



بررسی مقایسه‌ای عملکرد حرارتی هیت‌سینک‌های پلیت فین ساده و فیلت‌دار تحت تأثیر همزمان جت هوای برخوردی و جریان داخلی آب

شروین آزادی^۱ علی ابجدی^{۲*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، عملکرد حرارتی دو نوع هیت‌سینک با پلیت فین‌های ساده و پلیت فین‌های فیلت‌دار، تحت تأثیر همزمان جت هوای برخوردی از قسمت بالای آن و همچنین عبور آب خالص از میکروکانال‌های داخلی هیت‌سینک میکروکانالی مورد بررسی عددی قرار گرفته است. هدف، ارزیابی تأثیر هندسه فیلت بر نرخ انتقال حرارت، افت فشار، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در کانال‌های آب است. علاوه بر این، بررسی تأثیر عدد رینولدز بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی این هیت‌سینک‌ها در شرایط جریان همزمان آب در میکروکانال‌های داخلی و جت هوای برخوردی نیز مورد بررسی قرار گرفت. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای جریان دائم، آرام و تراکم‌ناپذیر حل شده و با استفاده از مش ترکیبی تحلیل عددی صورت پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پلیت فین‌های فیلت‌دار در نرخ دبی بالا عملکرد حرارتی بهتری دارند، در حالی که پلیت فین‌های ساده در شرایط دبی پایین‌تر به دلیل افت فشار کمتر مناسب‌تر هستند. این مطالعه می‌تواند مبنای بهینه‌سازی هندسی در طراحی سیستم‌های مدیریت حرارتی ترکیبی باشد.

کلمات کلیدی: هیت‌سینک، فین، میکروکانال، حل عددی، مش ترکیبی

Comparative study of thermal performance of plain and filleted plate-fin heatsinks under the simultaneous influence of impinging air jet and internal water flow

Shervin Azadi¹

Ali Abjadi^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad Univ. South Tehran Branch, Tehran, Iran

^{2*} Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad Univ. South Tehran Branch, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, the thermal performance of two types of heat sinks one with simple plate fins and the other with pin fins including fillet is numerically investigated under the simultaneous influence of a top impinging air jet and the flow of pure water through the internal microchannels of the microchannel heat sink. The objective is to evaluate the effect of fin geometry on the heat transfer rate, pressure drop, Nusselt number, and the outlet temperature of the cooling fluid. In addition, the effect of Reynolds number on the thermal and hydraulic performance of these heatsinks under conditions of simultaneous water flow in internal microchannels and impinging air jets was also investigated. The continuity, momentum, and energy equations for steady, laminar, and incompressible flow are solved, and the numerical analysis is carried out using a composite mesh. The results indicate that pin fins exhibit better thermal performance at high flow rates, whereas plate fins are more suitable at lower flow rates due to their lower pressure drop.

This study can serve as a basis for geometric optimization in the design of hybrid thermal management systems.

Keywords: Heat Sink; Fin; Microchannel; Numerical Solution; Hybrid Mesh

۱-مقدمه

مدیریت حرارتی تجهیزات الکترونیکی پیشرفته، از جمله دستگاه‌های پزشکی، سیستم‌های خودروها و مراکز داده، به دلیل افزایش چگالی توان، نیازمند استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده مؤثر هستند. در این زمینه، ساختارهای هیت‌سینک با طراحی کانال‌های میکرو و استفاده همزمان از جریان هوا و سیال مایع (مانند آب) در سال‌های اخیر در حال توسعه‌اند. مواردی از قبیل طراحی هندسی بهینه، به‌ویژه انتخاب نوع و هندسه پین-فین‌ها، می‌توانند نقشی کلیدی در سهولت و افزایش نرخ انتقال حرارت ایفا کنند. همچنین پیشرفت‌های صورت‌گرفته در حوزه آیرودینامیک در زمینه‌های کاربردی متنوع، از تحلیل جریان‌های بیرونی در طراحی هواپیما و وسایل نقلیه گرفته تا بهینه‌سازی جریان‌های داخلی در سامانه‌های تهویه، موتورهای جت و خطوط انتقال گاز، نقش چشم‌گیری در افزایش بازده و کاهش مصرف انرژی در صنایع مختلف ایفا کرده است [1-3].

کنترل جریان، به‌عنوان یکی از ارکان اساسی در بهینه‌سازی آیرودینامیکی، با تأثیر بر افزایش نیروی برا، کاهش درگ، کاهش گرمایش آیرودینامیکی و بهبود بازده کلی سامانه در شرایط کاری مختلف، عملکرد سامانه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [4-5]. در این راستا، روش‌های گوناگون کنترل جریان نظیر جت‌های پالسی [6]، جت‌های پالسی مدوله‌شده، امواج صوتی سطحی و محرک‌های پلازما [7-8] اثربخشی خود را در بهینه‌سازی رفتار جریان اثبات کرده‌اند. این تکنیک‌ها که به‌طور گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی و انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی، افزایش سرعت جریان و بهبود بهره‌وری عملیاتی شده‌اند.

در این راستا، توسعه‌ی استراتژی‌های کنترل جریان به‌منظور افزایش انتقال حرارت در هیت‌سینک‌ها با بهره‌گیری از اثر ترکیبی جریان فروفلوئید و جابجایی القاشده توسط جریان هوا، پیشرفت‌های چشم‌گیری در بهبود راندمان سامانه‌های سرمایشی به همراه داشته است [9-10].

این استراتژی‌ها از طریق افزایش سطح تماس و تسریع فرآیند تبادل حرارت، مزایای قابل توجهی در کاربردهای الکترونیکی و صنعتی ایجاد می‌کنند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که جریان فن، زمانی که با سایر سازوکارهای سرمایشی تلفیق شود، می‌تواند اثر چشم‌گیری بر عملکرد انتقال حرارت داشته باشد، و این موضوع نیازمند بررسی‌های بیشتر در طیف وسیع‌تری از کاربردها است [11].

با توجه به اینکه مطالعه‌ی حاضر بر بهینه‌سازی هندسه سامانه‌ی سرمایش آب-فن در هیت‌سینک به‌منظور ارتقای انتقال حرارت متمرکز است، می‌توان از مطالعات پیشین در زمینه دینامیک سیالات و انتقال جرم بهره گرفت. برای نمونه، در یک پژوهش، تحلیل عددی رسوب‌گذاری ذرات دارویی در دستگاه تنفسی فوقانی نشان داد که ویژگی‌های هندسی و اندازه‌ی ذرات تأثیر زیادی بر توزیع جریان و انتقال جرم دارند [12].

به‌طور مشابه، بهینه‌سازی هندسه‌ی کانال در هیت‌سینک‌ها می‌تواند الگوهای جریان و عملکرد حرارتی را به‌طور چشم‌گیری تحت تأثیر قرار دهد و منجر به بهبود راندمان انتقال حرارت شود. با بررسی این اصلاحات هندسی، پژوهش حاضر در جهت توسعه‌ی راهکارهای مؤثرتر و کم‌مصرف‌تر در سیستم‌های سرمایشی مدرن الکترونیکی و صنعتی گام برمی‌دارد.

مدیریت حرارتی مؤثر یکی از ارکان کلیدی مهندسی مدرن به شمار می‌آید که مستقیماً بر عملکرد، طول عمر و قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیکی و سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی اثرگذار است. با افزایش توان پردازنده‌ها، باتری‌ها و دیگر تجهیزات پر قدرت، نیاز به راهکارهای نوآورانه برای دفع گرما بیش از پیش احساس می‌شود. اگرچه هیت‌سینک‌های خنک‌شونده با هوا همچنان به‌دلیل سادگی و هزینه‌ی پایین، مورد استفاده‌ی گسترده قرار دارند، اما عملکرد آن‌ها غالباً با مقاومت حرارتی بالا و ظرفیت ناکافی در دفع حرارت در شرایط کاری شدید محدود می‌شود [13].

در نتیجه، پژوهشگران به سراغ تکنیک‌های پیشرفته‌ای رفته‌اند که با بهره‌گیری از اصول دینامیک سیالات، بهبود خواص مواد و بهینه‌سازی ساختاری، عملکرد دفع حرارت را ارتقاء می‌دهند.

در میان این پیشرفت‌ها، هیت‌سینک‌های میکروکاناله به‌دلیل توانایی بالا در تقویت انتقال حرارت جابجایی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ایجاد چرخش سیال درون میکروکانال‌ها می‌تواند مقاومت حرارتی را به‌شدت کاهش داده و عملکرد سرمایشی را در مقایسه با کانال‌های مستطیلی سنتی بهبود بخشد [14].

هم‌زمان، روش‌های سرمایشی ترکیبی نظیر استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) در هیت‌سینک‌ها به دلیل قابلیت ذخیره‌سازی و دفع مؤثر گرمای اضافی مورد توجه قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، مطالعه‌ای تجربی نشان داده است که افزودن نانوحامل‌های ZnO به PCM باعث بهبود رسانایی حرارتی شده، دمای اوج را تا ۲۴/۰۲٪ کاهش داده و زمان عملکرد را تا ۶۹ دقیقه افزایش داده است [15].

این یافته‌ها پتانسیل استفاده از PCM تقویت‌شده با نانوذرات را به عنوان راهکارهایی پایدار و کارآمد برای مدیریت حرارتی تجهیزات الکترونیکی نشان می‌دهند.

افزون بر نوآوری‌های مواد، بهینه‌سازی‌های هندسی و ساختاری نیز نقش بسزایی در بهبود راندمان هیت‌سینک‌ها ایفا کرده‌اند. بهره‌گیری از صفحات سرد با هندسه‌ی بهینه‌شده از طریق توپولوژی در سامانه‌های مدیریت حرارتی باتری، موجب بهبود ۸۶/۷ درصدی در راندمان خنک‌کاری نسبت به طراحی‌های مستطیلی مرسوم شده است [16].

از سوی دیگر، ادغام فن‌های پیزوالکتریک با هیت‌سینک‌ها به عنوان راهکاری نوظهور برای افزایش جریان هوا و کاهش دمای سطحی در تجهیزات میکروالکترونیک مطرح شده و شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) اثربخشی آرایش بهینه‌ی فن‌ها را تأیید کرده‌اند [17].

در نهایت، روش‌های نوین سرمایش دوفازی نظیر سرمایش مستقیم تراشه با مایع، انقلابی در مدیریت حرارتی ایجاد کرده‌اند و به طور مؤثری دمای اتصال را کاهش داده‌اند. بهره‌گیری از ساختار فن بهینه‌شده از طریق توپولوژی در این روش‌ها، کاهش ۲۳ درصدی در دمای کاری مراکز داده پر قدرت را نشان داده و پتانسیل این تکنولوژی را برای سامانه‌های الکترونیکی نسل آینده برجسته کرده است [18].

همچنین، تحقیقات تجربی در زمینه انتقال حرارت جوشش استخری منجر به توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ای شده‌اند که اثرات حبس بخار را در نظر می‌گیرند و با بهینه‌سازی فاصله‌ی فن‌ها، طراحی هیت‌سینک‌ها را برای سرمایش دوفازی بهبود می‌بخشند [19]. این مدل عملکرد سامانه را در فواصل فن مختلف به درستی پیش‌بینی کرده و مبنایی برای طراحی بهینه فراهم می‌سازد.

این پژوهش با تحلیل نظام‌مند اثر تغییرات هندسی پین فن‌های روی هیت‌سینک میکروکانالی بر عملکرد دفع حرارت، کاهش دمای سطح، تلاش می‌کند این خلأ را پر کند. همچنین با ترکیب روش‌های خنک‌کاری به کمک جریان آب و جریان هوای بالای هیت‌سینک، این مطالعه در پی دستیابی به عملکرد انتقال حرارت برتر نسبت به ساختارهای متداول هیت‌سینک می‌باشد.

۲- تعریف مسئله

در این پژوهش، عملکرد حرارتی دو نوع هیت‌سینک با هندسه متفاوت فن‌ها شامل پللیت فن‌های ساده و پللیت فن‌های فیلتر دار به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این هیت‌سینک‌ها به طور هم‌زمان تحت تأثیر جریان هوای جت از بالا (به عنوان خنک‌کننده ثانویه) و جریان آب خالص از درون میکروکانال‌های داخلی (به عنوان خنک‌کننده اولیه) قرار می‌گیرند.

اهداف اصلی این تحقیق عبارت‌اند از:

- محاسبه و مقایسه ضریب انتقال حرارت، عدد رینولدز، دمای دیواره، افت فشار و نرخ کلی انتقال حرارت در دو ساختار فن
- ارزیابی کارایی سرمایشی و یکنواختی حرارتی در شرایط خنک‌کاری ترکیبی
- تحلیل نقاط قوت و ضعف هر یک از هندسه‌های پللیت فن و پین فن برای کاربردهای با چگالی توان بالا در ابعاد کوچک

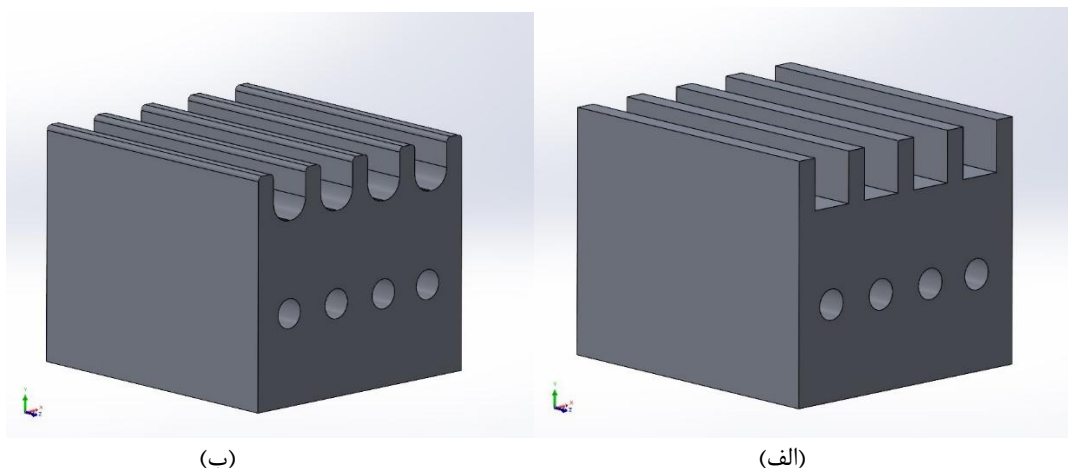
در هر دو مدل، ابعاد خارجی هیت‌سینک و ساختار داخلی میکروکانال‌ها یکسان در نظر گرفته شده و تنها تفاوت در شکل و چیدمان فن‌های بالایی است:

- در مدل اول، فن‌ها به صورت صفحات صاف و موازی (پللیت فن) طراحی شده‌اند

• در مدل دوم، فین‌ها به صورت پین‌های استوانه‌ای و با آرایش شطرنجی (پین فین) در سطح قرار دارند جنس هیت‌سینک‌ها از آلومینیوم ۶۰۶۱ انتخاب شده و ابعاد هر نمونه برابر است با: طول ۳۰ میلی‌متر، عرض ۲۷،۰۷ میلی‌متر و ارتفاع کل ۲۳،۵ میلی‌متر. همچنین این مدل‌ها دارای ۴ عدد میکروکانال دایره‌ای جهت عبور آب خالص با قطر ۳ میلی‌متر می‌باشند.

قابل ذکر است که سطح بالایی هیت‌سینک‌ها در معرض جریان هوای جت برخوردی قرار گرفتند. ارتفاع پلیت فین‌ها در دو حالت ۵ میلی‌متر و عرض آن‌ها ۲ میلی‌متر می‌باشد. علاوه بر این، شعاع هندسه فیلت دار، ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. شمای هندسی مدل عددی و نحوه قرارگیری فین‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است که در شکل الف، هیت‌سینک با پلیت فین ساده و در قسمت ب هیت‌سینک با پلیت فین فیلت‌دار نشان داده شده است. شبیه‌سازی‌ها در شرایط پایدار و با مرزهای حرارتی و جرمی ثابت انجام شده‌اند تا تأثیر نوع هندسه هیت‌سینک بر کارایی آن‌ها به‌طور دقیق بررسی گردد.

همچنین شایان ذکر است که این مسئله با استفاده از مش ترکیبی شبیه‌سازی شده و در هر مدل، حدود ۱،۲ میلیون سلول مورد استفاده قرار گرفت. در پایان، برای کاهش هزینه‌های محاسباتی، آزمون استقلال از شبکه بر روی مش نهایی انجام و تأیید شد. برای گسسته‌سازی معادلات و حل مسئله، از روش Upwind مرتبه دوم به‌منظور کوپل فشار و سرعت، و از الگوریتم SIMPLE استفاده گردید.



شکل ۱- هندسه مورد بررسی

فرضیات مورد استفاده برای مدل‌سازی سه‌بعدی هیت‌سینک میکروکانالی تحت تأثیر همزمان جریان جت هوا و عبور آب خالص عبارتند از:

- جریان هوا و آب به صورت پایدار (steady) و آرام (laminar) در نظر گرفته شده‌اند.
- سیالات مورد استفاده (هوا و آب خالص) تراکم‌ناپذیر و دارای خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر گرفته شده‌اند.
- جریان عبوری از میکروکانال‌ها کاملاً توسعه‌نیافته در ورودی و در حال انتقال حرارت است.
- در ناحیه جامد (بدنه آلومینیومی هیت‌سینک)، تنها رسانش حرارتی در نظر گرفته شده و هیچ‌گونه انتقال جرمی یا جابجایی وجود ندارد.
- اثر گرانش، تابش حرارتی و تغییر فاز (مانند جوشش یا چگالش) در این مدل لحاظ نشده‌اند.
- شار حرارتی ثابت به سطح زیرین هیت‌سینک اعمال شده و سایر سطوح جامد دارای شرط دیواره عایق هستند.

- تماس بین فین‌ها و بدنه هیت‌سینک کامل و بدون مقاومت حرارتی تماسی فرض شده است.
- جریان هوای جت از بالا، دارای پروفیل سرعت یکنواخت با دمای مشخص ورودی است.
- در تمام مرزهای خروجی، شرط فشار خروجی صفر گیج (Zero gauge pressure) اعمال شده است.
- اثرات ویسکوالاستیسیته، تراوش بین فازها، یا انتقال جرم بین هوا و آب در نظر گرفته نشده‌اند.
- ضخامت دیواره‌ها و هندسه فین‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که در هندسه عددی نیاز به مش‌بندی دقیق در مرزهای سیال-جامد را داشته باشد.

۳- معادلات حاکم

در این پژوهش، دو جریان با رژیم‌های متفاوت به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده‌اند. معادلات حاکم و شرایط مرزی مربوط به هر جریان در بخش‌های بعدی ارائه می‌شوند.

۳.۱. جریان فن

به‌منظور مدل‌سازی دقیق جریان هوای تولیدشده توسط فن که بر سطح هیت‌سینک‌ها اثر می‌گذارد، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به‌صورت هم‌زمان در دامنه محاسباتی حل شده‌اند. معادله پیوستگی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

که در آن، u ، v و w به‌ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستاهای x ، y و z هستند. این معادله بیانگر بقای جرم است، به‌طوری‌که شار خالص جرم در هر حجم کنترل برابر صفر بوده و نشان‌دهنده عدم تجمع یا کاهش جرم در سیستم می‌باشد.

معادلات ناویه-استوکس که حرکت جریان هوا را توصیف می‌کنند، به‌صورت مؤلفه‌ای به شرح زیر هستند:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

در این معادلات، ρ (کیلوگرم بر متر مکعب) چگالی هوا، p (پاسکال) فشار و μ (کیلوگرم بر متر-ثانیه) ویسکوزیته دینامیکی هوا است.

علاوه بر این، معادله انرژی، که بقای انرژی را توصیف می‌کند، می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$\rho \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) + s_h \quad (5)$$

۳.۲. جریان آب

در ناحیه جریان آب، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را می‌توان به ترتیب با فرض شرایط جریان آرام، حالت پایدار و تراکم‌ناپذیر در سه بعد، به شکل‌های زیر بیان کرد:

$$\nabla \cdot (\rho_w U) = 0 \quad (6)$$

$$\rho_w (U \cdot \nabla U) = -\nabla P + \mu \nabla^2 U + f \quad (7)$$

در معادله (۷)، ρ_w نشان دهنده چگالی آب، f نیروی حجمی، μ ویسکوزیته دینامیکی و U بردار سرعت است.

$$(\rho_w C_p) U \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (8)$$

طبق معادله ۸، C_p نشان دهنده گرمای ویژه و k ضریب هدایت حرارتی سیال است. با فرض تعادل حرارتی بین نواحی سیال و جامد، معادله انرژی برای ناحیه جامد چاه حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (9)$$

علاوه بر این، در معادله ۹، k_s نشان دهنده رسانایی حرارتی سینک حرارتی است.

۴- شرایط مرزی و اولیه

با توجه به اینکه شرایط مرزی برای بخش تحلیل CFD در این مطالعه بسیار مهم هستند، بررسی مختصری از آنها در این بخش ضروری است. جریان جت هوا، با دمای ثابت ۲۷ درجه سانتیگراد (دمای محیط) و سرعت یکنواخت ۵ متر بر ثانیه، به قسمت بالایی هیت سینک‌ها برخورد می‌کند و از طریق شیار پلیت فین‌های قسمت بالایی هیت سینک جریان می‌یابد. همزمان، آب از طریق چهار کانال در داخل هیت سینک جریان می‌یابد. آب نیز با دمای ورودی ۲۷ درجه سانتیگراد و سرعت یکنواخت ۲ متر بر ثانیه وارد می‌شود. در تحلیل CFD از شار حرارتی یکنواخت ۱۵۰۰۰ وات بر متر مربع استفاده شده است.

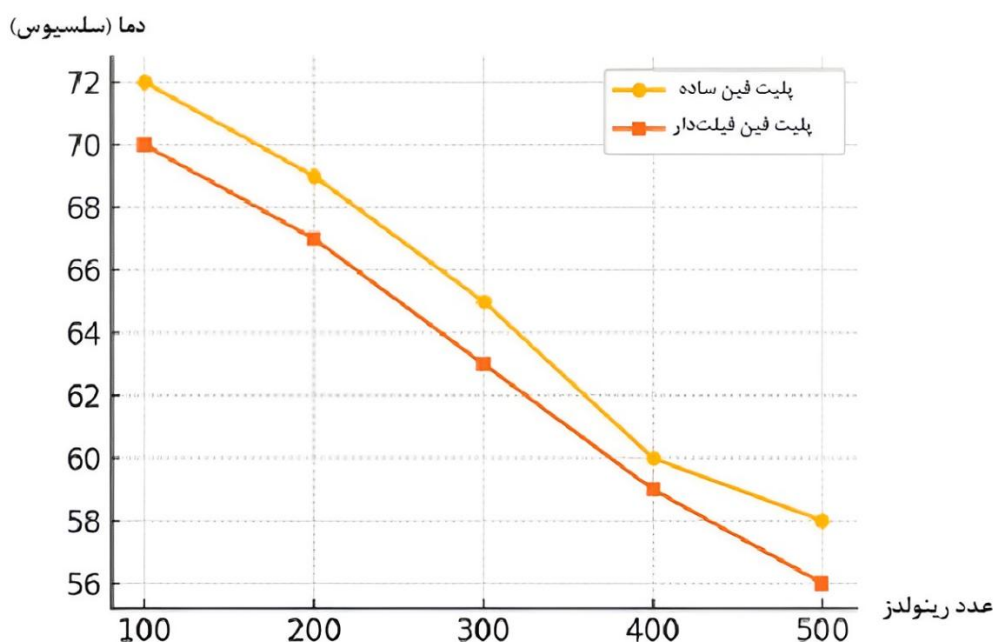
علاوه بر این، شرط مرزی عدم لغزش در سطح مشترک بین بدنه هیت سینک و سیال اعمال شده است. این مطالعه فرض می‌کند که اتلاف حرارت از دیواره‌های هیت سینک به محیط اطراف ناچیز است. در نتیجه، دیواره‌ها به صورت عایق مدل‌سازی شده‌اند:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

۵- نتایج و بحث

در این بخش، یافته‌های به دست آمده از شبیه سازی عددی برای دو نوع هندسه ی مختلف از هیت سینک های پلنت فین، یعنی نوع ساده و نوع فیلت دار، مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرند. تمرکز اصلی بر بررسی تأثیر عدد رینولدز بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی این هیت سینک ها در شرایط جریان همزمان آب در میکروکانال های داخلی و جت هوای برخوردی از بالا می باشد.

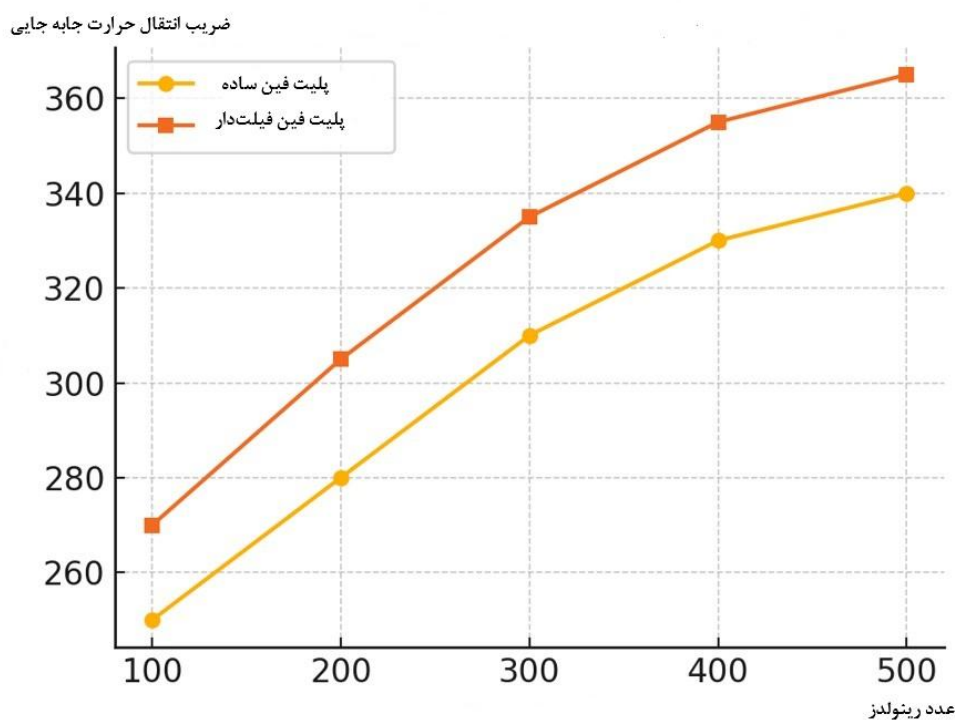
همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، این نمودار تغییرات دمای خروجی آب از کانال های داخلی هیت سینک را بر حسب عدد رینولدز نشان می دهد. نتایج به وضوح بیانگر آن هستند که با افزایش عدد رینولدز، که به معنای افزایش دبی جریان آب ورودی به کانال هاست، دمای خروجی آب کاهش می یابد. این کاهش دما به ویژه در هندسه ی فیلت دار، چشمگیرتر است. به بیان دیگر، افزایش عدد رینولدز منجر به بهبود خنک کاری و افزایش نرخ دفع حرارت از هیت سینک می شود. در تمام مقادیر بررسی شده ی عدد رینولدز، دمای خروجی در هیت سینک با پلنت فین های فیلت دار پایین تر از نمونه ی ساده باقی مانده است. این امر گواهی بر کارایی حرارتی بالاتر هندسه ی فیلت دار دارد، به خصوص در محدوده های رینولدز بالا که تفاوت ها ملموس تر می شوند.



شکل ۲- تغییرات دمای کانال های ورودی جریان آب در طول ۵ میلی متر (ورودی کانال)

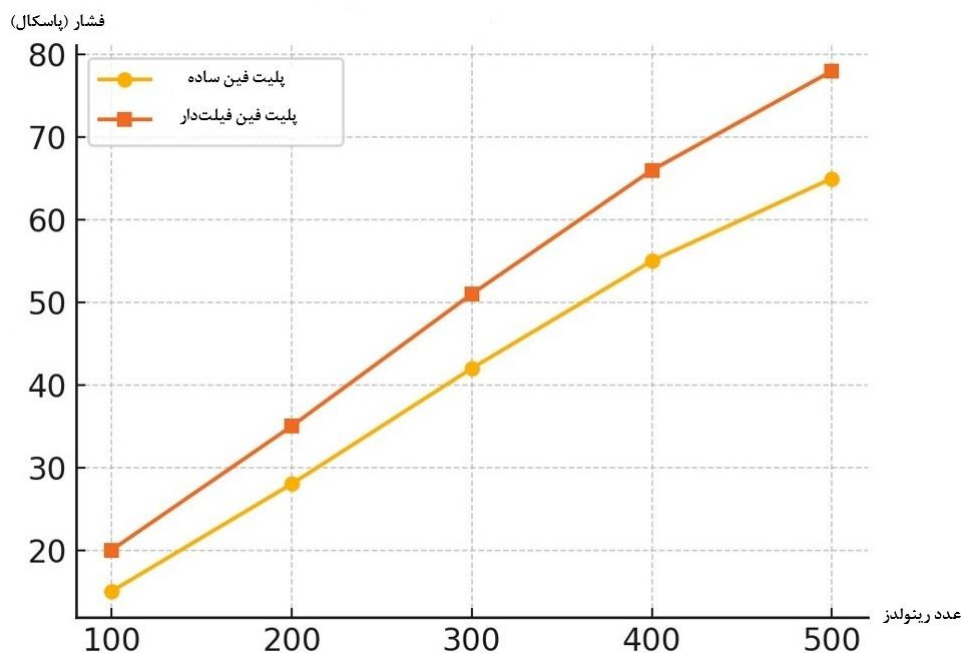
در ادامه و مطابق با شکل ۳، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی در کانال های آب به عنوان تابعی از عدد رینولدز ارائه شده است. همان گونه که انتظار می رود، با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابه جایی در هر دو نوع هیت سینک افزایش پیدا می کند. دلیل اصلی این افزایش، بیشتر شدن تلاطم جریان و کاهش ضخامت لایه ی مرزی حرارتی در سرعت های بالاتر است. در

تمامی حالات، هندسه‌ی فیلتردار نسبت به هندسه‌ی ساده، ضریب انتقال حرارت بالاتری نشان می‌دهد. این برتری را می‌توان به سطح موثر انتقال حرارت بیشتر، افزایش اختلاط سیال و همچنین هدایت بهینه‌ی جریان در اطراف فیلترها نسبت داد.



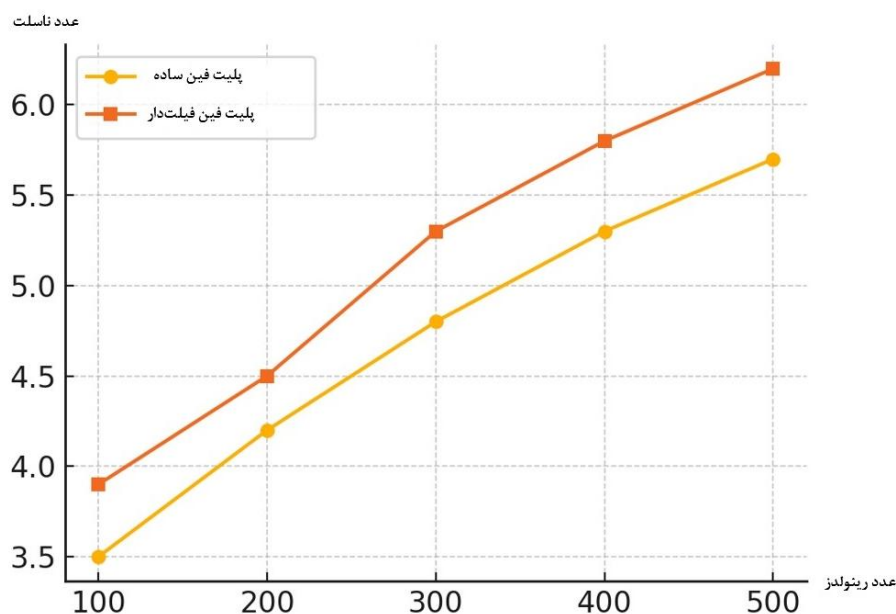
شکل ۳- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آب در طول ۵ میلی‌متر (ورودی کانال)

شکل ۴، افت فشار هوا را در ناحیه‌ی بین فین‌ها به‌عنوان تابعی از عدد رینولدز به تصویر کشیده است. مطابق انتظار، افزایش عدد رینولدز که معادل افزایش سرعت هوای جت برخوردی است، منجر به افزایش افت فشار در هر دو نوع هندسه شده است. این پدیده به دلیل تشدید اثرات اصطکاک‌های و ایجاد تغییرات بزرگ‌تر در مومنتوم جریان هوا در سرعت‌های بالا اتفاق می‌افتد. با این حال، افت فشار در هیت‌سینک دارای پلیت فین‌های ساده کمتر از نوع فیلتردار گزارش شده است. این یافته تأکید دارد که هرچند هندسه‌ی فیلتردار عملکرد حرارتی بهتری دارد، اما هزینه‌ی این بهبود، افزایش مقاومت در برابر جریان هواست که ممکن است در کاربردهای واقعی، نیازمند مصرف توان بیشتر برای فن باشد.



شکل ۴- تغییرات فشار هوا میان پلیت فین‌ها در ارتفاع ۱۸ میلی‌متر

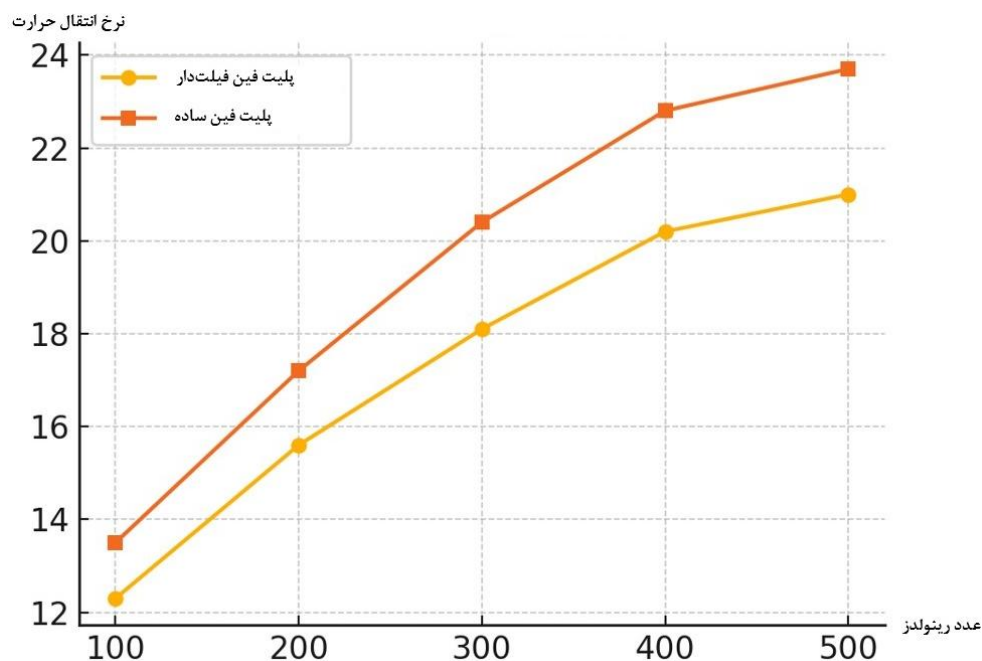
در شکل ۵، تغییرات عدد ناسلت برای جریان آب در میکروکانال‌های داخلی به عنوان تابعی از عدد رینولدز ارائه شده است. عدد ناسلت که یکی از معیارهای مهم در تحلیل حرارت جابه‌جایی است، نشان می‌دهد که چگونه نرخ انتقال حرارت در واحد سطح نسبت به رسانش در سیال افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز، به‌وضوح عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد، که این موضوع بیانگر بهبود عملکرد حرارتی سیستم است. مقایسه دو هندسه نشان می‌دهد که عدد ناسلت در هندسه‌ی فیلت‌دار به‌طور یکنواخت بیشتر از نوع ساده است، که این امر دلالت بر ارتقاء قابل توجه انتقال حرارت در حضور فیلت‌ها دارد. این ارتقاء می‌تواند ناشی از جریان‌های گردابی محلی، توسعه‌ی سریع‌تر لایه مرزی حرارتی و افزایش اختلاط جریان باشد.



شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت برای کانال‌های انتقال آب در طول ۵ میلی‌متر

نهایتاً، شکل ۶ تغییرات نرخ کلی انتقال حرارت از هیت‌سینک را به عنوان تابعی از عدد رینولدز نمایش می‌دهد. همان‌گونه که از نمودار مشخص است، با افزایش عدد رینولدز، نرخ کلی انتقال حرارت نیز به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. این روند افزایشی، ناشی از افزایش سرعت سیالات خنک‌کننده (آب در میکروکانال‌ها و هوای جت از بالا) و در نتیجه تشدید مکانیزم‌های جابه‌جایی حرارت است. با بالا رفتن سرعت جریان، لایه‌ی مرزی حرارتی نازک‌تر شده، تلاطم افزایش می‌یابد و انتقال حرارت به سطح فین‌ها مؤثرتر انجام می‌شود.

مقایسه‌ی بین دو هندسه‌ی مورد بررسی نشان می‌دهد که در تمامی مقادیر عدد رینولدز، هیت‌سینک با پلیت فین‌های فیلِت‌دار نرخ انتقال حرارت بیشتری نسبت به فین‌های ساده از خود نشان می‌دهد. این افزایش عملکرد را می‌توان به عوامل مختلفی نسبت داد، از جمله: افزایش سطح مؤثر تبادل حرارتی در اثر وجود فیلِت‌ها، ایجاد ناحیه‌های تمرکز تلاطم مفید در نزدیکی سطوح فین، و بهبود توزیع جریان در کل حجم هیت‌سینک. همچنین، وجود فیلِت‌ها می‌تواند موجب شکسته شدن لایه‌های مرزی ضخیم و تقویت گرادیان‌های دمایی در مقیاس محلی شود، که همگی به افزایش نرخ انتقال حرارت منجر می‌گردند.



شکل ۶- تغییرات نرخ انتقال حرارت در طول ورودی ۵ میلی متر هیت سینک

این نتایج به وضوح تأکید می‌کنند که هندسه‌ی فین‌ها نقش حیاتی در عملکرد حرارتی سیستم دارد و انتخاب طراحی مناسب می‌تواند به طور چشمگیری بهره‌وری حرارتی را افزایش دهد. اگرچه هندسه‌های پیچیده‌تر مانند فین‌های فیلت‌دار ممکن است افت فشار بیشتری ایجاد کنند، اما با توجه به بهبود قابل‌ملاحظه در نرخ انتقال حرارت، این نوع هندسه‌ها در بسیاری از کاربردهای صنعتی، به‌ویژه در سامانه‌هایی که محدودیت دمایی دارند (مانند خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی، لیزرهای صنعتی، و منابع حرارتی متمرکز)، می‌توانند گزینه‌ای ترجیحی باشند. به عبارت دیگر، مزیت حرارتی این نوع هندسه‌ها می‌تواند هزینه‌ی هیدرولیکی ناشی از افت فشار را توجیه کند، به شرط آنکه سامانه تهویه یا پمپ قادر به جبران آن باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی عددی و مقایسه‌ای عملکرد حرارتی دو نوع هیت‌سینک شامل هیت‌سینک با پلیت فین‌های ساده و هیت‌سینک با پلیت فین‌های فیل‌دار پرداختیم. این سیستم‌ها تحت تأثیر همزمان جت هوای برخوردی از قسمت فوقانی و جریان آب خالص از درون میکروکانال‌های داخلی قرار گرفتند. هدف اصلی، ارزیابی تأثیر هندسه فین بر انتقال حرارت، افت فشار و کارایی کلی خنک‌کاری در شرایط ترکیبی بود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، بینش‌های ارزشمندی را ارائه داد:

- **بهبود عملکرد با افزایش دبی:** برای هر دو هندسه، با افزایش عدد رینولدز (که متناسب با افزایش دبی جریان سیالات خنک‌کننده است)، عملکرد حرارتی سیستم به طور چشمگیری بهبود یافت. این بهبود شامل کاهش دمای خروجی آب، افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، افزایش عدد ناسلت و در نهایت، افزایش نرخ کلی انتقال حرارت از هیت‌سینک بود.
 - **برتری حرارتی پلیت فین‌های فیل‌دار:** هیت‌سینک با پلیت فین فیل‌دار، دمای خروجی آب پایین‌تر، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بالاتر، عدد ناسلت بیشتر و نرخ کلی انتقال حرارت بالاتری را در مقایسه با هیت‌سینک با پلیت فین‌های ساده از خود نشان داد. این برتری، مؤید کارایی بیشتر هندسه فیل‌دار در دفع حرارت از سطح هیت‌سینک است.
 - **افت فشار بالاتر در پلیت فین‌های فیل‌دار:** نقطه مقابل این بهبود حرارتی، افت فشار بالاتر جریان هوا در میان پلیت فین‌های فیل‌دار بود. این افزایش مقاومت در برابر جریان، به معنای نیاز به توان مصرفی بیشتر برای فن برای حفظ دبی هوای مورد نظر است. این نتایج به وضوح نشان داد که اگرچه فیل‌ها انتقال حرارت را بهبود می‌بخشند، اما هزینه‌ای به شکل افزایش افت فشار به همراه دارند.
 - **مزیت نرخ انتقال حرارت بر افت فشار:** با این وجود، نتایج کلی نرخ انتقال حرارت حاکی از آن است که در تمام اعداد رینولدز مورد بررسی، مزیت حرارتی حاصل از هندسه فیل‌دار بر افت فشار ایجاد شده توسط آن غلبه می‌کند و منجر به عملکرد کلی دفع حرارت بهتری می‌شود.
- بر اساس این یافته‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری‌های مهمی برای طراحی سیستم‌های مدیریت حرارتی ترکیبی ارائه داد:
- **اولویت با نرخ انتقال حرارت بالا:** برای کاربردهایی که در آن‌ها دفع حداکثری حرارت و دستیابی به پایین‌ترین دمای ممکن از اهمیت بالایی برخوردار است (به‌ویژه در نرخ دبی‌های بالاتر)، استفاده از هیت‌سینک‌های با پلیت فین‌های فیل‌دار توصیه می‌شود، حتی اگر این امر به معنای پذیرش افت فشار بیشتر باشد.
 - **اولویت با حداقل افت فشار:** در مقابل، برای سناریوهایی که محدودیت‌های شدیدی بر توان مصرفی فن و افت فشار سیستم وجود دارد (مانند نرخ دبی‌های پایین‌تر یا سیستم‌های با محدودیت فضای نصب فن)، هیت‌سینک‌های با پلیت فین‌های ساده ممکن است گزینه مناسب‌تری باشند.
- این پژوهش بینش‌های ارزشمندی را برای طراحان سیستم‌های مدیریت حرارتی فراهم می‌آورد و می‌تواند به عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری آگاهانه در انتخاب هندسه بهینه فین بر اساس نیازهای عملکردی و محدودیت‌های خاص هر کاربرد مورد استفاده قرار گیرد. تحقیقات آتی می‌تواند شامل بررسی تأثیر متغیرهای هندسی مختلف فیل‌ها (مانند شعاع انحنا و زاویه) و همچنین بررسی رفتار سیستم در رژیم‌های جریان مغشوش و در نظر گرفتن ابعاد بزرگتر باشد.

مراجع

- [1] Shams Taleghani, A., and Torabi, F., Recent developments in aerodynamics, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10, p.1537383, 2025.
- [2] Shams Taleghani, A., and Ghajar, A., Aerodynamic characteristics of a delta wing aircraft under ground effect, *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 10, p. 1355711, 2024.
- [3] Shams Taleghani, A., Hesabi, A., Esfahanian, V., Numerical study of flow control to increase vertical tail effectiveness of an aircraft by tangential blowing, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, pp. 1-15, 2024.
- [4] Abdolahipour, S., Review on flow separation control: effects of excitation frequency and momentum coefficient, *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 10, p. 1380675, 2024.
- [5] Shams Taleghani, A., Shadaram, A., Mirzaei, M., Effects of duty cycles of the plasma actuators on improvement of pressure distribution above a NLF0414 airfoil, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 5, pp. 1434-1440, 2012.
- [6] Abdolahipour, S., Effects of low and high frequency actuation on aerodynamic performance of a supercritical airfoil, *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 9, p. 1290074, 2023.
- [7] Shams Taleghani, A., Shadaram, A., Mirzaei, M., Abdolahipour, S., Parametric study of a plasma actuator at unsteady actuation by measurements of the induced flow velocity for flow control, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, pp. 1-13, 2018.
- [8] Mirzaei, M., Taleghani, A. S., and Shadaram, A., Experimental study of vortex shedding control using plasma actuator, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 186, pp. 75-86, 2012.
- [9] Azadi, S., Abjadi, A., Vahdat Azad, A., Ahmadi Danesh Ashtiani, H., and Afshar, H., Enhancement of heat transfer in heat sink under the effect of a magnetic field and an impingement jet, *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 9, p. 1266729, 2023.
- [10] Azadi, S., Abjadi, A., Vahdat Azad, A., Ahmadi Danesh Ashtiani, H., and Afshar, H., Experimental investigation of enhancement heat dissipation in a novel heat sink under simultaneous impact of impingement jet and magnetic field, *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 10, p. 1450972, 2024.
- [11] Sun, X.Y., Dai, Y.J., Ge, T.S., Zhao, Y., and Wang, R.Z., Comparison of performance characteristics of desiccant coated air-water heat exchanger with conventional air-water heat exchanger-Experimental and analytical investigation, *Energy*, vol. 137, pp. 399-411, 2017.
- [12] Aghaei, S., and Khaleghi, H., Development of a mathematical correlation for polydisperse non-spherical drug particle deposition in the human upper respiratory system, *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 13-37, 2023.
- [13] Nair, V., Baby, A., Anoop, M., Indrajith, S., Murali, M., and Nair, M. B., A comprehensive review of air-cooled heat sinks for thermal management of electronic devices, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 159, p. 108055, 2024.
- [14] Fan, Y., et al., Heat transfer performance study of fluid rotating microchannel heat sink, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 58, p. 104390, 2024.
- [15] Farooq, M., Zahid, I., Javaid, M.Y., Akbar, N.S., Bandarra Filho, E.P., Shahzad, M.F., Khan, M.I., Khan, M.I., Rehan, M. and Riaz, F., Experimental case study for optimizing heat sink performance using ZnO nanocarriers integrated with phase change materials for environmental sustainability, *Case Studies in Thermal Engineering*, 66, p.105770, 2025.
- [16] Li, X., Li, L., Hang, W., Wang, W., Yin, M., Wang, X., Bei, S., Xu, Q., Liu, J. and Zheng, K., Systematic investigation of hybrid cold plate combining embedded phase change material with liquid cooling minichannels under different ambient temperatures for battery thermal management, *Journal of Energy Storage*, vol. 108, p. 115125, 2025.
- [17] Han, C., Ma, X., and Xu, J., Innovative configurations for heat sink integrated with piezoelectric fans, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 207, p. 109383, 2025.
- [18] Pandey, V. and Lee, P. S., Maximizing liquid-cooled heat sink efficiency with advanced topology-optimized fin designs, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 229, p. 125746, 2024.
- [19] Huang, Y., Sarma, B., and Weibel, J. A., A predictive model for fin array boiling heat transfer performance under two-phase immersion cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 239, p. 126513, 20