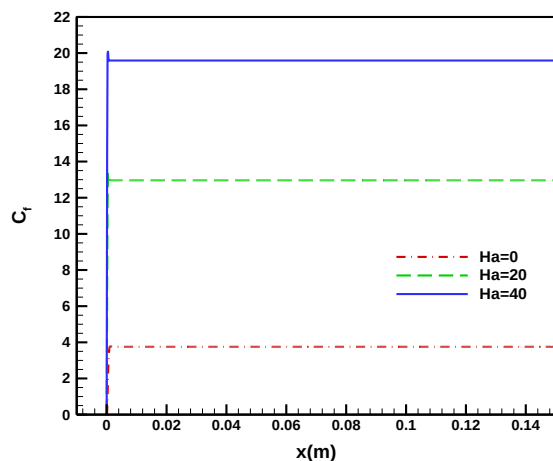
شکل (۸) توزیع ضریب اصطکاک دیواره در کسر حجمی دو درصد با افزایش عدد هارتمن را نشان می‌دهد. در عدد هارتمن و عدد رینولدز ثابت، ضریب اصطکاک تنها وابسته به گرادیان سرعت روی دیواره است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۶)، ضریب اصطکاک روی دیواره بعد از پله به دلیل عدم تغییر قابل



شکل ۵. توزیع سرعت در مقاطع مختلف کانال در غیاب میدان مغناطیسی

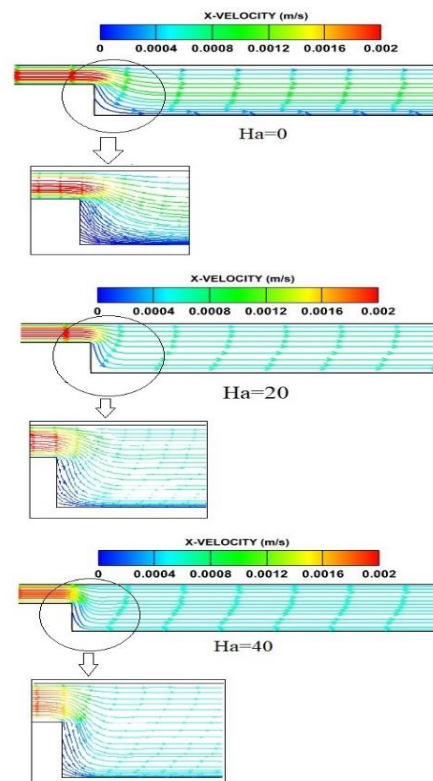


شکل ۶ توزیع سرعت در مقاطع مختلف کانال در $\psi = 0.02$



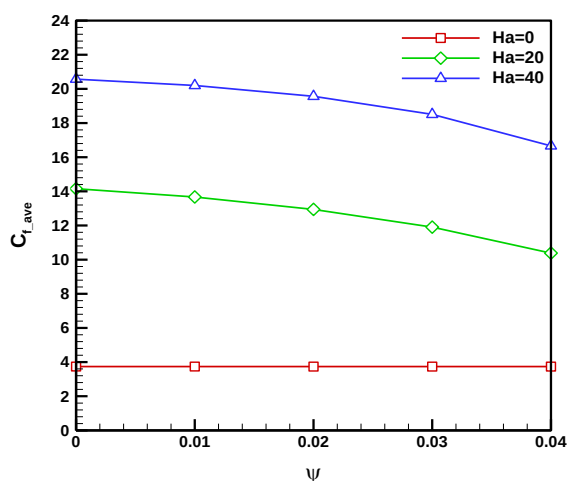
شکل ۸ تغییرات ضریب اصطکاک با عدد هارتمن ($\psi = 0.02$)

شکل (۹) تغییرات ضریب اصطکاک متوسط با افزایش کسر حجمی در سه عدد هارتمن مختلف را نشان می‌دهد. در عدد هارتمن صفر (بدون میدان مغناطیسی) افزایش کسر حجمی تأثیر ناچیزی بر روی ضریب اصطکاک دارد. مطابق شکل (۵)، با افزایش کسر حجمی گرادین سرعت و در نتیجه تنش برشی روی



شکل ۷ خطوط جریان در کسر حجمی دو درصد

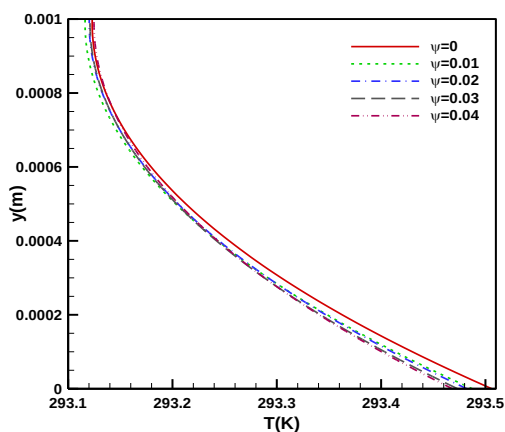
فاصله بیشتری از پله می‌باشند. در مقطع الف، اثر افزایش کسرحجمی روی کاهش گرادیان دمای دیواره مشهودتر می‌باشد.



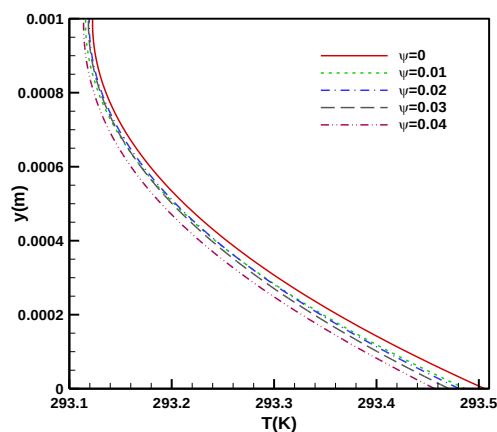
شکل ۹ تغییرات ضریب اصطکاک متوسط با کسرحجمی در اعداد هارتمن مختلف

دیواره افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش کسرحجمی در عدد رینولدز ثابت به علت افزایش لزجت سینماتیکی نانوسیال، سرعت و در نتیجه فشار دینامیکی آن افزایش می‌یابد. افزایش فشار دینامیکی سیال به گونه‌ای است که تقریباً افزایش تنش برشی را خنثی می‌کند و در نتیجه تغییری در ضریب اصطکاک با افزایش غلظت نانوذرات مشاهده نمی‌شود. در اعداد هارتمن ۲۰ و ۴۰ با افزایش کسرحجمی، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. در این حالت افزایش فشار دینامیکی سیال (ناشی از افزایش سرعت متوسط سیال) بیشتر از افزایش تنش برشی دیواره می‌باشد.

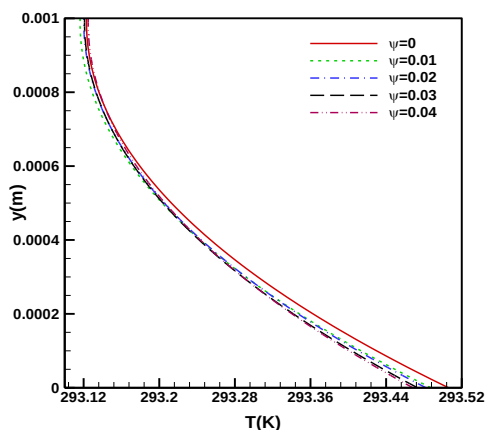
شکل (۱۰) توزیع دما در ۴ مقطع مختلف در عدد هارتمن صفر و مقادیر کسرحجمی متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، افزایش کسرحجمی سبب کاهش گرادیان دما در دیواره و در نتیجه کاهش انتقال حرارت به نانوسیال می‌شود. مقطع الف در نزدیکی پله و سایر مقاطع با



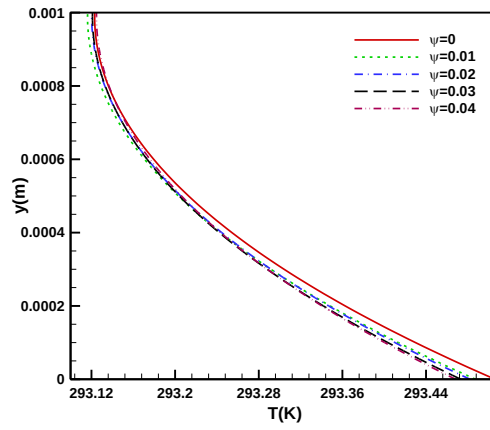
(ب) $x=0.005m$



(الف) $x=0.003m$



(د) $x=0.06m$



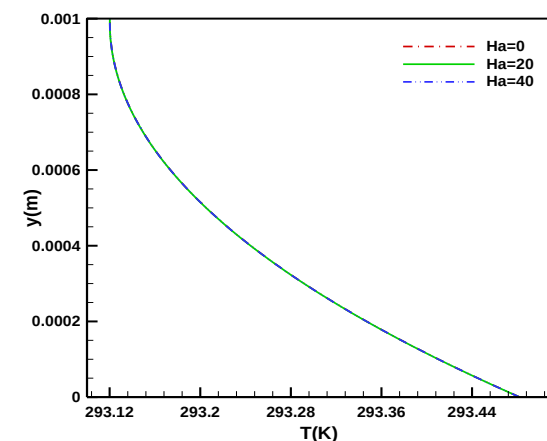
(ج) $x=0.01m$

شکل ۱۰ توزیع دما در مقاطع مختلف کانال در غیاب میدان مغناطیسی

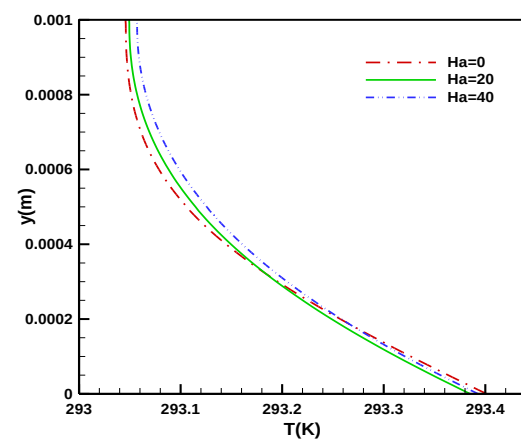
اعمال شده تأثیر قابل توجهی بر روی عدد ناسلت ندارد. علت این امر، عدم تأثیر قابل توجه میدان مغناطیسی بر توزیع دمای نانوسیال (مطابق شکل ۱۱) به علت تأثیر ناچیز مکانیزم جابه‌جایی و غالب بودن مکانیزم رسانش حرارتی در عدد رینولدز ۱ می‌باشد. این امر در تضاد با نتایج تحقیقات قبلی [13] در اعداد رینولدز بالاست که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، افزایش عدد ناسلت را نشان می‌دهند. در شکل (۱۳) نیز که تغییرات عدد ناسلت متوسط با کسرحجمی در اعداد هارتمن متفاوت را نشان می‌دهد، این مساله مشاهده می‌گردد. در عدد رینولدز ۱، با افزایش کسرحجمی گرادیان دما روی دیواره کاهش (شکل ۱۰) و ضریب رسانش حرارتی افزایش می‌یابد. با این وجود، غلبه کاهش گرادیان دما بر افزایش ضریب رسانش حرارتی باعث کاهش شار حرارتی و در نتیجه کاهش عدد ناسلت می‌گردد. این در حالی است که در اعداد رینولدز بالا، افزایش کسرحجمی نانوسیال منجر به افزایش عدد ناسلت می‌گردد [13].

شکل (۱۱) توزیع دما در کسرحجمی دو درصد در سه عدد هارتمن مختلف را در مقاطع مختلف کانال بعد از پله نشان می‌دهد. در مقطع الف (نزدیک پله) با افزایش شدت میدان مغناطیسی، گرادیان دما روی دیواره افزایش می‌یابد. در سایر مقاطع از شکل، افزایش عدد هارتمن تأثیری بر روی توزیع دما ندارد. بر اساس شکل (۶)، با اعمال میدان مغناطیسی توزیع سرعت نانوسیال تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با این وجود، به علت سرعت بسیار کم نانوسیال در عدد رینولدز ۱ مکانیزم جابه‌جایی تأثیر مهمی در انتقال حرارت ندارد و مکانیزم غالب رسانش می‌باشد. به همین دلیل در عدد رینولدز پایین، اعمال میدان مغناطیسی اثر قابل توجهی بر توزیع دمای نانوسیال ندارد.

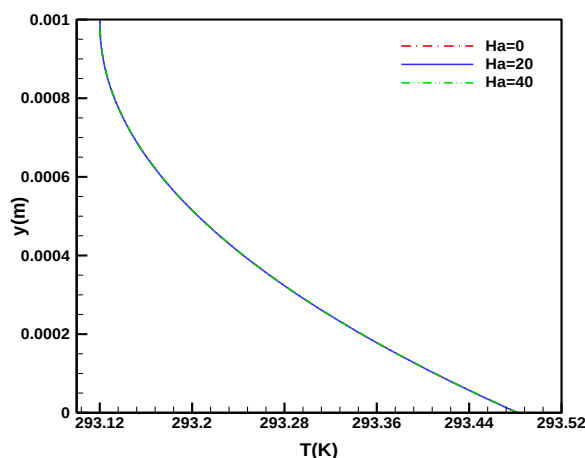
شکل (۱۲) تغییرات عدد ناسلت در طول کانال در کسرحجمی دو درصد در سه عدد هارتمن مختلف را نمایش می‌دهد. تنها بلافاصله بعد از پله مقدار عدد ناسلت با افزایش شدت میدان افزایش داشته است. بنابراین، میدان مغناطیسی



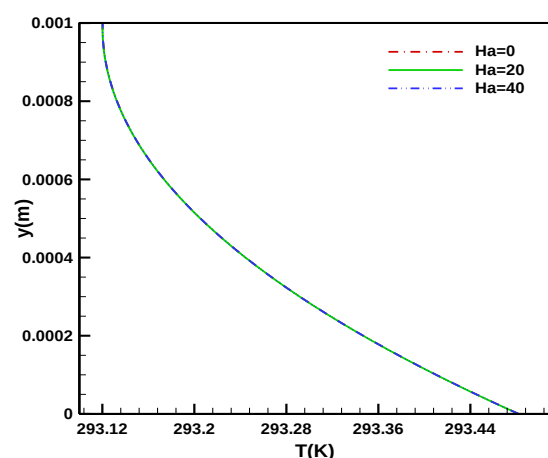
شکل ۱۱ (الف) $x=0.005m$



شکل ۱۱ (ب) $x=0.0005m$



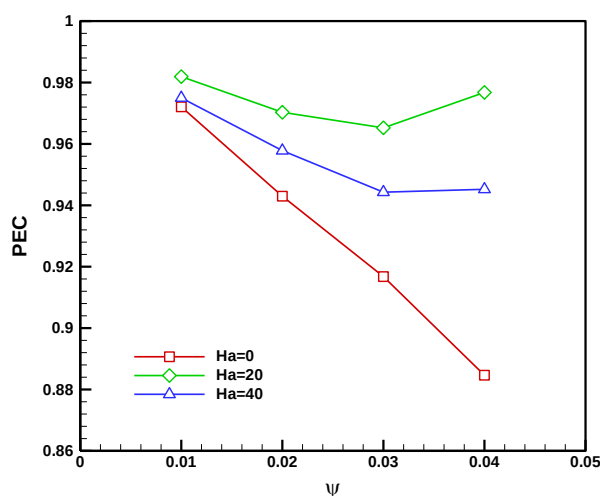
شکل ۱۱ (ج) $x=0.06m$



شکل ۱۱ (د) $x=0.01m$

شکل ۱۱ توزیع دما در مقاطع مختلف کانال در $\psi = 0.02$

که با استفاده از رابطه (۱۹) تعریف می‌شود با اعمال میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون میدان افزایش یابد.



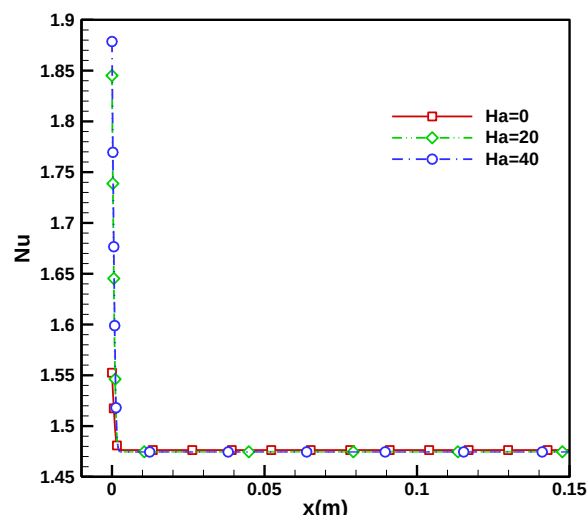
شکل ۱۴ معیار ارزیابی عملکرد نانوسیال

نتیجه‌گیری

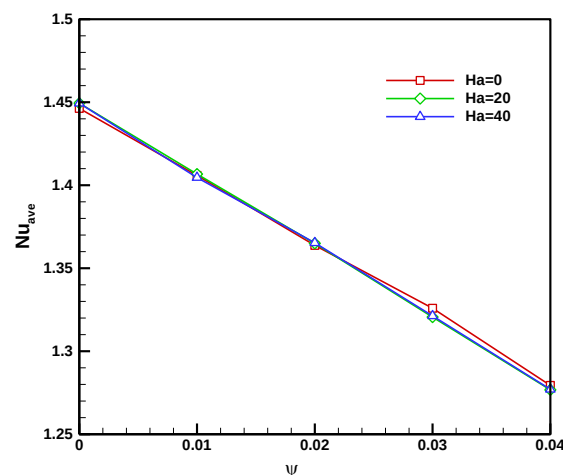
در این پژوهش اثر میدان مغناطیسی (عمود بر جهت جریان) بر هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال آب-مس در یک میکروکانال با انبساط ناگهانی یک طرفه در سرعت کم سیال (عدد رینولدز پایین) بررسی شد. معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی می‌باشند. برای اعمال اثر نانوذرات از مدل همگن استفاده گردید.

تأثیر میدان مغناطیسی بر روی بیشینه سرعت و گرادیان سرعت نزدیک دیواره است. با افزایش شدت میدان بیشینه سرعت کاهش و گرادیان سرعت نزدیک دیواره افزایش می‌یابد. اعمال میدان مغناطیسی منجر به یکنواخت شدن توزیع سرعت در نواحی مرکزی کانال می‌شود. با افزایش شدت میدان مغناطیسی در یک کسرحجمی ثابت تنش برشی دیواره و ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. در حضور میدان مغناطیسی، با افزایش کسرحجمی تنش برشی دیواره افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش کسرحجمی سرعت نانوسیال افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌شود، ضریب اصطکاک به دلیل افزایش بیشتر فشار دینامیکی نسبت به تنش برشی دیواره کاهش یابد. در اعداد رینولدز پایین، بر خلاف اعداد رینولدز بالا، گردابه‌ای بعد از پله تشکیل نمی‌گردد.

در اعداد رینولدز پایین، بر خلاف اعداد رینولدز بالا، با افزایش کسرحجمی گرادیان دمای سیال روی دیواره و در نتیجه



شکل ۱۲ تغییرات عدد ناسلت در طول کانال برای اعداد هارتمن مختلف ($\psi = 0.02$)



شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط با کسرحجمی در اعداد هارتمن مختلف

شکل (۱۴) تغییرات ضریب معیار ارزیابی عملکرد نانوسیال را با کسرحجمی و عدد هارتمن نشان می‌دهد. با افزایش کسرحجمی تا کسرحجمی ۳ درصد ضریب عملکرد کاهش می‌یابد. تنها در حضور میدان مغناطیسی، با افزایش کسرحجمی از ۳ درصد به ۴ درصد مقداری افزایش در ضریب عملکرد مشاهده می‌شود. مطابق شکل (۹)، تحت اثر میدان مغناطیسی، کاهش بیشتری در مقدار ضریب اصطکاک متوسط با افزایش کسرحجمی نسبت به حالت بدون میدان مشاهده می‌گردد. این در حالی است که مطابق شکل (۱۳) روند تغییرات عدد ناسلت با کسرحجمی در هر دو حالت با میدان و بدون میدان تقریباً یکسان است. این امر باعث می‌شود که ضریب عملکرد سیستم

عملکرد سیستم می‌گردد. تا که سرجمی ۳ در صد، با افزودن غلظت نانوذرات ضریب عملکرد سیستم کاهش می‌یابد.

عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین، بر خلاف اعداد رینولدز بالا که اعمال میدان منجر به افزایش عدد ناسلت می‌گردد، در این حالت میدان مغناطیسی تأثیری بر روی گرادیان دمای سیال و در نتیجه عدد ناسلت ندارد.

در اعداد رینولدز پایین اعمال میدان مغناطیسی، در مقایسه با زمانی که از آب به عنوان سیال استفاده می‌شود، منجر به بهبود

تقدیر و تشکر

مراجع

- [1] S. K. Bala, L. K. Saha, M. A. Hossain, "Simulation of forced convection in a channel containing three obstacles over backward and forward facing steps by LBM," *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, vol. 5, pp. 1-19, 2019.
- [2] J. C. Maxwell, Eds, "A Treatise on Electricity and Magnetism," Oxford: Clarendon press, 1873.
- [3] S. U. Choi, J. A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME Conference, USA*, pp. 99-105, (1995).
- [4] O. Mahian, L. Kolsi, M. Amani, P. Estellé, G. Ahmadi, C. Kleinstreuer, J. S. Marshall, M. Siavashi, R.A. Taylor, H. Niazmand, S. Wongwises, "Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory," *Physics Reports*, vol. 790, pp.1-48, 2019.
- [5] A. Sh. Kherbeet, H. A. Mohammed, B. H. Salman, H. E. Ahmed, O. A. Alawi, "Experimental and numerical study of nanofluid flow and heat transfer over microscale backward-facing step," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 79, pp. 858-867, 2014.
- [6] F. Selimefendigil, H. F. Öztop, "Forced convection and thermal predictions of pulsating nanofluid flow over a backward facing step with a corrugated bottom wall," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 110, pp. 231-247, 2017.
- [7] H. A. Mohammed, F. Fathinia, H. B. Vuthaluru, S. Liu, "CFD based investigations on the effects of blockage shapes on transient mixed convective nanofluid flow over a backward facing step," *Powder Technology*, vol. 346, pp. 441-451, 2019.
- [8] H. Moayedi, "Numerical investigation of the effect of oscillating injection nanofluid flow on forced convection heat transfer enhancement over a backward-facing step," *The European Physical Journal Plus*, vol. 135, pp. 924, 2020.
- [9] P. Pournaderi, M. Aram, "Numerical investigation of nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step," *Engineering and Applied Science Research*, vol. 47, pp. 401-413, 2020.
- [10] D. Yang, B. Sun, T. Xu, B. Liu, H. Li, "Experimental and numerical study on the flow and heat transfer characteristic of nanofluid in the recirculation zone of backward-facing step microchannels," *Applied Thermal Engineering*, vol. 199, pp.117527, 2021.
- [11] T. Onishi, T. Yamamoto, "Numerical Analysis of Effects of Aspect Ratio of Rod-like Nanoparticles on Thermal and Flow Behavior of Nanofluids in Backward-facing Step Flows," *Nihon Reoroji Gakkaishi*, vol. 50, pp.323-332, 2022.
- [12] J. Hartmann, F. Lazarus., "Experimental investigations on the flow of mercury in a homogeneous magnetic field," *Munksgaard*, 1937.

- [13] F. Selimefendigil, H. Oztop, "Influence of inclination angle of magnetic field on mixed convection of nanofluid flow over a backward facing step and entropy generation," *Advanced Powder Technology*, vol. 26, pp. 1663–1675, 2015.
- [14] Z. Mehrez, A. E. Casfi, "Forced convection magnetohydrodynamic Al_2O_3 -Cu/water hybrid nanofluid flow over a backward-facing step," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 135, pp. 1417–1427, 2018.
- [15] F. Selimefendigil, C. S. Ozkan, H. Oztop, "Electrical conductivity effect on MHD mixed convection of nanofluid flow over a backward-facing step," *Journal of Central South University*, vol. 26, pp. 1133–1145, 2019.
- [16] S. Hussain, S. E. Ahmed, "Unsteady MHD forced convection over a backward facing step including a rotating cylinder utilizing Fe_3O_4 -water ferrofluid," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 484, pp. 356-366, 2019.
- [17] B. P. Geridönmez, H. F. Öztop, "Effects of inlet velocity profiles of hybrid nanofluid flow on mixed convection through a backward facing step channel under partial magnetic field," *Chemical Physics*, vol. 540, pp. 111010, 2020.
- [18] T. D. Manh, A. M. Abazari, M. Barzegar Gerdroodbary, N. D. Nam, R. Moradi, H. Babazadeh, "Computational simulation of variable magnetic force on heat characteristics of backward-facing step flow," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 144, pp. 1585-1596, 2021.
- [19] K. Ghachem, F. Selimefendigil, B. M. Alshammari, C. Maatki, L. Kolsi, "Coupled Effects of Using Magnetic Field, Rotation and Wavy Porous Layer on the Forced Convection of Hybrid Nanoliquid Flow over 3D-Backward Facing Step," *Nanomaterials*, vol. 12, p. 2466, 2022.
- [20] P. Pournaderi, M. Deilami, "Modeling nanofluid droplet impingement on a superheated surface," *Powder Technology*, vol. 381, pp. 68-81, 2021.
- [21] P. Pournaderi, A. R. Pishevar, "A numerical investigation of droplet impact on a heated wall in the film boiling regime," *Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 1525-1538, 2012.
- [22] M. Corcione, "Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 1536-1546, 2010.
- [23] R. S. Vajjha, D. K. Das, "Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 4675-4682, 2009.
- [24] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D.P. DeWitt, *Introduction to heat transfer*, John Wiley & Sons, 2011. [E-book] Available: books.google.com.
- [25] A. K. Hilo, A. A. Iborra, M. T. H. Sultan, M. F. A. Hamid, "Experimental study of nanofluids flow and heat transfer over a backward-facing step channel," *Powder Technology*, vol. 372, pp. 497-505, 2020.



**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**

Modeling and Simulation of Growth in Diastolic Heart Failure

Research Article

Pezhman Namashiri¹, Akbar Allahverdizadeh² , Behnam Dadashzadeh³

DOI: [10.22067/jacsm.2023.81490.1173](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81490.1173)

1. Introduction

Diastolic heart failure is a multiscale phenomenon that gradually impacts upon different scales of the heart and increases the thickness of the ventricular walls and is associated with concentric hypertrophy. In this study, myocardium growth caused by diastolic heart failure disease was modeled using the finite growth kinematics approach in an idealized biventricular geometry. Myocardium microstructure is defined by a mathematical method. The presented approach for implementing finite growth kinematic equations in COMSOL Multiphysics software is new and unlike previous approaches. It does not require coding or the use of secondary software. The approach was compared and validated with previous studies.

2. Method

First, the local coordinate system of the myocardium was defined. The local coordinate system includes the longitudinal, circumferential and radial directions of the heart, which were determined using two interfaces of the curvilinear coordinate system in COMSOL Multiphysics. Each interface was used for one of the ventricles of the biventricular geometry. After defining the local coordinate system, the distance between the two layers of epicardium and endocardium was calculated using two wall distance interfaces and a variable was defined which was normalized and its value was equal to 0 in epicardium and 1 in endocardium. By using the determined variable, the angle of the fibers was changed linearly from the epicardium to the endocardium from -60 degrees to 60 degrees. Figure 1 shows the orientation of fibers vector. The orientation of the sheets vector of the myocardium microstructure was considered perpendicular to the surfaces of the epicardium and endocardium and in the radial direction of the heart.

By using the finite growth kinematics approach to model the growth of diastolic heart failure, the deformation gradient tensor according to Equation 1 is multiplicatively decomposed into two components:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_g \quad (1)$$

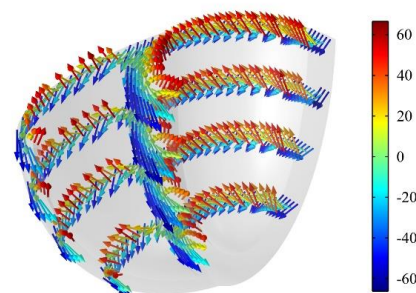


Figure 1. Orientation of the fibers
(the color bar indicates the angle of the fibers in degrees.)

Where $\mathbf{F}_e$ is the elastic deformation tensor and $\mathbf{F}_g$ is the growth deformation tensor. The growth deformation tensor describes the deformation of the tissue from the reference configuration to the intermediate configuration and the elastic deformation tensor describes the deformation of the tissue from the intermediate configuration to the deformed configuration. Therefore, the calculations are based on the elastic deformation tensor. In this study, the property of myocardium is considered to be transversely isotropic, in which the tissue exhibits different stiffness in the direction of the fibers. In order to model the growth of diastolic heart failure, the growth deformation tensor should be defined manually by the user in the governing equations section of the solid mechanics interface in COMSOL Multiphysics software as:

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{I} + (\vartheta_g - 1) \hat{\mathbf{S}} \otimes \hat{\mathbf{S}} \quad (2)$$

where the variable ϑ_g is the growth multiplier and $\hat{\mathbf{S}}$ is the sheet vector, and $\mathbf{I}$ represents the identity tensor.

3. Validation

For validation, isotropic growth and compressible Neo-Hookean passive mechanics are used. Two types of simulations are performed. In the first type, the new approach presented in this study is used to define the growth equations in COMSOL Multiphysics, and in the second type, the

*Manuscript received: March 6, 2023, Revised, April 5, 2023. Accepted, May 21, 2023.

¹ MSc, Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

² Corresponding author. Assistant professor, Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

³ Assistant professor, Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

previous approach is utilized. The validation result is depicted in Figure 2. As can be seen, the results of both approaches are similar and the equations of finite growth kinematics are correctly implemented in the COMSOL Multiphysics software.

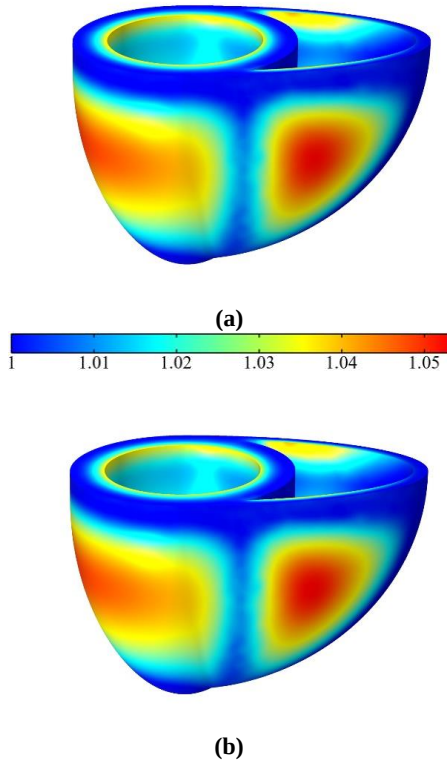


Figure 2. Validation of the implementation of growth equations in COMSOL Multiphysics using the approach of this study (a) and the previous approach (b) (the color bar shows the growth multiplier)

4. Results

As Figure 3 shows the growth of a cardiomyocyte that is located at mid-apicobasal distance of the left ventricular endocardium free wall, and the changes in the thickness of the left ventricular free wall in normalized time are shown. According to this figure, at the beginning of the simulation, the cardiomyocyte did not grow because the Kirchhoff stress was lower than the homeostatic stress. As the Kirchhoff stress increases from the homeostatic stress, the growth multiplier increases and sarcomeres are added in parallel and the cardiomyocyte thickness increases. According to the way the thickness of the wall changes, initially the thickness decreases because the pressure is being applied to the endocardium, then, despite that the applied pressure to the endocardium is still increasing, the thickness of the wall increases instead of decreasing. This indicates the beginning of growth in myocardium wall. Until the time of 0.09, due to the low wall stress, the amount of increase in thickness takes place at a low speed, and after that time and with the increase of the wall stress, the growth and as a result the wall thickness increases at a faster rate. At the end of the simulation, the thickness of the left ventricular free wall increased by 35%.

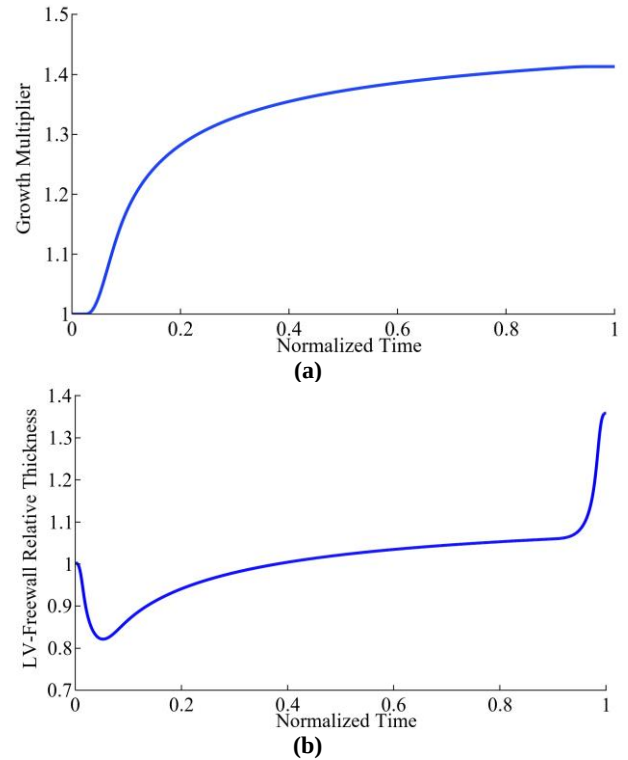


Figure 3. Growth multiplier of a cardiomyocyte that is located at mid-apicobasal distance of the left ventricular endocardium free wall (a) and changes in the thickness of the left ventricular free wall (b)

5. Conclusion

Since the multiplicative decomposition of the deformation gradient tensor for growth modeling is computationally complicated and it is difficult to implement it in finite element software and requires coding or the use of secondary software. In this study, an approach to implement finite growth kinematic equations for diastolic heart failure by utilizing an idealized biventricular geometry and defining tissue microstructure using a mathematical method was presented in COMSOL Multiphysics software, which does not require coding and can be easily implemented in this software. The results of concentric hypertrophic growth with Kirchhoff stress as the growth stimulus were able to simulate the increase in the thickness of the left ventricular free wall along with a relatively constant size of the ventricles in diastolic heart failure. These results showed that the presented approach can correctly simulate the growth of the myocardium and can be utilized in the future to simulate various heart diseases.



مدل سازی و شبیه سازی رشد در نارسایی قلبی دیاستولیک*

مقاله پژوهشی

پژمان نمه شیر^(۱) اکبر الله وردی زاده^(۲) بهنام داداش زاده^(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81490.1173

چکیده نارسایی قلبی یکی از بیماری های قلبی-عروقی است که باعث تغییر در ساختار قلب شده و برون ده قلبی را کاهش می دهد. این بیماری می تواند به دو دسته نارسایی قلبی دیاستولیک و سیستولیک تقسیم شود. در نارسایی قلبی دیاستولیک ضخامت دیواره های بطنی افزایش یافته و مرتبط با هایپرتروفی کانستریک است. در این پژوهش، هایپرتروفی کانستریک ناشی از افزایش بیش از حد فشار در نظر گرفته شده است که در اثر آن، تعداد سارکومرها به صورت موازی بیشتر شده و در نتیجه باعث افزایش نسبی سطح عرضی کاردیومیوسیت می شود. معادلات پیوسته هایپرتروفی کانستریک با به کارگیری هندسه دوبطنی ایده آل شده، در نرم افزار کامسول مولتی فیزیک پیاده سازی شده است که رویکرد ارائه شده برای پیاده سازی روابط، کاملاً جدید بوده و برتری های بنیادی نسبت به رویکرد پیشین دارد و همچنین نیازمند کدنویسی نبوده و به راحتی در یک نرم افزار المان محدود پیاده سازی می شود. نتایج شبیه سازی نشان داد که ضخامت دیواره های بطنی افزایش یافته و حجم محفظه های بطنی کاهش می یابد. نتایج مذکور منطبق بر ملاحظات بالینی از بیماری بوده و نشان می دهد که مدل سازی محاسباتی می تواند به عنوان ابزاری قدرتمند برای افزایش شناخت متخصصان از بیماری هایی که نرخ مرگ و میر بالایی دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی رشد، بیماری های قلبی، مدل سازی محاسباتی، روش المان محدود.

Modeling and Simulation of Growth in Diastolic Heart Failure

Pezhman Namashiri Akbar Allahverdizadeh Behnam Dadashzadeh

Abstract Heart failure is one of the cardiovascular diseases that causes changes in the structure of the heart and reduces the output of the heart. This disease can be divided into two categories: diastolic and systolic heart failure. In diastolic heart failure, the thickness of the ventricular walls increased and is associated with concentric hypertrophy. In this study, concentric hypertrophy is considered to be caused by pressure overload, as a result of which, the number of sarcomeres increases in parallel, and as a result, causes a relative increase in the transverse area of the cardiomyocytes. Continuum equations of concentric hypertrophy by using an idealized biventricular geometry have been implemented in COMSOL Multiphysics software, the approach presented for implementing the equations is completely new and has fundamental advantages over the implementation of the previous approach, and does not require coding and can be easily implemented in a finite element software. The results of the simulation showed that the thickness of the ventricular walls increases and the volume of the ventricular chambers decreases. The mentioned results are consistent with the clinical observations of the disease and shows that computational modeling can be used as a powerful tool to increase specialist's knowledge of diseases that have a high mortality rate.

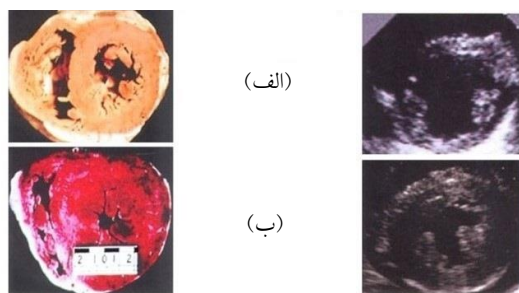
Key Words Growth, Heart Diseases, Computational Modeling, Finite Element Method.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۲/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۳۱ می باشد.

(۱) دانش آموزته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی میکاترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی میکاترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. Email: allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

(۳) استادیار، گروه مهندسی میکاترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.



شکل ۱. برش عرضی قلب انسان نرمال (الف) و دارای نارسایی دیاستولیک (ب) در سمت چپ به همراه تصویر اکوکاردیوگرافی در سمت راست [3]

رودریگز و همکاران [7]، برای اولین بار رویکردی برای نحوه مدل سازی رشد را پیشنهاد دادند که رشد حجمی محدود (Finite Volumetric Growth) نامیده شد. رویکرد آن ها بر مبنای تجزیه تانسور گرادین تغییر شکل به صورت ضربی به دو جزء الاستیک و رشد بود که در آن تانسور تغییر شکل رشد، تغییر شکل بافت را از پیکربندی مرجع به پیکربندی میانی (Intermediate Configuration) توصیف می کند و تانسور الاستیک، تغییر شکل بافت را از پیکربندی میانی به پیکربندی تغییر شکل یافته (Deformed Configuration) توصیف می کند. هیمپل و همکاران [8] معادلات رشد را به طور دقیق تری بیان کردند و رشد را به منزله تغییر در جرم معرفی کردند و بیان نمودند که رشد به دو صورت تغییر حجم و تغییر جرم صورت می گیرد. آن ها، رشد ایزوتروپیک چگالی ثابت را در حالت یک بعدی و سه بعدی مورد بررسی قرار دادند که در شبیه سازی سه بعدی از یک استوانه به عنوان هندسه استفاده شده بود و در آن، رشد، در بارگذاری یکنواخت و غیر یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته بود. آن ها برای بیان تغییرات رشد در زمان، از معادلات تکاملی استفاده کردند که در آن، محرک رشد وابسته به تنش مندل (Mandel) بود.

شبیه سازی رشد در قلب انسان با استفاده از تئوری رشد حجمی محدود به طور گسترده، برای اولین بار توسط گوکته و همکاران [6,7] انجام شد. آن ها روابط مرتبط با شبیه سازی رشد را در انواع مختلف هایپرتروفی به طور منظم تری استخراج کردند و عملکرد معادلات ارائه شده را در سه مثال با استفاده از هندسه ایده آل شده دوبطنی نشان دادند. آن ها در ابتدا به بیان معادلات سینماتیک رشد پرداختند [8]. در ادامه معادلات ساختاری رشد را ذکر کردند و یک حالت ارتوتروپیک کلی برای تانسور تغییر شکل رشد معرفی نمودند که وابسته به جهت فیبر، شیت (Sheet) و عمود بر شیت بود که با توجه به نوع رشد حالت ایزوتروپیک

مقدمه

نارسایی قلبی بیماری است که در آن، قلب نمی تواند جریان خون لازم برای بافت ها و ارگان های بدن را به درستی پمپ کند [1]. این بیماری یک مشکل در حال رشد در سرتاسر جهان است که شیوع آن به صورت نمایی همراه با افزایش سن بیشتر شده و ۶ تا ۱۰٪ افراد بالای ۶۵ سال را تحت تأثیر قرار می دهد [2]. متخصصان قلب به طور معمول نارسایی قلبی را به دو دسته تقسیم می کنند: نارسایی قلبی دیاستولیک (Diastolic Heart Failure) و نارسایی قلبی سیستولیک (Systolic Heart Failure). نارسایی قلبی دیاستولیک با هایپرتروفی کانستریک (Concentric Hypertrophy) همراه است و باعث اختلال در پر شدن قلب می شود و افزایش احتمال ایست قلبی را به دنبال دارد [3].

هایپرتروفی حالتی است که در آن اندازه کاردیومیوسیت ها افزایش می یابد. در شرایط پاتولوژی مختلف، کاردیومیوسیت ها رفتار متفاوتی از خود بروز می دهند. در هنگام افزایش بیش از حد فشار در بطن، تنش دیواره های بطنی افزایش یافته و باعث اضافه شدن سارکومرهای جدید به صورت موازی به سارکومرهای قبلی می شوند که این سارکومرهای جدید باعث افزایش سطح عرضی کاردیومیوسیت ها می شوند [4]. در این حالت در مقیاس ماکروسکوپی ضخامت دیواره بطنی افزایش یافته و اصطلاحاً، بافت قلب دچار رشد شده است و به این حالت از هایپرتروفی، هایپرتروفی کانستریک گفته می شود. در شکل (۱) برش عرضی از کالبدشکافی قلب انسان نرمال و دارای نارسایی قلبی دیاستولیک نشان داده شده و می توان مشاهده نمود که در این بیماری دیواره های بطنی به طور قابل توجهی ضخیم تر می شوند و همچنین حجم محفظه های بطنی کاهش می یابند. رفتار مذکور در تصاویر اکوکاردیوگرافی در سمت راست شکل مذکور نیز قابل مشاهده است.

در واقع نارسایی قلبی دیاستولیک یک پدیده چند مقیاسی است که به تدریج در مقیاس های مختلف منتشر شده و باعث تغییر در ساختار و عملکرد قلب می شود و در نهایت برون ده قلبی را تحت تأثیر قرار می دهد. نارسایی قلبی دیاستولیک در مقیاس مولکولی با اضافه شدن سارکومر به صورت موازی آغاز می شود. در مقیاس سلولی، باعث افزایش عرض کاردیومیوسیت ها شده و این تغییرات در مقیاس ارگانی باعث ضخیم شدن دیواره بطن ها می شود [5].

فیبر بود که در شبیه‌سازی رشد کانستریک، رشد در جهت عرض فیبر بود و سارکومرها به‌صورت موازی اضافه می‌شدند. آن‌ها مدل رشد ارائه شده را برای شبیه‌سازی رشد کانستریک و اکستریک بطن چپ و راست و با استفاده از هندسه چهار محفظه‌ای قلب واقع‌گرایانه انسان بکار بردند.

بیانکو و همکاران [12] از معادلات رشد هایپرتروفی کانستریک استفاده کردند که در آن تانسور تغییر شکل رشد وابسته به جهت شیت‌ها و محرک رشد تنش مندل بود. لازم به ذکر است که آن‌ها هایپرتروفی کانستریک را ناشی از تنگی دریچه آئورتی فرض کردند و نتایج آن‌ها از حلقه فشار-حجم نشان داد که فشار در حالت تنگی دریچه آئورتی بدون رشد بافت، بیشتر از حالتی است که تنگی دریچه همراه با در نظر گرفتن رشد بافت است و به‌طور کلی در هر دو حالت فشار بطن از حالت نرمال به مراتب بیشتر است.

یوشیدا و همکاران [13] اصلاحاتی بر روی مدل ارائه شده توسط کیرشهف و همکاران [10] انجام دادند تا رفتار مدل را با داده‌های تجربی جدید از قلب سگ منطبق کنند. آن‌ها مدل مذکور را برای شبیه‌سازی رشد کانستریک ناشی از فشار بیش از حد در هندسه دوبطنی واقع‌گرایانه از سگ مورد استفاده قرار دادند و بیشتر بر روی برعکس شدن رشد بعد از درمان فشار بیش از حد بطنی پرداختند و نتایج آن‌ها با مشاهدات تجربی از قلب سگ از نظر کیفی منطبق بود.

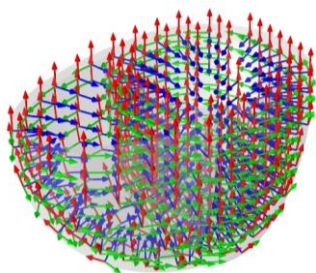
در این پژوهش، رشد هایپرتروفی کانستریک که مرتبط با بیماری نارسایی قلبی دیاستولیک است، با استفاده از تئوری رشد حجمی محدود و به‌کارگیری مکانیک منفعل قلب مدل‌سازی شده است. مدل بر روی هندسه دوبطنی ایده‌آل شده پیاده شده است که در آن ساختار ریز با استفاده از روش ریاضیاتی تعریف شده است. همچنین، روش جدیدی برای پیاده‌سازی روابط سینماتیک رشد در کامسول مولتی فیزیک (COMSOL Multiphysics) معرفی شده است که توسط آن می‌توان رشد را به راحتی در این نرم‌افزار پیاده‌سازی نمود. اعتبارسنجی روش جدید با رویکرد تحقیقات پیشین انجام گرفته است که می‌تواند مدل‌سازی‌های پیچیده‌تر رشد در کامسول و بسط دادن مدل موجود را در آینده راحت‌تر کند.

عرضی آن بکار برده می‌شد. در ادامه، راش و همکاران [9] با به‌کارگیری هندسه دوبطنی ایده‌آل شده به مدل‌سازی بیماری افزایش فشارخون سیستمی و ریوی پرداختند و رشد هایپرتروفی کانستریک را در بطن چپ برای افزایش فشارخون سیستمی و در بطن راست برای افزایش فشارخون ریوی شبیه‌سازی کردند. معادله تکاملی در مدل آن‌ها وابسته به تنش مندل بود و تانسور تغییر شکل رشد را به‌صورت ایزوتروپیک عرضی و فقط وابسته به جهت شیت‌ها در نظر گرفتند.

کیرشهف و همکاران [10] تانسور تغییر شکل رشد و معادله-ی تکاملی آن را به‌صورتی بیان کردند که در فشار بیش از حد بطنی که رشد هایپرتروفی کانستریک اتفاق می‌افتد، وابسته به جهت طولی فیبر، عرض فیبر و عمود بر جهت طولی و عرضی فیبر باشند. در واقع در رویکرد آن‌ها در رشد کانستریک، سارکومرها هم به‌صورت سری و هم موازی در جهت فیبرها، عرض فیبرها و عمود بر جهت طولی و عرضی فیبرها اضافه می‌شدند. در همان تحقیق، آن‌ها معادلات ارائه شده‌ی رشد را در یک مدل چند مقیاسی با هندسه قلب سگ بکار بردند و هایپرتروفی کانستریک و اکستریک را به‌ترتیب به دلیل بیماری تنگی دریچه آئورتی و بازگشت خون از دریچه میترا شبیه‌سازی کردند و نتایج آن‌ها از نظر ساختار و عملکرد قلب در بیماری‌های مربوطه، مطابق با داده‌های تجربی گزارش شده بود.

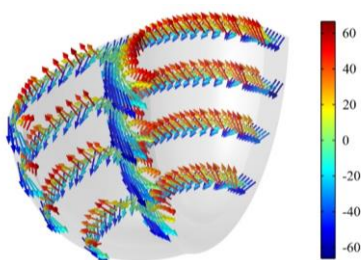
بربراولو و همکاران [11] با تغییر مقادیر پارامترهای سرعت رشد و بیشینه ضریب رشد بافت در معادله تکاملی رشد، از آن برای شبیه‌سازی هایپرتروفی اکستریک و کانستریک استفاده کردند و بعد از شبیه‌سازی رشد، مدل رشد کرده بافت را در یک سیکل مدل الکترومکانیکال بکار گرفتند تا تغییرات حلقه فشار-حجم قلب را در اثر رشد، برای بیماری هایپرتروفی اکستریک و کانستریک نشان دهند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌سازی رشد بافت برای افزایش شناخت تغییرات ساختاری قلب در بیماری‌های مختلف تأثیرگذار می‌باشد.

جنت و همکاران [5] نیز به مدل‌سازی بیماری نارسایی قلبی با به‌کارگیری معادلات رشد محدود پرداختند. آن‌ها نیز نارسایی قلبی دیاستولیک را با رشد هایپرتروفی کانستریک مرتبط دانستند و نوع جدیدی از تانسور تغییر شکل رشد و معادله تکاملی ارائه دادند که ایزوتروپیک عرضی بوده و فقط مرتبط با جهت عرضی



شکل ۲ سیستم مختصات محلی در مدل (بردارهای قرمز، سبز و آبی به ترتیب جهت طولی، محیطی و شعاعی قلب را نشان می‌دهند)

بعد از تعیین سیستم مختصات محلی هندسه دوبطنی، حال لازم است تا با کمک آن، جهت گیری فیبرها و شیت‌ها تعریف گردند. از آنجایی که زاویه فیبرها در جهت ترانسموال میوکاردیوم تغییر می‌کند، در ابتدا فاصله سطوح اپیکاردیوم و اندوکاردیوم بطن‌ها از یکدیگر نرمالیزه می‌شوند و با کمک آن تغییرات زاویه فیبرها در مدل لحاظ می‌شود [14]. با استفاده از دو عدد رابط فاصله دیوار (Wall Distance Interface) در کامسول، فاصله دو لایه اپیکاردیوم و اندوکاردیوم محاسبه شد و متغیری تعریف گردید که نرمالیزه بوده و مقدار آن در اپیکاردیوم برابر صفر و در اندوکاردیوم برابر یک بود. با به کارگیری متغیر تعیین شده، زاویه فیبرها به صورت خطی از اپیکاردیوم به اندوکاردیوم تغییر داده شد. جهت گیری شیت‌ها، در همان جهت شعاعی سیستم مختصات محلی و عمود بر سطوح اپیکاردیوم و اندوکاردیوم فرض شد. جهت گیری فیبرها در قسمت‌های مختلف هندسه دوبطنی در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳ تغییرات جهت گیری فیبرها در مدل (نوار رنگ زاویه فیبرها را بر حسب درجه نشان می‌دهد).

سینماتیک رشد محدود

در این پژوهش، برای مدل سازی تغییرات ساختار قلب در بیماری نارسایی قلبی، از سینماتیک رشد محدود استفاده شده است. فرض کنید که تغییر شکل، $\varphi(X, t)$ ، نقاط را از پیکربندی مرجع،

مواد و روش‌ها

آناتومی درشت و ساختار ریز قلب

هندسه دوبطنی ایده آل شده از ابعاد قلب انسان در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دو بیضی برای ساخت بطن چپ و از دو بیضی برای ساخت بطن راست استفاده شد و سپس بیضی‌ها نصف شده و دو بطن با همدیگر ادغام شدند [14]. لازم به ذکر است در قسمت رأس، یک استوانه با قطر ۱ سانتی متر طراحی شد تا خاصیت بافت در آن ناحیه، ایزوتروپیک فرض شود و دلیل این فرض، نبود اطلاعات دقیق از جهت گیری ساختار ریز قلب در آن ناحیه و همچنین جلوگیری از به وجود آمدن تکینگی (Singularity) است.

برای ساده سازی تعیین جهت گیری فیبرها و شیت‌ها فرضیاتی استفاده می‌شود که عبارتند از [14]:

۱. جهت گیری فیبرها به نحوی در نظر گرفته می‌شود که زاویه آن‌ها در اندوکاردیوم ۶۰ درجه باشد و در اپیکاردیوم ۶۰- درجه باشد. همان گونه که توسط لیگریس و همکاران [15] در آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است، زاویه فیبرها از اندوکاردیوم به اپیکاردیوم در جهت ترانسموال (Transmural) بافت تغییر می‌کند و در این تحقیق نیز زاویه فیبرها به همین نحو در نظر گرفته می‌شود.
۲. شیت‌ها به نحوی تعریف شدند که در طول ضخامت میوکاردیوم، عمود بر سطح اندوکاردیوم و اپیکاردیوم بوده و به سمت داخل باشند.

ابتدا لازم است برای هندسه دوبطنی یک سیستم مختصات محلی تعیین کنیم. در این پژوهش ساختار ریز بطن چپ و راست جداگانه تعریف و سپس در هندسه دوبطنی گنجانده می‌شوند. برای تعریف ساختار ریز از دو رابط سیستم مختصات منحنی الخط (Curvilinear Coordinate System Interface) در کامسول استفاده می‌شود که هر کدام به ترتیب به صورت جداگانه برای تعریف ساختار ریز بطن چپ و راست مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای نسبت دادن هر سیستم مختصات به بطن مربوطه، از یک تابع پله استفاده می‌شود [14]. سیستم مختصات محلی ایجاد شده در میوکاردیوم در شکل (۲) نشان داده شده که در آن جهت‌های طولی، محیطی و شعاعی قلب به ترتیب با رنگ‌های قرمز، سبز و آبی نمایش داده شده‌اند.

روابطی که به آن‌ها اشاره شد مربوط به حالتی است که بافت میوکاردیوم به صورت تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که بافت میوکاردیوم تقریباً تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود و تانسور تغییر شکل رشد در نرم‌افزار تعریف شده است، تانسور تغییر شکل الاستیک به دو بخش ایزوکوریک (حجم ثابت) و حجمی تقسیم می‌شود که بخش ایزوکوریک آن مطابق رابطه (۸) است:

$$\bar{F}_e = J_e^{-1/3} F_e \quad (۸)$$

در ادامه، کامسول، بخش ایزوکوریک تانسور تغییر شکل راست کوشی-گرین الاستیک را با توجه به رابطه (۹) محاسبه می‌کند:

$$\bar{C}_e = \bar{F}_e^T \bar{F}_e = J_e^{-2/3} C_e \quad (۹)$$

در نهایت، تنش دوم پایولاگیرشلف الاستیک مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود که در آن، $S_{e, vol}$ و $S_{e, iso}$ ، به ترتیب، بخش ایزوکوریک و حجمی تنش دوم پایولاگیرشلف الاستیک هستند:

$$S_e = S_{e, vol} + S_{e, iso} = \frac{\partial \psi_{vol}}{\partial E_e} + \frac{\partial \bar{\psi}_{iso}}{\partial E_e} \quad (۱۰)$$

در این پژوهش، برای مدل سازی رشد بافت، از تابع انرژی کرنش ایزوتروپیک عرضی استفاده می‌شود [16]. قید تقریباً تراکم‌ناپذیری بافت نیز از طریق تابع انرژی کرنش حجمی اعمال می‌شود [17]:

$$\psi = \bar{\psi}_{iso} + \psi_{vol} \quad (۱۱)$$

$$\bar{\psi}_{iso} = \frac{a_i}{2b_i} \exp(b_i(I_{e,1}-3)) + \frac{a_f}{2b_f} (\exp(b_f(I_{e,4f}-1))^2 - 1) \quad (۱۲)$$

$$\psi_{vol} = \frac{\kappa}{2} \left(\frac{J_e^2 - 1}{2} - \ln(J_e) \right) - a_i \ln(J_e) \quad (۱۳)$$

در رابطه (۱۱)، $\bar{\psi}_{iso}$ و ψ_{vol} به ترتیب، بخش ایزوکوریک و حجمی انرژی کرنش هستند. در رابطه (۱۲)، $I_{e,1}$ ، اولین ناوردای $\bar{C}_e$ است و $I_{e,4f} = \bar{F} \cdot (\bar{C}_e \bar{F})$ می‌باشد. لازم به ذکر است که در روابط رشد، رأس میوکاردیوم به صورت ایزوتروپیک فرض می‌شود. مقادیر مدل در جدول (۱) قرار داده شده است که در آن، ρ_s ، چگالی میوکاردیوم است.

β_0 ، به پیکربندی تغییر شکل یافته، β_t ، در زمان جاری منتقل می‌کند و به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود که در آن، X ، مختصات-های مادی، X ، Y و Z ، هستند و F ، تانسور گرادیان تغییر شکل است و برای تعریف روابط رشد محدود نقش اساسی را ایفا می‌کند:

$$F = \nabla_X \phi(X, t) \quad (۱)$$

با توجه به رویکرد رودریگز و همکاران [8]، تانسور گرادیان تغییر شکل به صورت ضربی، به دو جزء الاستیک، F_e و رشد، F_g ، مطابق رابطه (۲) تقسیم می‌شود که در آن، F_g ، تانسور تغییر شکل رشد، تغییر شکل بافت را از پیکربندی مرجع به پیکربندی میانی و تانسور تغییر شکل الاستیک، F_e ، تغییر شکل بافت را از پیکربندی میانی به پیکربندی تغییر شکل یافته توصیف می‌کند:

$$F = F_e F_g \quad (۲)$$

با توجه به توضیحات گفته شده می‌توان دریافت که محاسبات بر مبنای تانسور تغییر شکل الاستیک و به صورت رابطه (۳) انجام می‌گیرد:

$$F_e = F F_g^{-1} \quad (۳)$$

حال با استفاده از رابطه (۴)، می‌توان تانسور تغییر شکل راست کوشی-گرین الاستیک، C_e ، را تعریف نمود. در ادامه، تانسور کرنش گرین-لاگرانژ الاستیک با توجه به رابطه (۵) تعریف می‌شود. دترمینان‌های مربوط به تانسور تغییر شکل الاستیک، تانسور تغییر شکل رشد و تانسور گرادیان تغییر شکل با توجه به رابطه (۶) تعیین می‌شوند:

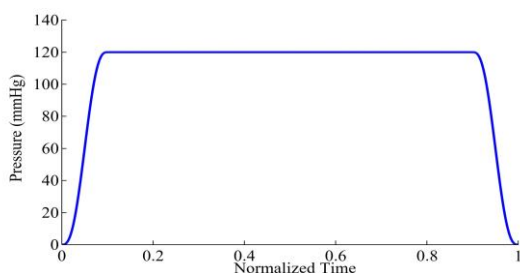
$$C_e = F_e^T F_e = F_g^{-T} C F_g^{-1} \quad (۴)$$

$$E_e = \frac{1}{2} (C_e - I) \quad (۵)$$

$$J_e = \det(F_e), J_g = \det(F_g), J = J_e J_g = \det(F) \quad (۶)$$

در نرم‌افزار کامسول، تنش مبنا، تنش دوم پایولاگیرشلف در پیکربندی مرجع، S ، است و در نتیجه این تنش برای مدل سازی رشد بافت به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که تانسور تغییر شکل رشد در قسمت معادلات حاکم رابط مکانیک جامدات در نرم‌افزار کامسول و توسط کاربر تعریف شد:

$$S = J_g F_g^{-1} S_e F_g^{-T} \quad (۷)$$



شکل ۴ فشار اعمالی به اندوکاردیوم در مدل

جدول ۱ مقادیر پارامترهای مکانیک منفعل میوکاردیوم

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
a_i	۲/۲۸۰	kPa	[16]
b_i	۹/۷۲۶	-	[16]
a_f	۱/۶۸۵	kPa	[16]
b_f	۱۵/۷۷۹	-	[16]
ρ_s	۱۳۷۰	kg m ⁻³	[14]
κ	۲۵۰	kPa	[14]

مدل سازی رشد نارسایی قلبی دیاستولیک

همان طور که گفته شد، نارسایی قلبی دیاستولیک با هایپرتروفی کانستریک همراه است و باعث اختلال در پر شدن قلب می شود. برای مدل سازی رشد هایپرتروفی کانستریک لازم است تا تانسور تغییر شکل رشد، F_g ، مناسبی تعریف شود. در این پژوهش، از روابط ارائه شده توسط گوکتپه و همکاران [6,7] برای مدل سازی رشد هایپرتروفی کانستریک استفاده می شود. تانسور تغییر شکل رشد، به دو صورت ایزوتروپیک (*) و ایزوتروپیک عرضی (**)، مطابق رابطه (۱۵) در نظر گرفته می شود که در آن، θ_g ، یک اسکالر است و به آن ضریب رشد گفته می شود و $\hat{\alpha}_0$ بردار یکه است و جهت رشد بافت را تعیین می کند و وابسته به نوع بیماری است که رشد آن مدل سازی می شود. $\otimes$ ، نیز بیانگر ضرب دیادیک است:

$$F_g = \begin{cases} \theta_g I & * \\ I + (\theta_g - 1) \hat{\alpha}_0 \otimes \hat{\alpha}_0 & ** \end{cases} \quad (12)$$

در این پژوهش، برای رشد هایپرتروفی کانستریک، تانسور تغییر شکل رشد به صورت رابطه (۱۶) تعریف می شود و همان طور که دیده می شود، برای افزایش عرض کاردیومیوسیت ها در هایپرتروفی کانستریک، سارکومرهای جدید در جهت شیت ها، $\hat{S}$ ، اضافه می شوند:

$$F_g = I + (\theta_g - 1) \hat{S} \otimes \hat{S} \quad (13)$$

در ادامه لازم است تا نحوه تغییرات رشد در طول زمان توسط معادله تکاملی توصیف شود. معادله تکاملی برای فرایند رشد به صورت رابطه (۱۷) تعریف می شود:

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial t} = k_g(\theta_g) \phi_g(\tau_s) \quad (14)$$

در رابطه (۱۷)، $k_g(\theta_g)$ ، تابع رشد و متغیر، ϕ_g ، عامل محرک رشد است. در ادامه، تابع رشد به صورت رابطه (۱۸)

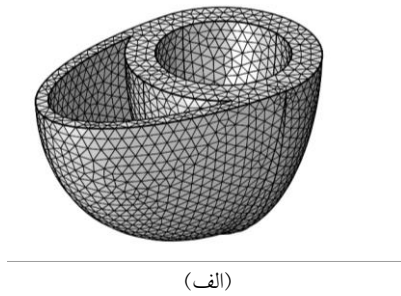
دلیل آن که روابط مربوط به ماده ی تراکم پذیر گفته شد، اعتبارسنجی رویکرد ارائه شده است. در مدل های اولیه مرتبط با رشد بافت میوکاردیوم، بافت به صورت تراکم پذیر فرض می شد و در این پژوهش، برای اعتبارسنجی با تحقیقات قبلی، این فرض لحاظ می شود که به جزئیات آن در بخش اعتبارسنجی پرداخته شده است. لازم به ذکر است که رویکرد پیشین تعریف روابط سینماتیک رشد محدود در کامسول که توسط حسینی و همکاران [18] معرفی شده است فقط قابلیت این را دارد که رشد را در این نرم افزار برای بافت تراکم پذیر تعریف کند و نمی توان از آن برای تعریف رشد در ماده تقریباً تراکم ناپذیر استفاده کرد. در رویکرد مذکور، برای تعریف روابط در کامسول، لازم است تا تنش دوم پایولاکیرشف به صورت رابطه (۱۴) تغییر داده شود که برای اعتبارسنجی رویکرد ارائه شده در این پژوهش، رویکرد آن ها نیز بکار گرفته می شود و به جزئیات نحوه انجام آن در بخش اعتبارسنجی اشاره می شود:

$$S = \frac{J}{J_e} \frac{\partial \psi}{\partial E} \quad (11)$$

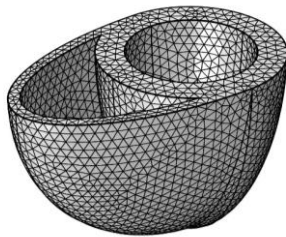
به عنوان شرایط مرزی برای مدل سازی رشد، فقط جابجایی صفحه بالایی مدل در تمامی جهت ها صفر فرض می شود. در شکل (۴) فشار استفاده شده در شبیه سازی نشان داده شده که ایده این نوع بارگذاری از راش و همکاران [9] گرفته شده است و این فشار به اندوکاردیوم بطن چپ و یک پنجم آن به اندوکاردیوم بطن راست اعمال می شود.

در ادامه لازم است تا تانسور تغییر شکل رشد و معادله تکاملی رشد برای بیماری نارسایی قلبی دیاستولیک تعریف شود تا بتوان رشد بافت را متناسب با مشاهدات بالینی بیماری مربوطه، مدل سازی کرد.

۰/۰۰۰۴ تنظیم می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۵ مش‌های نرمال (الف) و ریز (ب) استفاده شده در شبیه‌سازی

اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی از رشد ایزوتروپیک و مدل مکانیک منفعل نئوهوکن تراکم‌پذیر استفاده می‌شود [19]:

$$\psi = \frac{\lambda}{8} \ln^2(I_{e,3}) + \frac{\mu}{2} (I_{e,1} - 3 - \ln(I_{e,3})) \quad (18)$$

در رابطه (۲۱)، λ و μ ، ضرایب لامه هستند؛ $I_{e,1}$ و $I_{e,3}$ به ترتیب، ناوردای اول و سوم تانسور تغییر شکل راست کوشی-گرین الاستیک هستند. پارامترهای استفاده شده برای روابط رشد و مدل مادی در این شبیه‌سازی، در جدول (۳) قرار داده شده است. فشار اعمالی به اندوکاردیوم بطن‌ها در این شبیه‌سازی، در شکل (۶) پژوهش گوکتپه و همکاران [6] قرار داده شده است. لازم به ذکر است که دو نوع شبیه‌سازی انجام می‌گیرد که در نوع اول از رویکرد جدید ارائه شده در این پژوهش برای تعریف روابط رشد در کام‌سول مولتی فیزیک و در نوع دوم از رویکرد حسینی و همکاران [18] استفاده می‌شود که مطابق رابطه (۱۴) است.

نتایج شبیه‌سازی اعتبارسنجی در شکل (۶) قرار داده شده است. همان‌طور که می‌توان مشاهده کرد، نتایج هر دو رویکرد کاملاً منطبق بر هم هستند که نشان‌دهنده درست بودن رویکرد

فرض می‌شود که در آن $\theta_{\max}$ ، τ ، و ν پارامترهای این تابع بوده و همه‌ی آن‌ها دارای تفسیر فیزیولوژیکی می‌باشند:

$$k_g(\theta_g) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\theta_{\max} - \theta_g}{\theta_{\max} - 1} \right)^\nu \quad (15)$$

بعد از تعیین تابع رشد، در ادامه لازم است تا محرک رشد نیز تعریف شود که برای رشد ایزوتروپیک و هایپرتروفی کانستریک به صورت رابطه (۱۹) فرض می‌شود [11]:

$$\phi_g(\tau_s) = \langle \text{tr}(\tau_s) - p_h \rangle \quad (16)$$

در رابطه (۱۹)، p_h ، تنش هومئوستاتیک است و در واقع تنش فیزیولوژیکی بحرانی بافت می‌باشد و $\langle \cdot \rangle$ ، بیانگر پرانتز ماکولی است و $\text{tr}(\tau_s)$ ، اثر تانسور تنش کیرشهف است و مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$\text{tr}(\tau_s) = \text{tr}(J_e \sigma) \quad (17)$$

مقادیر پارامترهای معادله تکاملی و محرک رشد در جدول (۲) قرار داده شده است. لازم به ذکر است که رشد ناحیه اپکس به صورت ایزوتروپیک فرض شد.

جدول ۲ مقادیر پارامترها برای معادله تکاملی رشد

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
$\theta_{\max}$	۱/۵	-	[11]
τ	۰/۱	MPa s ⁻¹	[11]
ν	۲	-	[11]
p_h	۰/۰۱۲	MPa	[11]

تنظیمات مدل

برای حل مدل در این پژوهش از المان تتراهدرال استفاده شده است. برای انجام تحلیل همگرایی مش در مدل، از دو نوع مش نرمال و ریز استفاده شده است. مش نرمال و ریز در شکل (۵) نشان داده شده است که تعداد المان‌ها در مش نرمال و ریز به ترتیب ۲۶۲۶۵ و ۳۶۲۷۷ عدد هستند.

برای حل مدل در نرم‌افزار کامسول تغییراتی در حلگر پیش‌فرض انجام می‌شود تا حل مدل با واگرایی مواجه نشود. از حلگر مستقیم خطی مومپس تفکیک شده (Segregated MUMPS Direct Linear Solver) به همراه روش خودکار میرایی نیوتن (Damped Newton Method) استفاده می‌شود. تمامی متغیرها با استفاده از یک فرمول‌بندی دیفرانسیلی رو به عقب (Backward Differentiation Formula) مرتبه دو با گام زمانی آزاد به‌روز می‌شوند و زمان‌های استخراج نتایج بر روی

اتخاذ شده است.

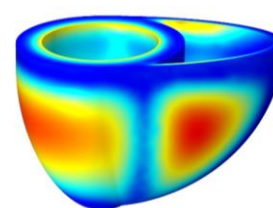
جدول ۳ مقادیر پارامترهای معادله تکاملی رشد برای اعتبارسنجی

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
τ	۰/۱	MPa s^{-1}	[11]
$\vartheta_{\max}$	۱/۷۵	-	[6]
ν	۲	-	[6]
p_h	۰/۰۱۲	MPa	[6]
λ	۰/۵۷۷	MPa	[19]
μ	۰/۳۸۵	MPa	[19]
ρ_s	۱۰۰۰	kg m^{-3}	[19]

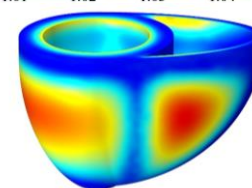
نتایج

نتایج مربوط به رشد کانستریک در هند سه دویطنی در شکل (۷) نشان داده شده است. در ابتدای شبیه سازی (زمان ۰) رشدی در بافت رخ نداده و هندسه و حجم اولیه میوکاردیوم را نشان می دهد. با رسیدن زمان بارگذاری به ۰/۱، برخی نواحی اندوکاردیوم دچار رشد می شوند (تقریباً ۱/۱۵ رشد) که مقدار آن در بطن چپ بیشتر از بطن راست است و در ادامه با ثابت ماندن فشار اعمالی بر اندوکاردیوم و افزایش تنش دیواره ها، میزان رشد در بافت افزایش می یابد و رشد تا زمان تقریبی ۰/۹۳ ادامه می یابد. باید این نکته مورد توجه قرار گیرد که در فاصله زمانی ۰/۹ تا ۰/۹۳، اگرچه فشار در حال کاهش است ولی مقدار تنش کیرش هف در برخی نواحی بافت هنوز بیشتر از تنش هومئوستاتیک بوده و رشد همچنان ادامه دارد.

در شکل (۷)، ضریب رشد با مقدار ۱ نشان دهنده عدم رشد کاردیومیوسیت و ضریب رشد ۱/۴ نشان دهنده افزایش ضخامت ۴۰٪ در کاردیومیوسیت ها است. همان طور که در شکل مذکور قابل مشاهده است، در انتهای شبیه سازی (زمان ۱)، ضخامت دیواره های میوکاردیوم به طور قابل توجهی افزایش یافته و این افزایش ضخامت بر روی حجم محفظه های بطنی تأثیر گذاشته و مقدار آن ها را کاهش داده است. نکته قابل توجه در شکل (۷) نحوه شروع و پخش رشد در بافت میوکاردیوم است. اولین جایی که در مدل رشد را تجربه می کند لایه اندوکاردیوم است و در ادامه به آرامی رشد در بافت پخش شده و لایه های دیگر را دربرمی گیرد.

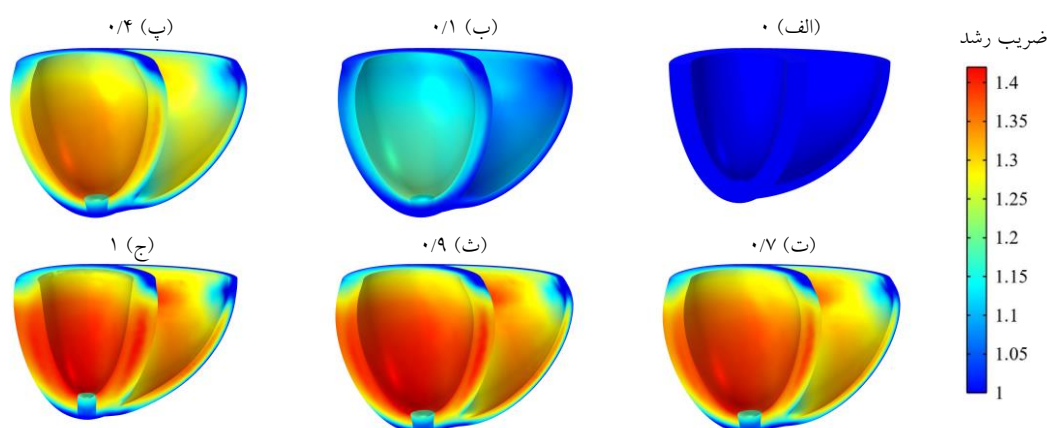


(الف)



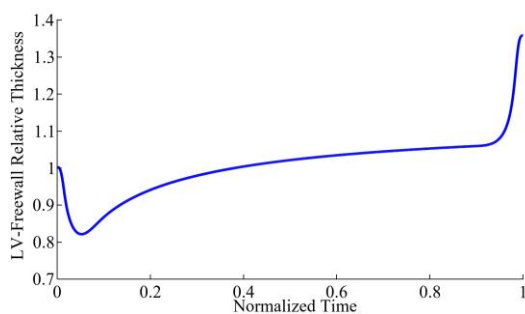
(ب)

شکل ۶ اعتبارسنجی پیاده سازی روابط سینماتیک رشد در کامسول با استفاده از رویکرد این پژوهش (الف) و رویکرد حسینی و همکاران [18] (ب) (نوار رنگ ضریب رشد را نشان می دهد).



شکل ۷ رشد کانستریک در مدل دویطنی (زمان های مختلف مطابق با فشار اعمالی رسم شده اند)

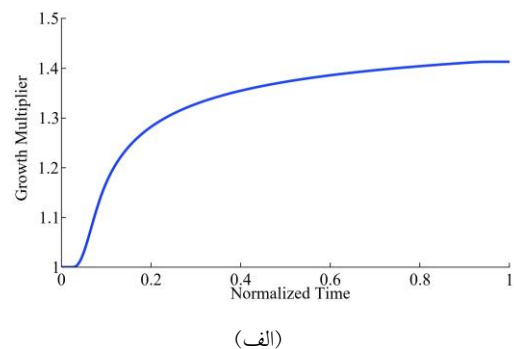
قرار داشت و فاصله دو نقطه در انتهای شبیه‌سازی از یکدیگر محاسبه و نرمالیزه شد. با توجه به نحوه تغییرات ضخامت دیواره‌ها، تا زمان $0/05$ ، ضخامت دیواره کاهش می‌یابد زیرا فشار بر سطح اندوکاردیوم در حال اعمال است، بعد از زمان مذکور، با وجود آن‌که فشار اعمالی به اندوکاردیوم همچنان در حال افزایش است شکل (۴)، ضخامت دیواره به جای کاهش، افزایش می‌یابد که در واقع نشان‌دهنده شروع رشد در دیواره میوکاردیوم است. تا زمان $0/09$ ، به دلیل کم بودن تنش دیواره‌ها، میزان افزایش ضخامت با سرعت کمی صورت می‌گیرد و بعد از زمان مذکور و با افزایش تنش دیواره‌ها، سرعت رشد و در نتیجه سرعت افزایش ضخامت دیواره‌ها افزایش یافته و در زمان $0/93$ متوقف می‌شود. در انتهای شبیه‌سازی، ضخامت دیواره آزاد بطن چپ به مقدار 35% افزایش یافته است.



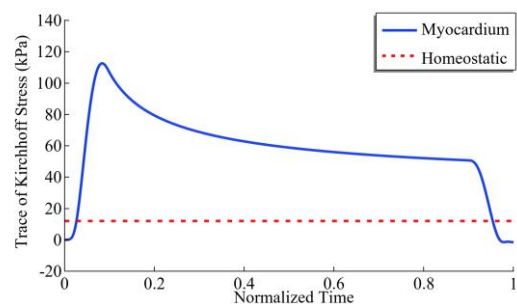
شکل ۹ تغییرات ضخامت دیواره آزاد بطن چپ در خلال رشد نارسایی قلبی دیاستولیک

در شکل (۱۰) تغییرات حجم محفظه‌های بطن چپ و راست نشان داده شده است. برای تعیین حجم هر محفظه، سطوح داخلی تشکیل دهنده هر بطن مدل انتخاب و با استفاده از تئوری دیورژانس، حجم محفظه‌ها محاسبه شدند. در انتهای رشد بافت میوکاردیوم، میزان حجم بطن چپ با کاهش مواجه شده است که دلیل آن افزایش ضخامت دیواره‌های بطن چپ است. حجم بطن راست در انتهای شبیه‌سازی با تغییر چندانی همانند بطن چپ مواجه نشده است و با وجود کاهش مقدار آن ولی به دلیل افزایش ضخامت کم دیواره‌های بطن راست، میزان کاهش حجم آن نسبت به حجم بطن چپ کمتر بود. به‌طور کلی، حجم بطن‌ها در انتهای شبیه‌سازی کاهش یافت و از مقدار اولیه $106/8$ و $96/3$ میلی‌لیتر برای بطن چپ و راست به‌ترتیب به مقدار $90/26$ و $90/13$ میلی‌لیتر کاهش یافتند.

در شکل (۸)، میزان رشد کاردیومیوسیتی که در فاصله میانی صفحه بالایی مدل تا رأس بر روی سطح اندوکاردیوم قرار دارد، اثر تنش کیرشهف، $tr(\tau_s)$ و تنش هومئوستاتیک، p_h ، برای کاردیومیوست مذکور، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور قابل مشاهده است، در ابتدای شروع شبیه‌سازی، کاردیومیوسیت رشدی نکرده است زیرا تنش کیرشهف کمتر از تنش هومئوستاتیک تعریف شده در شبیه‌سازی بود. از زمان $0/026$ به بعد، با بیشتر شدن اثر تنش کیرشهف از تنش هومئوستاتیک، ضریب رشد افزایش یافته و سارکومرها به‌صورت موازی اضافه شده و کاردیومیوسیت دچار افزایش ضخامت می‌شود. رفتار مربوط به افزایش رشد تا زمانی ادامه می‌یابد که اثر تنش کیرشهف به کمتر از تنش هومئوستاتیک برسد و بعد از آن رشد متوقف می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۸ ضریب رشد (الف) و اثر تنش کیرشهف (ب) برای کاردیومیوسیتی در فاصله‌ی میانی صفحه بالایی مدل تا رأس در سطح اندوکاردیوم بطن چپ

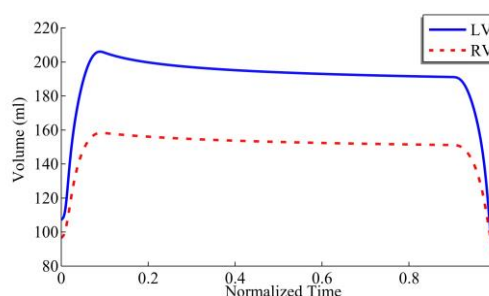
در شکل (۹) تغییر ضخامت دیواره آزاد میوکاردیوم در بطن چپ نشان داده شده است. برای محاسبه ضخامت دیواره‌ها، ابتدا دو نقطه در فاصله میانی صفحه بالایی مدل تا رأس تعریف شد که نقطه اول در سطح اپیکاردیوم و نقطه دوم در سطح اندوکاردیوم

سانتی متر رسید و بر اساس آزمایش های تجربی از افرادی با نارسایی قلبی دیاستولیک که توسط ذیل و همکاران [21] مرور شده است، نتایج نشان داد که در ۴۰٪ افراد مورد آزمایش، ضخامت دیواره آزاد بطن چپ بیشتر از ۱/۲ سانتی متر بوده است که بر این اساس، نتیجه به دست آمده در رشد کانستریک در محدوده قابل قبول است.

در این پژوهش از مدل مادی ایزوتروپیک عرضی برای مکانیک منفعل بافت در شبیه سازی رشد استفاده شد و پیشنهاد می شود تا در آینده از مدل های ارتوتروپیک استفاده شود زیرا بیانگر خواص اصلی بافت میوکاردیوم هستند [22]. با وجود نکات گفته شده، در مدل سازی رشد کانستریک، بافت میوکاردیوم در پاسخ به افزایش بیش از حد فشار، برای اینکه بتواند تنش دیواره ها را کاهش دهد دچار افزایش ضخامت در دیواره ها و کاهش حجم محفظه های بطنی شد که این رفتار، از مشاهدات بالینی و کیفی رشد هایپرتروفی کانستریک است [23]. از طرفی، تغییرات مذکور از نشانه های نارسایی قلبی دیاستولیک می باشند که در نتایج شبیه سازی این پژوهش نیز دیده شدند [24]. بر اساس تحقیقات تجربی در ارتباط با محرک اصلی رشد در هایپرتروفی، محرک رشد در برخی موارد از نوع دارویی و یا هورمونی بوده که این نوع مدل ها نیز می توانند با تغییر معادله تکاملی در آینده بکار گرفته شوند [25].

نتیجه گیری

از آنجایی که تجزیه ضریبی تانسور گرادیان تغییر شکل برای مدل سازی رشد از نظر محاسباتی بسیار پیچیده می باشد و انجام آن در نرم افزارهای المان محدود بسیار دشوار بوده و نیازمند کدنویسی و استفاده از نرم افزار ثانویه است [5]. در این پژوهش رویکردی برای مدل سازی سینماتیک رشد محدود در نارسایی قلبی دیاستولیک با به کارگیری هندسه ایده آل شده دوبطنی و تعریف ساختار ریز بافت با روش ریاضیاتی ارائه شد که نیازمند کدنویسی نبوده و به راحتی در یک نرم افزار المان محدود پیاده سازی می شود. نتایج مربوط به رشد هایپرتروفی کانستریک با محرک رشد تنش کیرشهف توانست میزان افزایش ضخامت دیواره آزاد بطن چپ را مطابق مشاهدات تجربی در نارسایی قلبی دیاستولیک شبیه سازی کند. این نتایج نشان داد که رویکرد ارائه



شکل ۱۰ تغییرات حجم بطن چپ (LV) و راست (RV) در خلال رشد بافت میوکاردیوم

تحلیل همگرایی مش

برای تحلیل همگرایی مش در مدل، نتیجه نهایی رشد در انتهای شبیه سازی برای مش نرمال و ریز مقایسه شدند. برای این تحلیل، اندازه گیری بیشینه ضریب رشد در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آن در جدول (۴) نشان شده است. همان طور که در جدول مذکور دیده می شود، میزان اختلاف بین نتایج کمتر از ۵٪ بوده و می توان نتیجه گرفت که مش نرمال برای شبیه سازی مدل مناسب است. لازم به ذکر است که بیشترین میزان اختلاف در نتایج در بیشینه رشد صورت می گیرد و به همین دلیل در سایر نقاط دیگر بافت، مقدار اختلاف بین رشد ممکن است کمتر باشد.

جدول ۴ تحلیل همگرایی مش مدل نارسایی قلبی دیاستولیک

معیار	مش نرمال	مش ریز	اختلاف (%)
بیشینه رشد	۱/۴۲۹۲	۱/۴۲۸۷	۰/۰۳۴۹

بحث

در نارسایی قلبی دیاستولیک که مرتبط با هایپرتروفی کانستریک است، معمولاً در افزایش بیش از حد فشار در بطن، تنش دیواره های بطنی در سیستول افزایش یافته و باعث اضافه شدن سارکومرهای جدید به صورت موازی به سارکومرهای قبلی می شود. در واقع قلب برای نگه داشتن تنش ها در محدوده فیزیولوژیکی و تطبیق خود با افزایش بیش از حد فشار، ضخامت دیواره ها را افزایش می دهد [20]. در این حالت، در مقیاس ماکروسکوپی ضخامت دیواره ی بطنی افزایش یافته و بافت قلب دچار هایپرتروفی کانستریک می شود که در این پژوهش، ضخامت دیواره آزاد بطن چپ در انتهای رشد بافت به ۱/۶۲

تقدیر و تشکر

نویسندگان از جناب آقای دکتر Socrates Dokos از UNSW Sydney بابت راهنمایی در فرایند مدل سازی و شبیه سازی نهایت تشکر را دارند.

شده در نرم افزار کامسول می تواند نتایج رشد را به درستی شبیه سازی کند و در آینده در تحقیقات گسترده تر، برای شبیه سازی انواع بیماری های قلبی و به کارگیری هندسه استخراج شده از تصاویر پزشکی قلب انسان مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] R. Klabunde, *Cardiovascular physiology concepts*, Lippincott Williams & Wilkins, 2011.
- [2] J. Loscalzo, *Harrison's cardiovascular medicine 2/E*, McGraw-Hill Education, 2013.
- [3] K. Chatterjee and B. Massie, "Systolic and diastolic heart failure: differences and similarities," *Journal of Cardiac Failure*, vol. 13, no. 7, pp. 569-576, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cardfail.2007.04.006>
- [4] Z. A. McCrossan, R. Billeter and E. White, "Transmural changes in size, contractile and electrical properties of SHR left ventricular myocytes during compensated hypertrophy," *Cardiovascular Research*, vol. 63, no. 2, pp. 283-292, 2004.
- [5] M. Genet, L. C. Lee, B. Baillargeon, J. M. Guccione and E. Kuhl, "Modeling pathologies of diastolic and systolic heart failure," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 112-127, 2016.
- [6] S. Göktepe, O. J. Abilez and E. Kuhl, "A generic approach towards finite growth with examples of athlete's heart, cardiac dilation, and cardiac wall thickening," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 58, no. 10, pp. 1661-1680, 2010.
- [7] S. Göktepe, O. J. Abilez, K. K. Parker and E. Kuhl, "A multiscale model for eccentric and concentric cardiac growth through sarcomerogenesis," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 265, no. 3, Pp. 433-442, 2010.
- [8] E. K. Rodriguez, A. Hoger and A. D. McCulloch, "Stress-dependent finite growth in soft elastic tissues," *Journal of Biomechanics*, vol. 27, no. 4, pp. 455-467, 1994.
- [9] M. Rausch, A. Dam, S. Göktepe, O. Abilez and E. Kuhl, "Computational modeling of growth: systemic and pulmonary hypertension in the heart," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 10, no. 6, pp. 799-811, 2011.
- [10] R. C. Kerckhoffs, J. H. Omens and A. D. McCulloch, "A single strain-based growth law predicts concentric and eccentric cardiac growth during pressure and volume overload," *Mechanics Research Communications*, vol. 42, no. pp. 40-50, 2012.
- [11] E. Berberoğlu, H. O. Solmaz and S. Göktepe, "Computational modeling of coupled cardiac electromechanics incorporating cardiac dysfunctions," *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 48, no. pp. 60-73, 2014.
- [12] F. Del Bianco, P. C. Franzone, S. Scacchi and L. Fassina, "Electromechanical effects of concentric hypertrophy on the left ventricle: A simulation study," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 99, no. pp. 236-256, 2018.
- [13] K. Yoshida, A. D. McCulloch, J. H. Omens and J. W. Holmes, "Predictions of hypertrophy and its regression in response to pressure overload," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, vol. 19, no. 3, pp. 1079-1089, 2020.
- [14] A. Ahmad Bakir, A. Al Abed, M. C. Stevens, N. H. Lovell and S. Dokos, "A multiphysics biventricular cardiac model: Simulations with a left-ventricular assist device," *Frontiers in Physiology*, vol. 9, no. pp. 1259, 2018.
- [15] I. J. LeGrice, B. Smaill, L. Chai, S. Edgar, J. Gavin and P. J. Hunter, "Laminar structure of the heart: ventricular myocyte arrangement and connective tissue architecture in the dog," *American Journal of Physiology-Heart and*

- Circulatory Physiology*, vol. 269, no. 2, pp. H571-H582, 1995.
- [16] G. A. Holzapfel and R. W. Ogden, "Constitutive modelling of passive myocardium: a structurally based framework for material characterization," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 367, no. 1902, pp. 3445-3475, 2009. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0091>
- [17] B. Cansız, K. Sveric, K. Ibrahim, R. H. Strasser, A. Linke and M. Kaliske, "Towards predictive computer simulations in cardiology: Finite element analysis of personalized heart models," *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 98, no. 12, pp. 2155-2176, 2018.
- [18] H. S. Hosseini, D. C. Beebe and L. A. Taber, "Mechanical effects of the surface ectoderm on optic vesicle morphogenesis in the chick embryo," *Journal of Biomechanics*, vol. 47, no. 16, pp. 3837-3846, 2014.
- [19] G. Himpel, E. Kuhl, A. Menzel and P. Steinmann, "Computational modelling of isotropic multiplicative growth," *Computer Mod Engnnering Science*, vol. 8, no. Pp. 119-134, 2005.
- [20] L. H. Opie, *Heart physiology: from cell to circulation*, Lippincott Williams & Wilkins, 2004.
- [21] M. R. Zile, C. F. Baicu and D. D. Bonnema, "Diastolic heart failure: definitions and terminology," *Progress in Cardiovascular Diseases*, vol. 47, no. 5, pp. 307-313, 2005.
- [22] S. Dokos, B. H. Smaill, A. A. Young and I. J. LeGrice, "Shear properties of passive ventricular myocardium," *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, vol. 283, no. 6, pp. H2650-H2659, 2002.
- [23] A. K. Abbas, N. Fausto and S. L. Robbins, *Robbins and Cotran pathologic basis of disease*, Elsevier Saunders, 2020.
- [24] K. Chatterjee, "Pathophysiology of systolic and diastolic heart failure," *Medical Clinics*, vol. 96, no. 5, pp. 891-899, 2012.
- [25] K. Yoshida and J. W. Holmes, "Computational models of cardiac hypertrophy," *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 159, no. pp. 75-85, 2021.

CONTENTS

Manipulation of Breast Cell Tissue with the Aim of Calculating Young's Modulus, Using Tatara Contact Theory and Atomic Force Microscopy	Moein Taheri – Hamed Faraji – Peyman karimi	1
Investigating the Effect of Different Positions of the Slot on Performance of Single-Slot and Double-Slot Coaxial Antenna in The Treatment of Cancer in Liver Tissue by Hyperthermia Method	Behrad Haghighi – Hadi Sadeghi Pour Mohammad shafiey Dahej	17
Feasibility of the Performance of Thermal Photovoltaic Systems in Residential Units in the Climate of Four Cities of Abadan, Baghdad, Basra, and Tehran in Terms of Energy Saving	Ali Jabri - Mohammad Reza Ansari - Mahdi Marefat	33
Numerical Analysis of the Obstacle Effect with Different Geometry on the Heat Transfer of Nanofluid Flow in a Rectangular Channel	Kourosh Javeherdeh - Habib Karimi	51
Investigating the Effects of CNC Milling Machine Parameters and Machining Tool Specifications on Surface Roughness of Wooden Products	Farshad Rabiei – Saeed Yaghoubi	65
Investigating the Effect of Moving Surface on NACA 0012 Airfoil in High Speed Ratio	Hasan Abolghasemi Golafshani -Mohammad Javad Amiri Ehsan Rouhi	75
Simulation of Nanofluid Flow at Low Reynolds Number in a Microchannel with One-Sided Sudden Expansion under the Effect of a Magnetic Field	Foroozan Moradi - Pedram Pournaderi	85
Modeling and Simulation of Growth in Diastolic Heart Failure	Pezhman Namashiri – Akbar Allahverdizadeh Behnam Dadashzadeh	101



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 Moeenfar	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Behdad Moghtaderi	Professor	University of Newcastle, Australia
Dr. Mohammad Reza Mahpeykar	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Dr. Simin Nasser	Professor	Kennesaw, 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

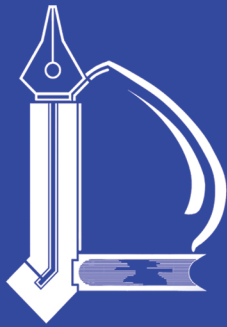
Fax: +98 51 38763301

Email: ejour@um.ac.ir

Web site: <http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir>

Indexed in: ISC, SID, Magiran, EBSCO, DOAJ

ISSN 2008 - 918X



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of
Applied and
Computational Sciences
in Mechanics

Serial No. 33

Manipulation of Breast Cell Tissue with the Aim of Calculating Young's Modulus, Using Tataru Contact Theory and Atomic Force Microscopy Moein Taheri- Hamed Faraji - Peyman karimi	1
Investigating the Effect of Different Positions of the Slot on Performance of Single-Slot and Double-Slot Coaxial Antenna in The Treatment of Cancer in Liver Tissue by Hyperthermia Method Behrad Haghighi - Hadi Sadeghi Pour Mohammad shafiey Dahej	17
Feasibility of the Performance of Thermal Photovoltaic Systems in Residential Units in the Climate of Four Cities of Abadan, Baghdad, Basra, and Tehran in Terms of Energy Saving Ali Jabri - Mohammad Reza Ansari - Mahdi Marefat	33
Numerical Analysis of the Obstacle Effect with Different Geometry on the Heat Transfer of Nanofluid Flow in a Rectangular Channel Kourosh Javeherdeh - Habib Karimi	51
Investigating the Effects of CNC Milling Machine Parameters and Machining Tool Specifications on Surface Roughness of Wooden Products Saeed Yaghoubi- Farshad Rabiei	65
Investigating the Effect of Moving Surface on NACA 0012 Airfoil in High Speed Ratio Hasan Abolghasemi Golafshani Mohammad Javad Amiri Ehsan Rouhi	75
Simulation of Nanofluid Flow at Low Reynolds Number in a Microchannel with One-Sided Sudden Expansion under the Effect of a Magnetic Field Foroozan Moradi - Pedram Pournaderi	85
Modeling and Simulation of Growth in Diastolic Heart Failure Pezhman Namashiri - Akbar Allahverdizadeh Behnam Dadashzadeh	101

Vol. 35, No.3
Autumn2023