**مطالعه تاثیر الگوهای متفاوت دندانه اره‌ای میکروپین فین بر کارایی چاه حرارتی میکروکانالی**

آلا خطیبی 1، محمد مهدی هیهات 2\*، محمد ضابطیان طرقی 3 ، احمدرضا روزبهی

|  |  |
| --- | --- |
| 1دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس | Ala\_khatibi@modares.ac.ir |
| 2عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس | mmheyhat@modares.ac.ir |
| 3عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس  4دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس | zabetian@modares.ac.ir |
| Ahmadreza.Roozbehi@modares.ac.ir |

# چكيده

در این مقاله، تجزیه و تحلیل عددی بر روی چاه حرارتی میکروکانالی با آرایش متفاوت پین فین ها انجام شده است. تغییر ارتفاع پین فین ها در آرایه‌ای از یک، دو و سه تکرار دندانه، چاه حرارتی پین فین ​​با الگوی دندانه اره ای را ایجاد می‌کند و با چاه حرارتی میکروکانال با ارتفاع یکنواخت پین فین ها با نسبت 0.75ارتفاع فین به ارتفاع کانال مقایسه شده است. آب به عنوان مایع خنک کننده استفاده شده است که در آن عدد رینولدز ورودی از 400 تا 1000 متغیر است. نتایج عددی با ارائه عدد ناسلت، افت فشار، ضریب عملکرد حرارتی و هم چنین کانتور توزیع دما و سرعت مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می دهد، عملکرد حرارتی با افزایش تعداد دندانه‌های الگوی دندانه اره‌ای پین فین افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان دهنده افزایش افت فشار با تعداد دندانه ها به دلیل افزایش انسداد کانال است. به طور کلی عملکرد الگو های دندانه اره ای با سه دندانه ، بهتر از ارتفاع یکنواخت پین فین است. لذا الگوی دندانه اره ای پین فین ها با تعداد دندانه بیشتر رفتار جریان مطلوب را برای انتقال حرارت بهتر تسهیل می کند.

**کليدواژه­ها:** پین فین شش ضلعی، میکروکانال، چاه حرارتی، عملکرد حرارتی

**Study of the effect of different micropin fin saw tooth patterns on the performance of a microchannel heat sink**

**Ala khatibi1, Mohammad Mahdi Heyhat2\*, Mohammad zabetiyan 3, Ahmadreza rouzbehi4**

1MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University Ala.khatibi97@gmail.com

|  |  |
| --- | --- |
| 2\* Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University | mmheyhat@modares.ac.ir |
| 3 Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University | zabetian@modares.ac.ir |
| 4MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University | Ahmadreza.Roozbehi@modares.ac.ir |

**Abstract**

In this paper, numerical analysis is performed on a microchannel heat sink with various arrangements of pin fins. The patterns of pin fins are saw tooth with one, two and three repetitions of the teeth. The outcomes are compares with a microchannel heat sink with a uniform height of the pins with a ratio of 0.75 fin height to channel height. Single-phase liquid water is used as the coolant in which the Reynolds number varies from 400 to 1000. The numerical results including Nusselt number, pressure drop, and thermal performance coefficient as well as temperature and velocity distribution contour are presented and discussed. The results show that the thermal performance increases with increasing the number of teeth. Furthermore, pressure drop is increased by increasing the number of teeth due to increased channel obstruction. In general, the performance of saw tooth patterns with three teeth is better than the uniform height of the pin fin.

**Keywords:** Hexagonal pin fin, Microchannel, heat sink, thermal performance

**مقدمه**

با پیشرفت تکنولوژی و به طور خاص توسعه صنایع الکترونیک و با توجه به کوچک سازی قطعات الکترونیکی و به دنبال آن افزایش حرارت تولیدی توسط این قطعات، توانایی دفع حرارت به منظور افزایش بهره‌وری و طول عمر دستگاه فاکتور تعیین کننده ای در طراحی محسوب می شود. بنابراین نیاز به بررسی تکنیک هایی جهت بهبود انتقال حرارت، همزمان با کاهش افت فشار در چاه های حرارتی، امری اجتناب ناپذیر است. به خوبی درک شده است که روش های مرسوم خنک کاری مانند جریان هوای طبیعی و اجباری روی چاه حرارتی پتانسیل محدودی برای دفع شارهای حرارتی بالا دارد [1]. تلاش های مستمری برای حل این مشکل صورت گرفته و روشهای مختلفی پیشنهاد شده است. در میان آنها چاه حرارتی میکروکانالی دارای مزایای بسیاری به دلیل ویژگی ذاتی آن یعنی نسبت سطح انتقال حرارت به حجم بالا و همچنین سهولت اجرای آن، تبادل حرارت کارآمد، ساختار فشرده، اثر خنک کنندگی قابل توجه و مصرف کم خنک کننده است. بنابراین، چاه حرارتی میکروکانال معمولی به طور گسترده در بسیاری از کاربردهای مهم استفاده شده است[2]. روش های به کار گرفته شده جهت بهبود عملکرد چاه حرارتی میکروکانال به دو دسته روش های فعال و غیر فعال تقسیم بندی می شود. روش های فعال از انرژی خارجی در سیستم برای بهبود عملکرد انتقال حرارت استفاده می کنند، در حالی که روش های غیر فعال به انرژی خارجی نیازی ندارند. به طور کلی روش های غیر فعال به دلیل هزینه پایین تر در مقایسه با روش های فعال ترجیح داده می شوند. روش های غیرفعال را می توان به دو صورت (الف) اصلاح طراحی هندسی میکروکانال، (ب) پتانسیل سیال کاری و جریان تقسیم بندی کرد[3و4]. در میان تمامی این تکنیک ها، اصلاح هندسی میکروکانال بیشتر توسط جامعه پژوهشی مورد بررسی قرار گرفته است[5]. اصلاحات در طراحی میکروکانال شامل اصلاح کامل ناحیه انتقال حرارت یا تغییرات خاصی در مسیر جریان و منیفولد ورودی/خروجی است. طراحی پلنوم ورودی/خروجی یکی از اصلاحاتی است که برای تسهیل توزیع یکنواخت مایع خنک‌کننده در همه کانال‌ها و در نتیجه کاهش توزیع نادرست جریان در میکروکانال پیشنهاد شده است. هم چنین پیکربندی گذرگاه های جریان و مقطع میکروکانال به طور قابل توجهی بر سرعت انتقال حرارت تأثیر می گذارد[6]. سوئی و همکاران [7] عملکرد حرارتی میکروکانال های مستطیلی منحنی الشکل را گزارش کرد و آن را برتر از میکروکانال های مستقیم یافت. وانگ و همکاران [8] میکروکانال های مستطیلی، ذوزنقه ای و مثلثی را به صورت عددی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که میکروکانال مستطیلی کمترین مقاومت حرارتی را دارد و به دنبال آن ذوزنقه ای و مثلثی قرار دارند. میکروپین فین ها یکی از کارآمدترین ابزار ها و روش های غیر فعال جهت بهبود انتقال حرارت میکرو کانال ها هستند. مطالعات نشان می دهد میکروپین فین ها علاوه بر افزایش سطح باعث ایجاد اختلاط بهتر و درنتیجه بهبود عملکرد انتقال حرارت می شوند. عوامل مختلفی نظیر سطح مقطع، ابعاد هندسی، تراکم پیکربندی و ... میکروپین فین ها در ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک موثر و قابل مطالعه و بررسی اند. مطالعه یانگ و همکاران[9] نشان داد که شکل میکروپین فین خصوصیات حرارتی چاه حرارتی میکروکانال را تغییر می دهد و باعث کمترین مقاومت حرارتی و یکنواختی سطح تراشه با استفاده از میکروپین فین های شش ضلعی و کمترین افت فشار با میکروپین فین های مقطع دایره ای می شود. محمد علی و ارشد [10] به منظور بررسی اثر زاویه میکروپین فین های مربعی بر عملکرد حرارتی چاه های حرارتی میکروکانال مطالعه تجربی انجام دادند. آن ها از سه چاه حرارتی با میکروکانال هایی با زوایای 22.5، 45 و 90 درجه نسبت به جریان استفاده کردند.که این امر را به برهم کنش بهتر سیال کاری با میکروپین فین ها ​​در حالت زاویه 22.5 درجه نسبت به جریان، در مقایسه با هر دو مورد دیگر، نسبت دادند، زیرا در این حالت مایع مسیر مستقیمی برای حرکت از ورودی تا خروجی پیدا نمی کند. لازم به ذکر است که تحقیقات در این زمینه بر روی میکروکانال های کاملاً بسته متمرکز شده است که در آنها تغییرات ارتفاع پین فین ها لحاظ نشده است و معمولاً سطح بالایی پین فین همیشه به صفحه پوششی چاه حرارتی متصل می شود. اخیراً، آثار کمی [11و12] در ادبیات مربوط به نوع باز چاه حرارتی میکروکانالی گزارش شده است. چاه حرارتی میکروکانال باز اگر ارتفاع پین فین کوچکتر باشد ایجاد می شود و در نتیجه فضای باز بین سطح بالایی پین فین و پوشش چاه حرارتی ایجاد می شود.

پراجاپاتی [12] ارتفاع پین فین میکروکانال مستطیلی را تغییر داد و متوجه شد که پیکربندی باز چاه حرارتی با ارتفاع 75 تا 80 درصد پین فین دارای نرخ انتقال حرارت بهینه در مقایسه با چاه حرارتی کاملا بسته است. به طور مشابه، یین و همکاران[11] ادعا کرد که علاوه بر افزایش انتقال حرارت، ناپایداری های جوش جریان نیز می تواند به طور قابل توجهی در میکروکانال باز سرکوب شود.

از بررسی ادبیات موضوع می توان به برتری سطح مقطع شش ضلعی برای پین فین پی برد و ضعف این سطح مقطع در افت فشار بیشتر نسبت به سطح مقطع دایروی می باشد. به این ترتیب می توان با استفاده از میکروکانال باز تا حد قابل توجهی اثرات انسداد را ضمن افزایش عملکرد حرارتی، کاهش داد. از بحث قبل، آشکار است که مطالعات بسیار کمی در مورد چاه حرارتی میکروکانالی باز گزارش شده است. به ویژه، ظرفیت اتلاف حرارت الگوهای دندانه اره ای ارتفاع پین فین ها به ندرت بررسی شده است. لازم به ذکر است در بررسی الگوی ارتفاع ثابت پین فین ها در چاه حرارتی الگوی مورد بررسی حاضر با نسبت 0.75 ارتفاع پین فین ها به ارتفاع کانال می باشد. هدف از این پژوهش مقایسه سه الگوی دندانه اره ای ارتفاع پین فین ها با تعداد دندانه های

متفاوت و الگوی ارتفاع ثابت با نسبت ارتفاع پین فین ها به ارتفاع کانال معادل 0.75 می باشد.

**هندسه و رویکرد عددی**

در مطالعه حاضر، مس به عنوان ماده برای چاه حرارتی در نظر گرفته شده‌است و آب به عنوان سیال خنک کننده انتخاب شده‌است. طرح کلی چاه حرارتی میکروکانال با پین فین شش ضلعی در شکل 1 نشان‌داده شده‌است. به منظور تسهیل تحقیقات و صرفه‌جویی در هزینه محاسباتی، تنها یک واحد چاه حرارتی به دلیل تقارن آن شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود که شامل یک پین فین شش ضلعی کامل و نصف آن در هر دو طرف کانال برای انعکاس کامل ویژگی‌های ساختاری است. در شکل 2 الگوهای متفاوت ارتفاع پین فین ها به وضوح نشان داده شده است. در جاهایی که ارتفاع پین فین کوتاه‌تر نسبت به ارتفاع کانال باشد، یک فضای باز بین سطح بالایی پین فین و و صفحه پوششی چاه حرارتی در دسترس است. هم چنین با توجه به شکل می توان دریافت که هرچه ارتفاع پین فین کوتاه‌تر باشد، فضای باز بیشتری در دسترس است و برعکس. در کار حاضر، هندسه های سه بعدی چاه حرارتی به

صورت عددی حل شده اند. 25 ردیف پین فین شش ضلعی با اندازه یکسان در دامنه قرار دارد. ارتفاع پین فین برای تشخیص مناسب‌ترین

پیکربندی چاه حرارتی میکرو کانال تغییر کرده‌است. از این رو چهار چاه حرارتی مختلف بررسی شده اند. در حالت اول با نسبت ارتفاع پین فین به ارتفاع کانال، معادل 0.75 و در حالت های دیگر سه چاه حرارتی با ارتفاع متغیر پین فین ها به صورت الگوهای دندانه اره ای با یک ، دو و سه دندانه در نظر گرفته شده است. هدف بررسی عملکرد حرارتی نسبی این چهار چاه حرارتی میکرو کانال و تجزیه و تحلیل آن است. علاوه بر این، یک چاه حرارتی دیگر با سطحی بدون پین فین برای



شکل 1: نماهای متفاوت چاه حرارتی میکروکانال با میکرو پین فین شش ضلعی

پیش‌بینی اثر و فاکتور عملکرد حرارتی چاه حرارتی، مورد مطالعه قرار گرفته‌است. از این رو، در مجموع پنج هندسه مختلف به طور جامع مورد

بررسی قرار گرفته‌اند. پارامترهای هندسی چاه حرارتی در جدول ۱ آورده شده ‌است.

جدول1 : پارامتر های هندسی چاه حرارتی

|  |  |
| --- | --- |
| پارامتر | مقدار (mm) |
| ارتفاع کانال () | 0.625 |
| ضخامت دیواره کف () | 0.25 |
| ارتفاع پین فین () | 0.625-0.01 |
| عرض کانال () | 2.89 |
| طول ضلع پین فین های شش ضلعی() | 0.5 |
| فاصله اضلاع جانبی () | 2.02 |
| طول کانال () | 25 |

همانطور که اشاره شد در الگوی ارتفاع ثابت نسبت ارتفاع را به صورت معادله 1 تعریف می کنیم:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

****

شکل 2: الگوهای متفاوت ارتفاع پین فین، (الف)الگوی ارتفاع ثابت با نسبت ارتفاع پین فین به ارتفاع کانال، معادل 0.75، (ب) الگوی ارتفاع دندانه اره ای با یک دندانه (ج)الگوی ارتفاع دندانه اره ای با دو دندانه ،(د) الگوی ارتفاع دندانه اره ای با سه دندانه

**معادلات حاکم و شرایط مرزی**

دو مجموعه از معادلات وجود دارد. یکی برای دامنه سیال و دیگری برای دامنه جامد است.

به منظور ساده تر کردن تحلیل، برخی مفروضات از قبیل:

سیال نیوتنی تراکم ناپذیر، جریان آرام و پایا، شرایط مرزی عدم لغزش در دیواره ها، صرف نظر کردن از انتقال حرارت تشعشعی و فرض دیواره آدیاباتیک برای سطح خارجی، برای پیش بینی جریان سیال و انتقال حرارت در نظر گرفته می شود. همچنین شبیه سازی با فرض ثابت بودن خصوصیات ترموفیزیکی آب مانند چگالی، ویسکوزیته، گرمای ویژه و هدایت حرارتی انجام خواهد شد. بر اساس این فرضیات معادلات حاکم را می توان به صورت زیر بیان کرد:

معادله پیوستگی:

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

معادله مومنتوم:

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

معادله انرژی در سیال

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

معادله انرژی در جامد

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

عدد رینولدز ورودی با استفاده از معادله 6 محسابه می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

که در آن  قطرهیدرولیکی کانال است که به صورت زیر محاسبه می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |

که در آن P و به ترتیب محیط تر شده و مساحت مقطع کانال می باشد.

ضریب اصطکاک کانال به صورت زیر تعریف می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |

که در آن و  به ترتیب افت فشار و طول کلی کانال می باشد.

عدد ناسلت متوسط به صورت زیر قابل محاسبه است:

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |

، ،  و، به ترتیب نمایانگر دمای متوسط سطح در معرض انتقال حرارت جابجایی، متوسط دمای سیال خنک کننده، ضریب هدایت حرارتی سیال و شار حرارتی موثر می باشد. شار حرارتی موثر نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |

که در آن و  مساحت سطح گرم شده و مساحت در معرض انتقال حرارت جابجایی است.

شرایط مرزی نیز به شرح زیر است:

در تمام چاه های حرارتی شار حرارتی ثابت 500 کیلووات بر مترمربع در سطح پایین آن داده می شود سطوح جانبی شرط مرزی تقارن و سطوح باقیمانده شرایط مرزی آدیاباتیک درنظر گرفته شده است. سیال با سرعت یکنواخت وارد کانال می شود و دمای آن در قسمت ورودی 300 کلوین است. در خروجی کانال، شرط مرزی فشار خروجی معادل با اتمسفر وجود دارد. عدد رینولدز ورودی از 400 تا 1000 متغیر است. بنابراین، جریان آرام در چاه حرارتی حاکم است.

**حل عددی و تولید شبکه**

از نرم افزار مبتنی بر حجم محدود FLUENT 2021 R2 به منظور حل معادلات حاکم استفاده شد. دامنه محاسباتی با استفاده از عناصر حجمی چهار وجهی گسسته شدند. به منظور بهینه سازی پیکربندی مش، یک آزمون استقلال شبکه انجام شده است. پنج مجموعه مختلف از مش با اندازه های مختلف ایجاد شده است. شکل 3 تغییرات افت فشار بر حسب اندازه شبکه را برای یک نمونه داده و هندسه مورد بررسی نشان می دهد.



شکل 3 : نمودار افت فشار برحسب تعداد سلول های شبکه

انحراف نتایج شبکه سوم نسبت به نتایج شبکه های چهارم و پنجم زیر 1 درصد است و به منظور کاهش هزینه های محاسباتی شبکه اندازه متناظر با شبکه سوم جهت شبیه سازی در نظرگرفته شده است.

**اعتبار سنجی روش عددی**

مدل عددی حاضر با نتایج میانگین عدد ناسلت و ضریب اصطکاک حاصل از کار عددی یانگ و همکاران [13] مورد اعتبار سنجی قرار گرفت که در شکل های 4 الف و ب آمده است. مطابقت مناسب نتایج نشان می دهد مدل عددی حاضر می تواند برای شبیه سازی مسئله مورد بررسی استفاده شود.



(الف)



(ب)

شکل 4: اعتبار سنجی روش عددی با داده های یانگ و همکاران [13] (الف) ناسلت متوسط (ب) ضریب اصطکاک بر حسب رینولدز

همانطور که در شکل های 4 (الف) و (ب) مشاهده می شود نتایج حاصل از روش عددی حاضر با یافته های یانگ و همکاران [13] مطابقت دارد حداکثر اختلاف بین نتایج روش عددی حاضر و داده های ژای یانگ و همکاران برای ضریب اصطکاک و عدد ناسلت به ترتیب کمتر از 2 و 5 درصد است. و این نشان می دهد که روش عددی حاضر می تواند برای ارزیابی ویژگی های جریان سیال و انتقال حرارت در کانال مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد.

**بحث بر روي نتايج**

شکل 5 تغییرات ناسلت متوسط را برای الگوی ارتفاع های متفاوت پین فین بر حسب عدد رینولدز نشان می دهد. نتیجه مهمی که از این نمودار می توان برداشت کرد این است که، افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش میانگین عدد ناسلت می شود. چنین مشاهداتی نیز توسط محققین مختلف گزارش شده است که ماهیت کار تقریبا مشابهی دارند. هم چنین در چاه حرارتی با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان سیال خنک کننده نیز متعاقبا افزایش می یابد و به دلیل وجود پین فین ها، جریان سیال خنک کننده با اختلاط قابل توجه و توسعه مجدد لایه های مرزی حرارتی و هیدرولیکی مواجه می شود. که در نتیجه انتقال حرارت بهتر و افزایش عدد ناسلت را منجر می شود. عدد ناسلت بزرگتر نمایانگر تاثیر قابل توجه رفتار جریان خنک کننده است که مطمئنا رسیدن به وضعیت مطلوب را تسهیل می کند. مشاهده می شود که افزایش تعداد دندانه الگوی ارتفاع دندانه اره ای افزایش عدد ناسلت را نتیجه می دهد. به طوری که الگوی ارتفاع با سه دندانه بهترین عملکرد حرارتی را نسبت به دندانه های کمتر نشان می دهد. همچنین مشاهده می شود عدد ناسلت الگوی ارتفاع دندانه اره ای با سه دندانه، بیشتر از عدد ناسلت ارتفاع ثابت با نسبت ارتفاع 0.75 می باشد. حقایق فوق مطمئناً نشان می دهد که علاوه بر سطح در معرض سیال خنک کننده، ویژگی های جریان مایع خنک کننده نیز بر ظرفیت انتقال حرارت چاه حرارتی تأثیر می گذارد. لازم به ذکر است پین فین ها با ارتفاع بیشتر تبادل حرارت بهتری با مایع خنک کننده نسبت به پین فین های با ارتفاع پایین تر دارند.

اندازه گیری افت فشار یک بخش ضروری برای تخمین قدرت پمپاژ مورد نیاز برای حفظ جریان خنک کننده در چاه حرارتی است. در شکل 6 تغییرات افت فشار در پیکربندی های متفاوت ارتفاع پین فین بر حسب عدد رینولدز آمده است. افزایش افت فشار با عدد رینولدز کاملا واضح و قابل درک است. با این حال باید توجه داشت که افزایش ارتفاع پین فین دو تاثیر بر افت فشار دارد. اولا پین فین با ارتفاع بیشتر افت فشار بیشتری را موجب می شود و ثانیا شیب منحنی ها در رینولدز های بالاتر افزایش می یابد. دلیل افزایش افت فشار با افزایش ارتفاع پین فین، وجود اثرات انسداد بیشتر ایجاد شده توسط پین فین های بزرگتر است که تا حدی عبور جریان خنک کننده را محدود می کند. بنابراین کمترین افت فشار در الگو های پین فین با تعداد دندانه کمتر اتفاق می افتد. هم چنین افت فشار چاه حرارتی با سه دندانه تکرار کمتر از افت فشار الگوی ارتفاع ثابت با نسبت ارتفاع 0.75 است. تغییر افت فشار را می توان به ارتفاع و الگو های مربوط به ارتفاع نسبت داد. در حالی که در گروه های افزاینده ارتفاع پین فین ها، تنها بزرگترین پین فین های آن بیشترین اثر انسداد را ارائه می دهد. پین فین های کوچکتر متوالی تأثیر بسیار کمتری بر جریان خنک کننده دارند از این رو، مقاومت کمتری در برابر جریان خنک کننده ایجاد می کنند. درنتیجه کمتر بودن تعداد پین فین های دارای ارتفاع زیاد نسبت به الگوی ارتفاع ثابت باعث کاهش اثرات انسداد و درنتیجه افت فشار شده است. چاه حرارتی با الگوی ارتفاع ثابت با نسبت 0.75پین فین ها به دلیل اینکه عملکردی نزدیک به چاه حرارتی بسته دارند و اجازه چندانی برای عبور سیال نمی دهد لذا در این الگو انسداد جریان بیشتر بوده و افت فشار افزایش می یابد. در نتیجه مشاهده می شود که چاه حرارتی با ارتفاع یکنواخت پین فین بیشترین افت فشار را در بین تمام پیکربندی ها دارا می باشد. این الگو های ارتفاع دندانه اره ای به مایع خنک کننده اجازه می دهد تا از میان آن ها تعامل بیشتری با هندسه میکروکانال پیدا کند، و از این رو، بیشتر در معرض سطح جامد قرار می گیرد و گردش سیال را افزایش می دهد.



شکل 5 : تغییرات ناسلت متوسط برای الگوهای ارتفاع متفاوت پین فین بر حسب عدد رینولدز



شکل 6 : تغییرات افت فشار برای الگوهای متفاوت ارتفاع پین فین بر حسب عدد رینولدز

در شکل 7کانتور سرعت در پیکربندی های متفاوت ارتفاع پین فین و در عدد رینولدز 800 نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در الگو های اشاره شده، آن بخش هایی از کانال که پین فین ها ارتفاع پایین تری نسبت به کانال دارد، چون سیال و جامد تعامل کمتری با هم دارند و هم چنین چون سطح در معرض انتقال حرارت جابجایی نیز کم می شود، لذا انتقال حرارت کاهش می یابد و به دنبال آن در آن نواحی سرعت جریان نیز کم می شود. در جاهایی که سرعت سیال افزایش یافته اختلاط سیال نیز بیشتر شده است و انتقال حرارت افزایش می یابد. در الگو های ارتفاع دندانه اره ای سرعت به طور دوره ای تغییر می کند، اما در الگوی ارتفاع ثابت، سرعت تقریبا روند ثابتی دارد.

****

شکل 7 : کانتور سرعت در پیکربندی های متفاوت ارتفاع پین فین و در عدد رینولدز 800

در شکل 8 کانتور دما در پیکربندی های متفاوت ارتفاع پین فین و در عدد رینولدز 800 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش تعداد دندانه الگوی ارتفاع دندانه اره ای بیشینه دمای سطح و درنتیجه محدوده تغییر دما در دیواره کانال کاهش می یابد. که ناشی از مساحت در معرض انتقال حرارت بیشتر و هم چنین تعامل بهتر مایع خنک کننده و سطح جامد و هم چنین شکست بیشتر لایه مرزی حرارتی است که توزیع همگون تر دما را در سطح میکروکانال نتیجه خواهد داد. از مقایسه این کانتور ها می توان نتیجه گرفت که در دسترس بودن فضای بازتر به سیال اجازه می دهد تا به صورت کمتر در معرض سطح گرم قرار گیرد که این امر موجب انتقال حرارت نامطلوب و در نتیجه دمای سطح بالاتر خواهد شد. همچنین الگوی ارتفاع ثابت با نسبت 0.75 به دلیل ثابت بودن ارتفاع پین فین ها دارای الگوی دمایی افزاینده در طول میکروکانال است و برخلاف الگوی ارتفاع دندانه اره ای با سه دندانه روند متناوب دمایی و توزیع یکنواخت دما در آن مشاهده نمی شود.

****

شکل 8 : کانتور دما در پیکربندی های متفاوت ارتفاع پین فین و در عدد رینولدز 800

پارامتر ضریب عملکرد حرارتی برای ارزیابی کارایی چاه حرارتی استفاده می شود. و به صورت نسبت افزایش انتقال حرارت به تبعات آن یعنی افزایش افت فشار بین چاه حرارتی پین فین دار و چاه حرارتی بدون پین فین (ساده) تعریف می شود. عبارت ضریب عملکرد حرارتی در معادله 11 آورده شده است که توسط پراجاباتی[12] مورد استفاده قرار گرفته است.

(11) 

که در آن  عدد ناسلت متوسط و  افت فشار برای چاه حرارتی بدون پین فین هستند. معیار ارزیابی عملکرد برای همه پیکربندی های ارتفاع پین فین محاسبه می شود. شکل 7 تغییرات ضریب عملکرد حرارتی را برای نسبت ارتفاع های متفاوت پین فین، بر حسب عدد رینولدز نشان می دهد. مشاهده می شود که در همه موارد ضریب عملکرد حرارتی با افزایش رینولدز افزایش می یابد. که نشان دهنده این موضوع که با افزایش عدد رینولدز میزان نرخ افزایش عدد ناسلت متوسط بیشتر از نرخ افزایش افت فشار است. با توجه به شکل7 الگوی ارتفاع دندانه اره ای با سه دندانه تکرار عملکرد حرارتی بالاتری نسبت به سایر الگو ها دارد. لذا با افزایش تعداد دندانه های تکرار عملکرد حرارتی روند افزایشی خواهد داشت. نکته قابل توجه این است که الگو های ارتفاع دندانه اره ای با یک و دو دندانه تکرار عملکرد حرارتی پایینی نسبت به الگوی ارتفاع ثابت داشته اند.

****

شکل 9 : تغییرات معیار ارزیابی عملکرد برای الگوهای متفاوت ارتفاع پین فین بر حسب عدد رینولدز

**نتيجه‌گيري**

چاه حرارتی با ارتفاع های مختلف پین فین پیشنهاد شده است. سطح مقطع پین فین شش ضلعی منتظم و جنس چاه حرارتی از مس و از آب به عنوان سیال خنک کننده استفاده شده است. چهار پیکربندی متفاوت ارتفاع پین فین از 0.01 تا 0.625 میلی متر به صورت چهار چاه حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی عددی در محدوده رینولدز 400 تا 1000 و شار حرارتی 500 کیلووات بر مترمربع انجام گرفته است. تحلیل مقایسه ای نتایج زیر را نشان می دهد:

* + - * چاه حرارتی باز با الگوی ارتفاع دندانه اره ای پین فین با سه دندانه تکرار، عملکرد حرارتی بهتری در مقایسه با تعداد دندانه های کمتر و هم چنین چاه حرارتی با الگوی ارتفاع ثابت با نسبت ثابت ارتفاع پین فین به ارتفاع میکروکانال معادل 0.75 نشان می دهد.
      * چاه حرارتی با الگوی ارتفاع ثابت پین فین ها با نسبت ارتفاع 0.75 چون فضای کمتری برای عبور جریان از بالای پین فین ها و سقف کانال دارد لذا مانند چاه حرارتی بسته عمل می کند و افت فشار زیادی را نسبت به الگوی افزاینده ارتفاع با سه دامنه تحمیل می کند.
* افت فشار و عدد ناسلت با افزایش تعداد دندانه های الگوی ارتفاع پین فین ها افزایش می یابد.
* چاه حرارتی با سه دندانه تکرار الگوی ارتفاع دندانه اره ای پین فین، توزیع دمای یکنواخت تری را نسبت به چاه حرارتی با نسبت ثابت ارتفاع میکروپین فین به ارتفاع کانال معادل 0.75 ارائه می دهد.

**منابع و مراجع**

[1] Ahmed, H.E., Salman, B.H., Kherbeet, A.Sh., and Ahmed, M., Optimization of Thermal Design of Heat  
Sinks: A Review, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 118, pp. 129–153.2018

[2] A.J. Chamkha, M. Molana, A. Rahnama, F. Ghadami, On the nanofluids applications in microchannels: a comprehensive review, Powder Technol. 332 (2018) 287–322.

[3] Z. Feng, X. Ai, P. Wu, Q. Lin, Z. Huang, Experimental investigationof laminar flow and heat transfer characteristics in square minichannels with twisted tapes, Int. J. Heat Mass Transf. 158 (2020) 119947

[4] A. Heidarian, R. Rafee, M.S. Valipour, Effects of wall hydrophobicity on the thermohydraulic performance of the microchannels with nanofluids, Int. Commun. Heat Mass Transf. 117 (2020) 104758

[5] Y.K. Prajapati, P. Bhandari, “Flow boiling instabilities in microchannels and their promising solutions – a review, Exp. Therm. Fluid Sci. 88 (2017) 576–593.

[6] V. Yadav, R. Kumar, A. Narain, Mitigation of flow maldistribution in parallel microchannel heat sink, IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. 9 (2) (2019) 247–261.

[7] Y. Sui, P.S. Lee, C.J. Teo, An experimental study of flow friction and heat transfer in wavy microchannels with rectangular cross section, Int. J. Therm. Sci. 50 (12) (2011) 2473–2482.

[8] H. Wang, Z. Chen, J. Gao, Influence of geometric parameters on flow and heat transfer performance of micro-channel heat sinks, Appl. Therm. Eng. 107 (2016) 870–879.

[9] D. Yang, Y. Wang, G. Ding, Z. Jin, J. Zhao, G. Wang, Numerical and experimental analysis of cooling performance of single-phase array microchannel heat sinks with different pin-fin configurations, Applied Thermal Engineering (2016).

[10] Hafiz Muhammad Ali, Waqas Arshad, Effect of channel angle of pin-fin heat sink on heat transfer performance using water based graphene nanoplatelets nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer (2016).

[11] L. Yin, P. Jiang, R. Xu, H. Hu, L. Jia, Heat transfer and pressure drop characteristics of water flow boiling in open microchannels, Int. J. Heat Mass Tran. 137 (2019) 204–215.

[12] Y.K. Prajapati, Influence of fin height on heat transfer and fluid flow characteristics of rectangular microchannel heat sink, Int. J. Heat Mass Tran. 137 (2019) 1041–1052.

[13] Xi Yang, et al., A parametric study of laminar convective heat transfer in fractal minichannels with hexagonal fins, Int. J. Energy Res. (2019) 1-17.