



## بررسی عددی فین‌های مختلف بر بهبود عملکرد حرارتی در میکرو کانال‌ها

رحیم ظهیری<sup>۱</sup>، علی فلاوند جوزایی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

\* نویسنده مسئول: falavand@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

### چکیده

امروزه با گسترش تکنولوژی نیاز به طراحی مبدل‌های کارا در ابعاد کوچک به‌خصوص در بردهای الکترونیکی و میکروکانال‌ها یک امر ضروری محسوب می‌شود. در این مقاله، یک مدل عددی سه بعدی از یک میکروکانال در نرم افزار آنسیس فلونت بررسی شده است. برای حل مسئله از حل‌کننده فشار مینا و برای ارتباط فشار و سرعت از سیمپل استفاده گردیده است. برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی، مونتوم و انرژی از گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده شده است. تاثیر سه پارامتر عدد رینولدز، گام طولی، نوع شکل فین بر ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و ضریب عملکرد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش عدد رینولدز و تبدیل جریان از حالت آرام به آشفته، انتقال حرارت و افت فشار افزایش یافته ولی چون میزان افزایش افت فشار از افزایش انتقال حرارت بیشتر است لذا ضریب عملکرد سیستم در جریان آشفته نسبت به جریان آرام کاهش پیدا می‌کند. در فین سهمی شکل عدد ناسلت ۱۵/۹۴ درصد، ضریب اصطکاک ۳۲/۷۶ درصد و ضریب عملکرد ۵/۵ درصد افزایش یافت، در فین سوزنی عدد ناسلت ۱۱/۷۵ درصد، ضریب اصطکاک ۲۴/۱۷ درصد و ضریب عملکرد ۳/۹۷ درصد افزایش و در فین مخروطی شکل عدد ناسلت ۱۴/۰۵، ضریب اصطکاک ۲۶/۲۱ درصد و ضریب عملکرد ۵/۵۴ درصد افزایش می‌یابد. با تغییر گام طولی فین‌ها از ۵۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، عدد ناسلت ۹/۱۴ درصد افزایش، ضریب اصطکاک ۲۱ درصد و ضریب عملکرد ۲ درصد افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** فین، افت فشار، انتقال حرارت، ضریب عملکرد.

### مقدمه

یکی از مسایل مهم در مهندسی مکانیک، انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی و میکروکانال‌ها می‌باشد. اخیراً پیشرفت‌های سریعی در زمینه تولید و استفاده از میکرو دستگاه‌های توان بالا صورت گرفته که این امر نیاز به بررسی جامع و دقیق جنبه‌های اساسی جریان سیال و انتقال حرارت در مقیاس میکرو را نشان می‌دهد و توجه بسیاری را به مسایل مکانیک سیالات و انتقال حرارت در ابعاد میکرو معطوف کرده است. تمامی تلاش طراحان و محققان فعال در این زمینه افزایش تبادل حرارت، کاهش افت فشار و افزایش کارایی کل سیستم بوده است. از جمله اقداماتی که در این زمینه می‌توان انجام داد استفاده از سطوح داخلی و یا فین‌ها (پره‌ها) می‌باشد. فین‌ها سطح انتقال حرارت را افزایش داده و در نهایت چنانچه خوب طراحی شده باشند راندمان میکروکانال‌ها را به طور چشم‌گیری می‌توانند افزایش دهند. پره‌ها کاربرد فراوانی در صنعت دارند که از آن جمله می‌توان به پره‌های موجود جهت خنک کردن پردازشگر کامپیوترها و قطعات الکترونیکی اشاره کرد. امروزه با پیشرفت روزافزون کامپیوترها و ورود پردازشگرهای قوی و سوپر کامپیوترها، حجم بالایی از اطلاعات در زمان بسیار کم پردازش می‌شوند. پردازش سریع موجب بوجود آمدن گرما در پردازشگر می‌گردد و چنانچه این حرارت دفع نگردد تنش‌های حرارتی باعث از بین رفتن پردازشگر و در نهایت کل سیستم می‌گردد. در دنیای امروز و با ساخت سوپر کامپیوترها تکنیک دفع گرما باید کارا و مؤثرتر از گذشته باشد. از این‌رو نیاز به طراحی مبدل‌های حرارتی با راندمان بالاتر کاملاً احساس می‌شود. به کانال‌هایی که قطری بین ۳ میلی‌متر تا ۲۰۰ میکرومتر دارند میکروکانال می‌گویند. همانطور که می‌دانیم نرخ فرآیند انتقال گرما و جرم وابسته است به سطح جانبی کانال و نرخ دبی جریان به سطح مقطع کانال وابسته است پس هر چه قطر کانال کوچکتر شود نسبت سطح جانبی به دبی حجمی بیشتر می‌شود.



تحقیقات زیادی برای انتقال حرارت تک فاز در میکروکانال‌ها توسط تاکرمن و پیز[۱] برای خنک‌سازی مدارات یکپارچه در مقیاس بسیار بزرگ انجام شده است. آنها اولین توضیح را برای بیان مفهوم چاه حرارتی میکروکانال دادند و پیش‌بینی کردند که خنک‌کاری جابه‌جایی اجباری تک فاز در میکروکانال‌ها می‌تواند ۱۰۰۰ وات بر مترمربع حرارت را حذف کند. جابه‌جایی اجباری در کانال و تزریق مایع برای خنک‌کاری سریع‌تر و در مقیاس بزرگ‌تر در صنعت برای چند دهه استفاده شد. انتقال حرارت میکروکانال، در مقایسه با هوای معمولی و مایع سیستم‌های سرد دارای ضریب انتقال حرارت بالا، همراه با پتانسیل بالا برای ضریب انتقال حرارت و افت فشار متوسط می‌باشد. ریوو و همکاران[۲] به صورت عددی بهینه‌سازی عملکرد حرارتی میکروکانال چاه حرارتی را انجام دادند. هدف از بهینه‌سازی، رسیدن به کمترین مقاومت حرارتی بود. آنها عرض کانال، ارتفاع کانال و ضخامت پره را تغییر دادند تا به یک حل بهینه برسند. آنها به این نتیجه رسیدند که عرض کانال مهمترین پارامتر در عملکرد یک میکروکانال چاه حرارتی است. ویو و چنگ[۳] یک بررسی تجربی روی انتقال حرارت جابه‌جایی آرام و افت فشار آب در ۱۳ میکروکانال سیلیکونی با سطح مقطع دوزنقه‌ای انجام داده و دریافتند که مقدار عدد ناسلت و ثابت اصطکاک ظاهری به پارامترهای هندسی وابستگی شدیدی دارند و همچنین آنها مشاهده کردند که عدد ناسلت و ثابت اصطکاک ظاهری جریان آرام با افزایش زبری سطح و خواص هیدروفیلیک سطح افزایش می‌یابد. بنابراین مقادیر ثابتی که برای ثابت اصطکاک و عدد ناسلت جریان آرام تخمین زده شده بود در مقیاس‌های کوچک تغییر خواهد کرد و از طریق آزمایش باید مشخص گردد. پلس و همکاران[۴] پدیده افت فشار و انتقال حرارت را در بستری از میکرو پره‌های استوانه‌ای بررسی نمودند، آنها یک عبارت ساده شده برای مقاومت حرارتی کل به صورت تحلیلی بدست آوردند و درستی آنرا به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. اثر پارامترهای هندسی و ترموهیدرولیکی روی مقاومت حرارتی کل مورد بحث قرار دادند. آنها دریافتند که با استفاده از پره‌های استوانه‌ای می‌توانند به مقاومت‌های حرارتی بسیار کمتری برسند. لی و پترسن[۵] میکروکانال‌های موازی از جنس سیلیکن را به صورت سه‌بعدی و با روش عددی مدل‌سازی کردند. آنها برای سیال خنک کن آب، توانستند اندازه‌های هندسه بهینه کانال را تخمین بزنند که فاصله هر کانال ۱۰۰ میکرومتر و عرض کانال را ۶۰ میکرومتر و ارتفاع کانال را ۷۰۰ میکرومتر بدست آوردند. حسن و همکاران[۶] با شبیه‌سازی عددی سه بعدی جریان در حال توسعه و انتقال حرارت ترکیبی از یک تعادل جریان متقابل در میکروکانال‌های مبدل حرارتی<sup>۵</sup> برای سنجش اثر اندازه و شکل کانال‌ها روی عملکرد آن با داشتن حجم مبدل حرارتی یکسان استفاده کردند. اثر شکل کانال‌ها روی عملکرد برای کانال با مقاطع مختلف مانند: دایره، مربع، مستطیل، ذوزنقه و مثلث مطالعه شد. نتایج آنها نشان می‌دهد که برای یک حجم معین مبدل حرارتی، افزایش تعداد کانال‌ها باعث افزایش کارایی و افت فشار می‌شود. علاوه بر این، کانال‌های دایره‌ای بهترین عملکرد مجموع (حرارتی و هیدرولیکی) در بین شکل‌های دیگر کانال دارند. چن و همکاران[۷] یک میکرو میکسر جریان آرام با طرح مارپیچی ساخته و هندسه آن را بهینه‌سازی کردند. با عبور جریان از درون کانال، گردابه‌هایی در سیال ایجاد می‌شود که توسط نیروهای گریز از مرکز در انحنای کانال‌های مستطیلی باعث می‌شود در سیال جریان ثانویه تولید گردد و در نتیجه اختلاط در کانال بهبود می‌یابد. تسنگ و همکاران[۸] رفتار اختلاط دو سیال مختلف در یک میکرو میکسر غیر فعال با ساختارهای مرزی برآمده را بررسی کردند. عملکرد میکرو میکسرهای غیرفعال به طرح مناسبی از شکل هندسی کانال با موانع طراحی شده درون میکروکانال وابسته هستند که باعث می‌شود جریان شکافته و دوباره ترکیب گردد و مسیر نفوذ کاهش پیدا کرده بنابراین راندمان اختلاط بهبود یابد. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که شدت گردابه‌ها و جریان ثانویه در نزدیکی نواحی مرزی برآمده موجب افزایش راندمان اختلاط در طول جریان سیال می‌شود. لی و همکاران[۹] یک بررسی عددی با تمرکز بر انتقال حرارت و جریان سیال در یک چاه حرارتی مسطح با باله‌های مورب مقطعی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که در باله‌های مورب طراحی شده، تولید جریان ثانویه و کاهش ضخامت لایه مرزی باعث افزایش انتقال حرارت

<sup>1</sup> Very large-scale integrated

<sup>2</sup>. Apparent Friction constant

<sup>3</sup>. hydrophilic

<sup>4</sup>. Thermo-hydraulic

<sup>5</sup>. Counter Flow Micro Channel Heat Exchanger (CFMCHE)



می‌شود. ژو و همکاران [۱۰] طی آزمایشات صورت گرفته به این نتیجه رسیدند که کانال‌های دارای انسداد عملکرد انتقال حرارت کارآمدتری دارند اما افت فشار بیشتر از افت فشار در میکروکانال‌های ساده است. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که در غلظت‌های حجمی کم نانوسیال، عملکرد حرارتی نسبت به غلظت‌های حجم بالا به دست می‌آید. بحیرایی و حشمتیان [۱۱] ویژگی‌های هیدرولیکی و حرارتی یک نانوسیال هیبریدی جدید را در دو چاه حرارتی میکروکانال جدید به صورت عددی ارزیابی کردند. این نانوسیال حاوی نانوذرات گرافن-نقره است. نتایج آنها نشان داد که با افزایش سرعت ورودی و کسر حجمی نانو ذرات، حداکثر سطح دمای هر دو چاه حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که مقاومت حرارتی و برگشت ناپذیری نانوسیال کمتر از آب خالص در قدرت پمپاژ ثابت است. الراشد [۱۲] تحقیقات عددی بررسی رفتار هیدروترومال و برگشت ناپذیری نانوسیال آب-نقره را در داخل یک چاه حرارتی با ریز کانال‌های سینوسی بررسی کرد. نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات و طول موج کانال موجی عملکرد چاه حرارتی را افزایش می‌دهد. همچنین هنگامی که دامنه افزایش می‌یابد و طول موج کاهش می‌یابد، منجر به کاهش تولید کل آنتروپی می‌شود. الراشد [۱۳] تولید هیدروترومال و آنتروپی یک جریان نانوسیال نقره آب سنتز شده بیولوژیکی در میکروکانال‌های مستطیلی موجدار را به صورت عددی بررسی کرد. او اثر کسر حجمی، عدد رینولدز و پارامترهای هندسی میکروکانال موجی بر روی ضریب انتقال حرارت، دمای سطح چاه حرارتی، قدرت پمپاژ، همچنین تولید حرارتی، اصطکاک و کل آنتروپی را در نظر گرفت. نتایج او نشان داد که انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز بهبود یافته است. همچنین، دریافت که افزایش طول موج میکروکانال موجی عملکرد هیدروترومال را افزایش می‌دهد و تولید کل آنتروپی را کاهش می‌دهد. باهوش و فلاح [۱۴] انتقال حرارت سیال را به صورت تجربی در کانال کوچک مارپیچ استوانه‌ای چاه حرارتی با شاخه‌های ثانویه متنوع بررسی کردند. ویژگی‌های جریان، و تولید آنتروپی جریان نانوسیال آب آلومینا در کانال پارامترهای این تحقیق بودند. نتایج تجربی آنها نشان داد که شاخه‌های ثانویه، عدد ناسلت را کاهش داده و ضریب اصطکاک، آنتروپی اصطکاک و نرخ تولید افزایش یافته و آنتروپی حرارتی نرخ تولید کاهش می‌یابد و زاویه مارپیچ را کاهش می‌دهد. محمدی و همکاران [۱۷] به ارزیابی عددی پارامترهای مهمی مانند عدد ناسلت، افت فشار، ضریب انتقال حرارت و ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در میکروکانال‌های منقطع و مستقیم پرداخته است. نتایج آنها نشان می‌دهد که میکروکانال‌های منقطع با پین‌های V شکل به دلیل ایجاد اغتشاش در سیال و تولید جریان‌های چرخشی، عملکرد بهتری دارند. همتی سنگ بیلی و احمدی ندوشن [۱۸] به شبیه‌سازی عددی و طراحی یک میکروکانال سه لایه و بررسی عملکرد حرارتی آن با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار آنسیس فلونت پرداخته اند. همچنین اثر عدد بژان، ابعاد میکروپین و لایه‌های میکروکانال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آنها نشان داد که با افزایش عدد بژان عملکرد حرارتی بهینه می‌شود. با کاهش قطر پین‌ها به دلیل کاهش مساحت سطح انتقال حرارت، حداقل دمای بیشینه افزایش می‌یابد که بیانگر غیریکنواخت‌تر شدن توزیع دما در داخل میکروکانال می‌باشد، وقتی که قطر پین افزایش پیدا کند به این صورت که قطر پین ۰/۳ میلی‌متر باشد با ۱۷٪ کاهش حداقل دمای بیشینه نسبت به حالتی که قطر پین ۰/۲ میلی‌متر است باعث توزیع یکنواخت دما و بهبود کارآمدی سیستم خنک کننده می‌شود. فلاح عباسی و همکاران [۱۹] به صورت تجربی اثر لایه الکتریکی دوگانه در انتقال حرارت میکرولوله‌های حرارتی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه لایه دوگانه الکتریکی بر عملکرد حرارتی میکرولوله‌های حرارتی است. ایرانمنش [۲۰] به بررسی عملکرد چاه‌های حرارتی میکروکانال باز با پین‌های شش ضلعی منظم و تاثیر ارتفاع آنها در محدوده ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر پرداخته است. نتایج آنها نشان داد که افزایش ارتفاع پین در کانال‌های باز، عملکرد انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد، اما افت فشار بیشتری نیز ایجاد می‌کند. نتایج عددی آنها نشان داد که با حضور پین L شکل و رو به پایین می‌تواند میزان دمای ذوب و انرژی حرارتی ذخیره شده در مبدل حرارتی را نسبت به حالت بدون پین به ترتیب به میزان ۸۴ و ۷۲ درصد کاهش و افزایش دهد. با توجه به تحقیقات پیشین، در این پژوهش تاثیر پین سهمی شکل و مقایسه آن با پین سوزنی، استوانه‌ای و مخروطی بر بهبود حرارتی در میکروکانال‌ها پرداخته شده است. عدد رینولدز، شکل پین و گام پین در میکروکانال به‌عنوان متغیرهای این تحقیق می‌باشند. معادلات حاکم بر پایه روش حجم محدود حل می‌گردد تاثیرات پارامترهای مذکور بر انتقال گرما، افت فشار و ضریب عملکرد حرارتی بررسی گردید. تفاوت این کار با تحقیقات قبلی این



است که در این تحقیق به بررسی تاثیر شکل، گام طولی و عدد رینولدز در میکروکانال پرداخته شده است و می‌تواند باعث بهبود انتقال گرما شوند.

### مبانی نظری و شبیه‌سازی

برای تحلیل جریان سیال، شبیه‌سازی انتقال حرارت و افت فشار و یافتن کمیت‌های اصلی در میدان جریان، می‌بایست معادلات مربوط به آن حل گردد. در این بخش، مبانی نظری مرتبط با انتقال حرارت و جریان سیال در میکروکانال‌ها و همچنین روش شبیه‌سازی عددی مورد استفاده در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا به معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت پرداخته شده و سپس روش عددی حجم محدود که برای حل این معادلات استفاده شده است، توضیح داده خواهد شد. قوانین حاکم بر حرکت یک سیال شامل قانون بقاء جرم، اندازه حرکت و قانون بقاء انرژی می‌باشند. اعمال این قوانین به شکل‌گیری معادلات پیوستگی، مومنتوم، و انرژی منجر می‌شوند. به جز موارد ساده که بتوان معادلات را ساده‌سازی کرد و حل تحلیلی برای آن یافت، در اکثر موارد، حل تحلیلی این معادلات وجود ندارد و به همین دلیل است که از روش‌های عددی کمک گرفته می‌شود. در این تحقیق برای حل عددی معادلات حاکم بر پایه روش حجم محدود، یک مدل سه بعدی از یک میکروکانال در نرم افزار انسیس فلونت بررسی شده است.

### معادلات حاکم

معادله پیوستگی [۱۶]:

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم [۱۶]:

$$\rho U \cdot \nabla U = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) \quad (2)$$

معادله انرژی [۱۶]:

$$\rho c_p U \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T) \quad (3)$$

در معادلات (۱) تا (۳)، پارامترهای  $\rho$ ،  $U$ ،  $T$ ،  $P$ ،  $C_p$ ،  $\mu_f$ ،  $\lambda_f$  به ترتیب چگالی، سرعت، دما، فشار، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، ویسکوزیته سیال موثر، هدایت حرارتی موثر می‌باشند. به منظور ارزیابی رفتار ترموهیدرولیکی میکروکانال، از سه پارامتر عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد استفاده می‌شود. عدد بدون بعد ناسلت متوسط به صورت رابطه (۴)، ضریب اصطکاک به صورت رابطه (۵) و عدد رینولدز به صورت رابطه (۶)، تعریف می‌شوند [۱۵].

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4)$$

$$f = \frac{\Delta P D_h}{\frac{1}{2} \rho V^2 L} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (6)$$

که در این روابط  $D_h$  قطر هیدرولیکی میکروکانال است و به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود [۱۵].

$$D_h = \frac{4 \times (B \times H)}{2 \times H + 2 \times B} \quad (7)$$



همچنین با توجه به اثر دوگانه میدان بر رفتار ترموهیدرولیکی سیستم، از مفهوم معیار ارزیابی عملکرد یا ضریب عملکرد که در بر دارنده اثر همزمان ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک می‌باشد، استفاده گردیده است. در رابطه (۸)، رابطه ضریب عملکرد آورده شده است. اندیس  $s$  بیانگر حالت مبنا می‌باشد [۱۵].

$$PEC = \left( \frac{Nu}{Nu_s} \right) / \left( \frac{f}{f_s} \right)^{1/3} \quad (8)$$

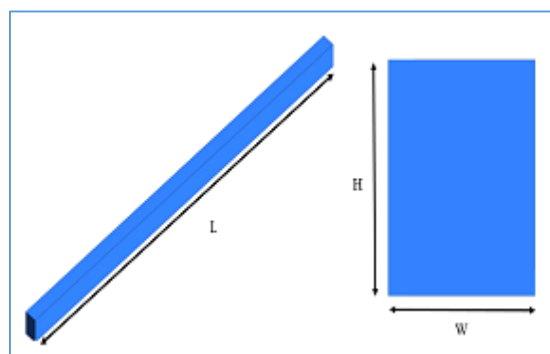
در پژوهش حاضر، تاثیر قراردادن فین‌هایی با شکل سهمی، سوزنی، استوانه‌ای و مخروطی جهت ایجاد آشفتگی در جریان به منظور افزایش انتقال حرارت و بهبود عملکرد میکروکانال مطالعه شده است. شکل (۱) هندسه فین‌ها و شکل (۲) هندسه میکروکانال‌ها را نشان می‌دهد. ابعاد هندسه مورد استفاده در مدل در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات میکرو کانال

پارامتر	اندازه
عرض میکرو کانال $W$	۳۱۵ میکرومتر
ارتفاع میکرو کانال $H$	۴۰۰ میکرومتر
طول میکرو کانال $L$	۱۰ میلی‌متر



شکل ۱: شماتیک هندسه فین‌های بررسی شده



شکل ۲: هندسه میکرو کانال

### شرایط مرزی

شرایط مرزی در دیواره داخلی میکروکانال شرط عایق و کف کانال شرط شار حرارتی در نظر گرفته شده است. در ورودی سرعت و دما ثابت در نظر گرفته می‌شوند، سرعت ورودی بر حسب عدد رینولدز محاسبه می‌شود جریان سیال با عدد رینولدز ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ عبور داده شده و خروجی میکروکانال در فشار محیط در نظر گرفته می‌شود. جریان مورد بررسی به صورت تراکم ناپذیر، پایا، نیوتنی، آرام و به صورت تک‌فازی و کف میکروکانال دارای شار حرارتی ثابت ۲۰۰۰۰۰ در نظر گرفته خواهند شد. دمای ورودی ۳۰۰ درجه کلوین می‌باشد.

<sup>1</sup> Performance Evaluation Criteria (PEC)

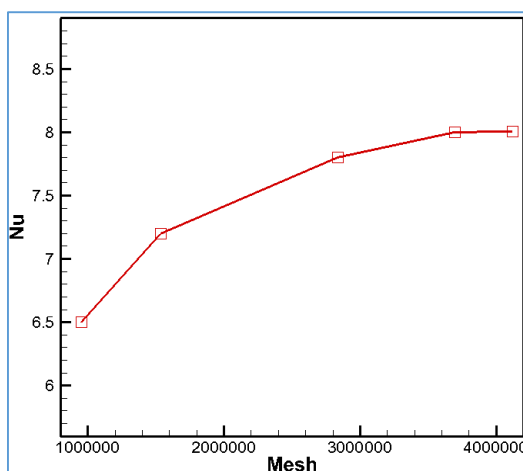


## نتایج و بحث

برای تحلیل معادلات حاکم بر مسئله بر اساس روش حجم محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت حل شده‌اند. با توجه به نوع جریان، جهت حل مسئله از حل‌کننده فشار مینا<sup>۱</sup> و برای ارتباط فشار و سرعت از سیمپل<sup>۲</sup> استفاده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی از گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده شده است.

### استقلال از شبکه

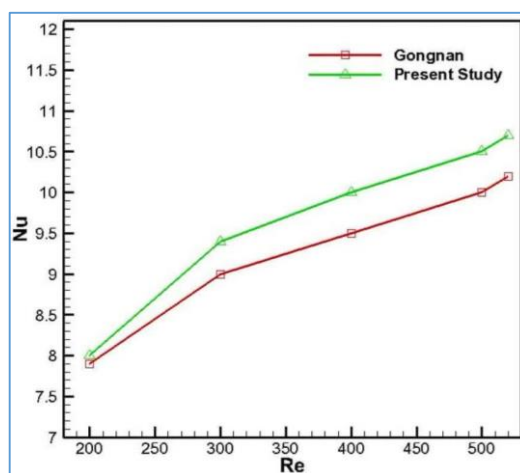
برای بررسی استقلال از شبکه به بررسی عدد ناسلت در پنج شبکه برای کانال پرداخته شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد از حالت سوم به بعد تغییر چندانی در نتایج مشاهده نشده است و نتایج تقریباً یکسان هستند. بنابراین حالت چهارم که تعداد سلول آن ۳۶۹۷۳۵۷ می‌باشد جهت مدل‌سازی و استخراج نتایج انتخاب گردید.



شکل ۳: نمودار استقلال از شبکه

### اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی یک میکروکانال که سیال داخل آن آب بوده را مدل کرده و عدد ناسلت دیواره مبدل را بدست آورده و با نتایج کار گوانجن [۱۶] برای یک میکروکانال مقایسه انجام شده است. نتایج این مقایسه در شکل (۴) آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، عدد بی بعد ناسلت کار حاضر و گوانجن به صورت میانگین در حدود ۴ درصد اختلاف دارد.



شکل ۴: مقایسه کار حاضر با کار گوانجن

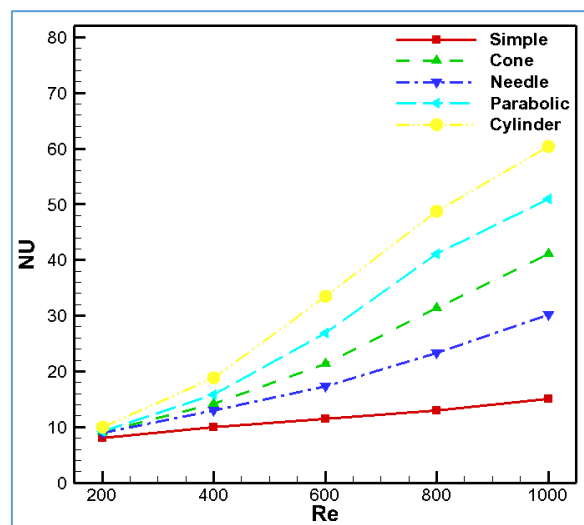
<sup>1</sup> Pressure-based

<sup>2</sup> Coupled

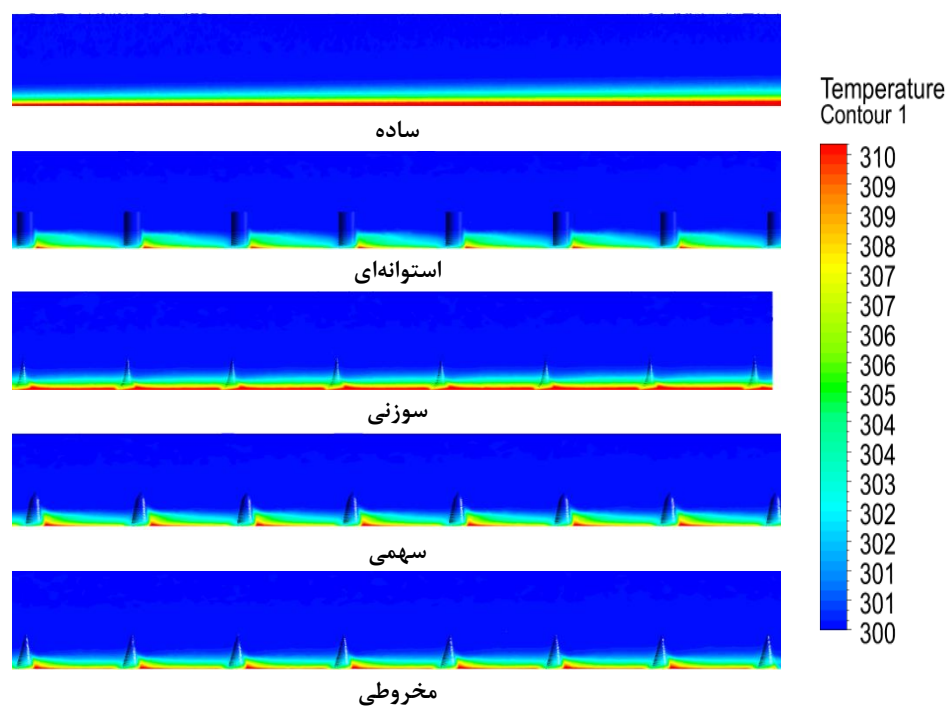


## بررسی تاثیر نوع فین

در این بخش به بررسی تاثیر نوع فین در میکروکانال پرداخته شده است. در این حالت ارتفاع فین‌ها ۱ میلی‌متر طول و قطر فین‌ها ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده و گام فین‌ها ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشند. در شکل (۵) نمودار تاثیر نوع فین بر عدد ناسلت و در شکل (۶) کانتور تاثیر نوع فین بر دما به نمایش درآمده است. همانطور که در کانتور دما مشاهده می‌شود با تغییر شکل فین مسیر جریان تحت تاثیر قرار می‌گیرد، با تغییر شکل فین آشفتگی جریان تغییر خواهد کرد. تغییر در شکل فین می‌تواند بر جریان لایه‌های سیال اثر بگذارد. با تغییر شکل سرعت سیال تغییر می‌کند بنابراین بر روی لایه مرزی تاثیر خواهد گذاشت و برخورد جریان مرکزی با دیواره‌های کناری بیشتر شده و میزان انتقال حرارت جابجایی بین سیال و سطح افزایش می‌یابد و گرادیان دما افزایش خواهد یافت.



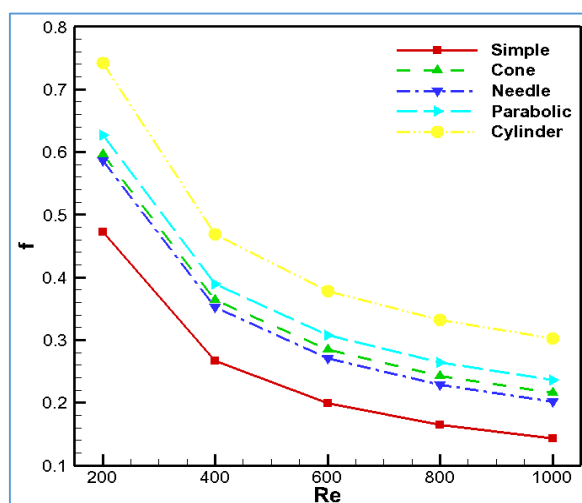
شکل ۵: تاثیر نوع فین بر عدد ناسلت



شکل ۶: تاثیر نوع فین‌ها بر کانتور دما

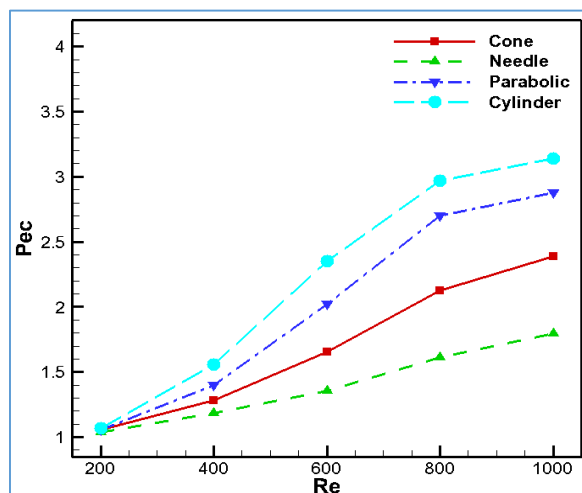


به طوری که در شکل (۶) مشاهده می‌شود در یک عدد رینولدز ثابت ۲۰۰، با تغییر شکل از حالت ساده به حالت استوانه‌ای عدد ناسلت در حدود ۱۹/۴۶ درصد افزایش می‌یابد و این تغییرات در شکل سهمی در حدود ۱۳/۷۵ درصد، در شکل سوزنی در حدود ۱۰/۵۱ درصد و در شکل مخروطی در حدود ۱۲/۳۲ می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ در شکل سهمی عدد ناسلت در حدود ۸۱/۸۱ درصد افزایش می‌یابد. در شکل (۷) تاثیر نوع فین بر ضریب اصطکاک به نمایش درآمده است. تغییر در شکل فین می‌تواند بر جریان لایه‌های سیال اثر بگذارد. با تغییر شکل، سرعت سیال تغییر می‌کند لذا بر روی افت فشار جریان و بر اصطکاک دیواره‌ها با سیال تاثیر خواهد گذاشت، همان طور که مشاهده می‌شود در یک عدد رینولدز ثابت ۲۰۰، با تغییر شکل از حالت ساده به حالت استوانه‌ای ضریب اصطکاک در حدود ۳۶/۳ درصد افزایش می‌یابد و این تغییرات در شکل سهمی در حدود ۲۴/۷ و سوزنی در حدود ۱۹/۴۶ و در شکل مخروطی در حدود ۲۰/۷۷ درصد می‌باشد، همچنین با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ در شکل سهمی ضریب اصطکاک در حدود ۱۶۴/۷ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۷: تاثیر نوع فین بر ضریب اصطکاک

همانطور که این شکل (۸) مشاهده می‌شود، در یک عدد رینولدز ثابت ۲۰۰ با تغییر شکل از حالت ساده به حالت استوانه‌ای ضریب عملکرد در حدود ۶/۴ درصد افزایش می‌یابد و این میزان تغییرات در شکل سهمی در حدود ۵/۲ درصد و در سوزنی در حدود ۳/۸۲ درصد و مخروطی در حدود ۵/۲۵ درصد می‌باشد، همچنین با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ در شکل سهمی ضریب عملکرد در حدود ۶۳/۳ درصد افزایش می‌یابد.

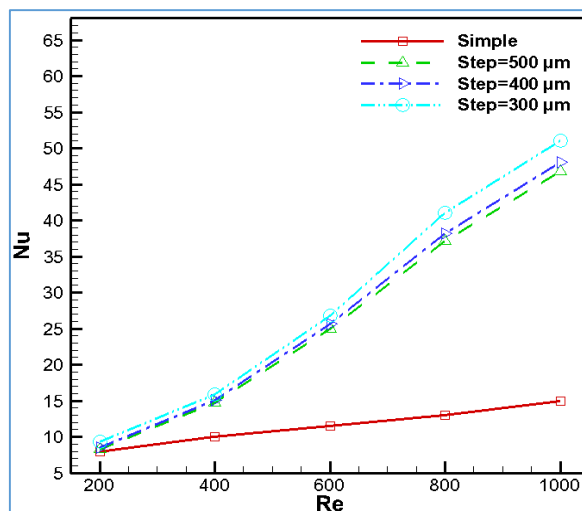


شکل ۸: نمودار تاثیر شکل فین بر ضریب عملکرد



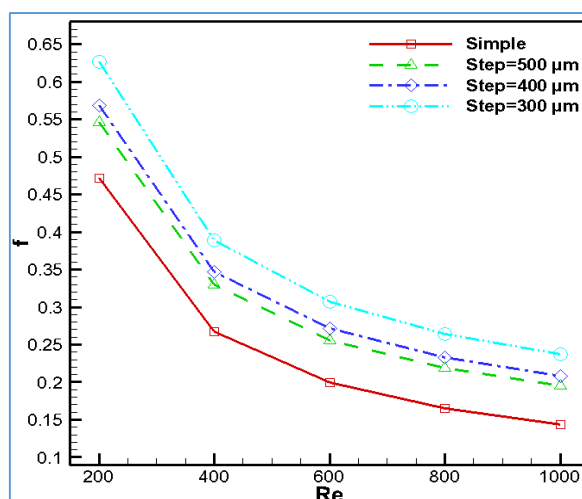


در شکل (۹) تاثیر گام طولی فین‌ها بر عدد ناسلت به نمایش درآمده است. بطوری‌که هرچه گام طولی فین‌ها بیشتر شود آشفته‌گی جریان و انحراف جریان کمتر خواهد شد و مسیر جریان با مسیر میکروکانال سریع‌تر همسان خواهد شد. با تغییر مسیر حرکت سیال و افزایش آشفته‌گی سیال، سیال با دمای کمتر به ناحیه مجاور سطح گرم میکروکانال وارد شده و گرادیان دما افزایش خواهد یافت و انتقال حرارت جابجایی بیشتر شده و دمای سطح میکروکانال کمتر خواهد شد. همچنین در عدد رینولدز ثابت ۱۰۰۰، با تغییر گام از ۵۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، عدد ناسلت در حدود ۹/۱۴ درصد افزایش می‌یابد.



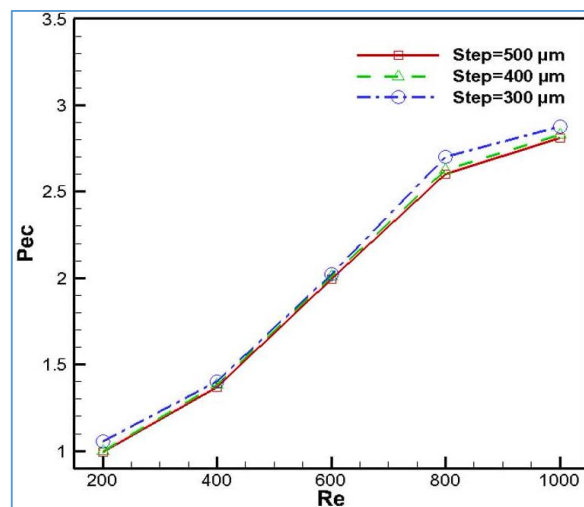
شکل ۹: نمودار تاثیر گام طولی فین‌ها بر عدد ناسلت

شکل (۱۰) تاثیر گام طولی فین‌ها را بر ضریب اصطکاک نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با کاهش گام طولی فین‌ها مقاومت مسیر بیشتر شده و افت فشار جریان نیز بیشتر خواهد شد. در عدد رینولدز ثابت ۱۰۰۰، با تغییر گام طولی فین‌ها از ۵۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، ضریب اصطکاک در حدود ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ در گام طولی ۵۰۰ میکرومتر ضریب اصطکاک در حدود ۱۷۹/۳۹ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰: نمودار تاثیر گام طولی فین‌ها بر ضریب اصطکاک

در شکل (۱۱) در عدد رینولدز ثابت ۱۰۰۰، با تغییر گام طولی فین‌ها از ۵۰۰ تا ۳۰۰ ضریب عملکرد در حدود ۶۵/۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰، در گام ۳۰۰ میکرومتر، ضریب عملکرد در حدود ۶۳/۳ درصد افزایش می‌یابد. از لحاظ عملکرد حرارتی گام ۳۰۰ میکرومتر بهترین عملکرد و از لحاظ ضریب اصطکاک می‌توان گفت بهترین حالت گام ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد و از لحاظ ضریب عملکرد گام ۳۰۰ میکرومتر مناسب‌تر می‌باشد.



شکل ۱۱: نمودار تاثیر گام طولی فین‌ها بر ضریب عملکرد

### نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی عددی جریان سیال در میکروکانال با در نظر گرفتن چند شکل مختلف فین انجام شده است. تاثیر عدد رینولدز، شکل و گام فین در میکروکانال بر عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. بر اساس بررسی‌های انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

- با تغییر شکل فین از حالت ساده به حالت استوانه‌ای در رینولدز ثابت ۲۰۰، عدد ناسلت ۲۴/۱۷ درصد و ضریب اصطکاک ۵۶/۹۸ افزایش یافت. در فین سهمی شکل این افزایش عدد ناسلت ۱۵/۹۴ درصد و ضریب اصطکاک ۳۲/۷۶ درصد، در فین سوزنی شکل عدد ناسلت ۱۱/۷۵ درصد و ضریب اصطکاک ۲۴/۱۷ درصد و در فین مخروطی شکل این افزایش عدد ناسلت ۱۴/۰۵ و ضریب اصطکاک ۲۶/۲۱ درصد افزایش می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ در شکل سهمی ضریب اصطکاک در حدود ۶۲/۲۳ درصد کاهش می‌یابد.
- با تغییر شکل فین از حالت ساده به حالت استوانه‌ای در رینولدز ثابت ۲۰۰، ضریب عملکرد ۶/۸۴ درصد افزایش می‌یابد و این تغییرات در شکل سهمی ۵/۵ درصد و سوزنی ۳/۹۷ درصد و مخروطی ۵/۵۴ درصد می‌باشد.
- در رینولدز ثابت ۱۰۰۰، با تغییر گام طولی فین‌ها از ۵۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، عدد ناسلت ۹/۱۴ درصد افزایش، ضریب اصطکاک ۲۱ درصد افزایش می‌یابد همچنین با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ در گام طولی ۵۰۰ میکرومتر ضریب اصطکاک ۱۷۹/۳۹ درصد کاهش می‌یابد.
- در رینولدز ثابت ۱۰۰۰، با تغییر گام طولی فین‌ها از ۵۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، ضریب عملکرد در حدود ۲ درصد افزایش می‌یابد همچنین با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ در گام ۳۰۰ میکرومتر ضریب عملکرد ۱۷۲/۶۴ درصد افزایش می‌یابد. بهترین عملکرد و ضریب عملکرد گام ۳۰۰ میلی‌متر از لحاظ ضریب اصطکاک می‌توان گفت بهترین حالت گام ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد و از لحاظ ضریب عملکرد گام ۳۰۰ میلی‌متر مناسب‌تر می‌باشد.
- با افزایش عدد رینولدز و تبدیل جریان از حالت آرام به حالت آشفته، انتقال حرارت افزایش و افت فشار هم افزایش می‌یابد، ولی چون افزایش افت فشار از افزایش انتقال حرارت بیشتر است لذا ضریب عملکرد سیستم در جریان آشفته نسبت به جریان آرام کاهش پیدا می‌کند.

### مراجع

- [1] Tuckerman, D.B., Pease, R.F., (1981), High performance heat sinking for VLSI, IEEE Electron, Dev. Letts. EDL-Vol 2, pp 126-129.
- [2] Ryu, J. H., Choi, D. H. and Kim, S. J., (2002), Numerical optimization of the thermal performance of a microchannel heat sink, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.45, pp.2823-2827.



- [3] Wu, H. Y., and Cheng, P., (2003), An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions, *Int. J. Heat Mass Transfer* 46, pp. 2547–2556.
- [4] Peles, Y., Kosar, A., Mishra, C., Kuo, C., and Schneider, B., (2005), Forced convection heat transfer across a pin fin micro heat sink, *Int. J. Heat Mass Transfer*
- [5] Li, J., and Peterson, G. P., (2007), 3-Dimensional numerical optimization of silicon-based high performance parallel microchannel heat sink with liquid flow, *Int. J. Heat Mass Transfer* 50, pp. 2895–2904.
- [6] Hasan, M. I., Rageb, A. A., Yaghoubi, M., and Homayoni, H., (2009), Influence of channel geometry on the performance of a counter flow microchannel heat exchanger, *Int. J. Thermal Sciences* 48, pp. 1607–1618.
- [7] Chen, J. J., Chen, C. H., and Shie, S. R., (2011), optimal designs of staggered Dean Vortex micromixers, *Int. J. Mol. Sci.*, 12, 3500-3524.
- [8] Tseng, L. Y., Yang, A. S., Lee, C. Y., and Hsieh, C. Y., (2011), CFD-Based optimization of a diamond-obstacles inserted micromixer with boundary protrusions, *Engineering Application of Computational Fluid Mechanics* Vol. 5, No. 2, pp. 210-222.
- [9] Lee Y. J., Lee P. S., Chou S. K., (2013), Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer in the Enhanced Microchannel With Oblique Fins, *Journal of Heat Transfer*, 135 (4), 041901- 0419010.
- [10] Zhu X. W., Fu Y. H., Zhao J. Q., Zhu L., (2015), Three-dimensional numerical study of the laminar flow and heat transfer in a wavy-finned heat sink filled with  $Al_2O_3$ /ethylene glycol water nanofluid, *NUMERICAL HEAT TRANSFER*, 69 (2), 1–14.
- [11] Bahiraei, M. and Heshmatian, S., (2017), Application of a novel biological nanofluid in a liquid block heat sink for cooling of an electronic processor: Thermal performance and irreversibility considerations, *Energy Conversion Management*, 149(1), pp. 155–167
- [12] Al-Rashed, A.A., Shahsavari, A., Rasooli, O., Moghimi, M.A., Karimipour, A. and Tran, M.D., (2019), Numerical assessment into the hydrothermal and entropy generation characteristics of biological water-silver nanofluid in a wavy walled microchannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 104, pp. 118–126.
- [13] Al-Rashed, A.A., Shahsavari, A., Rasooli, O., Moghimi, M.A., Karimipour, A. and Tran, M. D., (2019), Numerical assessment into the hydrothermal and entropy generation characteristics of biological water-silver nanofluid in a wavy walled microchannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 104, pp. 118–126.
- [14] Bahoosh, R. and Falahat, A.R., (2021), Heat transfer of nanofluid through helical minichannels with secondary branches. *Heat and Mass Transfer*, 57(1), pp.
- [15] Abdulqadir A. A., Hayder M. J., Dhamyaa Saad Khudhur, (2019), Performance optimization of a cylindrical mini-channel heat sink using hybrid straight–wavy channel, *International Journal of Thermal Sciences* 146, pp. 106-111
- [16] Gongnan X., Yanlong L., Fengli Zh., Bengt S., (2015), Analysis of micro-channel heat sinks with rectangular-shaped flow obstructions, *NUMERICAL HEAT TRANSFER, PART A, VOL. 00, NO. 00*, pp. 1–17
- [۱۷] محمدی مرتضی، مظلومی سید حسین، حسینی سید مسعود، خوشوقت علی آبادی مرتضی، ۱۳۹۷، بهبود عملکرد هیدرولیکی- حرارتی چاه‌های حرارتی میکروکانال با استفاده از پین-فین‌های V شکل و نانوسیال  $Al_2O_3$  / آب، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها، دوره ۸ شماره ۴، صفحات ۲۱۱–۲۲۸.
- [۱۸] همتی سنگ بیلی، محمد و احمدی ندوشن، افشین، ۱۴۰۰، شبیه سازی عددی عملکرد حرارتی میکروکانال سه لایه با درج میکرو پین-فین، چهارمین کنفرانس ملی مکانیک محاسباتی و تجربی
- [۱۹] فلاح عباسی مریم، شکوهمند حسین و خیاط مرتضی، ۱۴۰۱، مطالعه‌ی تجربی اثر لایه الکتریکی دوگانه در انتقال گرما به میکرولوله گرمایی با مقطع مثلثی، نشریه علمی- تخصصی تبدیل انرژی، دوره ۹، شماره ۱، صفحات ۵۵–۷۲.
- [۲۰] ایرامنش عقیل، ۱۴۰۲، بررسی عددی تاثیر فین L شکل بر بهبود فرآیند ذوب یک مبدل حرارتی دو لوله ای، اولین همایش ملی نوآوری در صنایع سبز.