



Thermal Management and Safety in Components of Launch Systems and Aircraft through the Design of a Passive Self-Cooling System

Seyedeh Zahra Sajadi

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Oil and Gas, Gachsaran, Yasouj University, Yasouj, Iran (Corresponding Author)

Email: seyedehzahra.sajadi@gmail.com

Hojatollah Hossainian

Assistant Professor, Department of Applied Chemistry, Faculty of Oil and Gas, Gachsaran, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Email: hojatollahhossainian@gmail.com

Mohammad Reza Salimpour

Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Email: salimpour@cc.iut.ac.ir

Abstract

Modern aircraft and space systems increasingly rely on sophisticated and advanced electronic systems. As the capabilities of these systems expand, their power consumption—and consequently, heat generation and thermal shock—have increased significantly. Excessive heat can lead to electronic system failures and serious consequences for flight safety. Therefore, designing effective cooling systems is essential. The passive self-cooling system proposed in this study consists of a rectangular component containing parallel channels divided into active channels, through which the coolant flows, and passive channels, which contain stagnant fluid. The channels are interconnected by microthermostats. When the heat flux increases in specific regions of the component, the passive channels are converted into active channels, thereby increasing localized cooling. The results showed that cooling increased with increasing heat flux; therefore, this mechanism is suitable for protecting electronic components under high heat-flux conditions. Furthermore, the difference between the results of the three-dimensional flow analysis in this study and those of the two-dimensional flow analyses conducted in previous studies was negligible, and both produced similar cooling performance. This finding indicates that simple two-dimensional analytical solutions may be used instead of complex three-dimensional analytical solutions for flow in ducts.

Keywords: Electronic Components, Aerospace, Passive Self-Cooling, Thermal Shock





20.1001.1.28212606.1405.9.2.1.5

<https://amfad.sndu.ac.ir/> E-ISSN:2980-8073





سال نهم، شماره دوم (پیاپی ۳۰)، تابستان ۱۴۰۵، صص ۱۱-۳۶
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

مقاله پژوهشی

مدیریت حرارتی و ایمنی درون قطعات سامانه‌های پرتابی و هواپیماها با طراحی سامانه خودخنک‌کننده غیرفعال

سیده زهرا سجادی

استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران (نویسنده مسئول)
Email: seyedehzahra.sajadi@gmail.com

حجت اله حسینیان

استادیار گروه شیمی کاربردی، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
Email: hojatollahhossainian@gmail.com

محمد رضا سلیم‌پور

استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
Email: salimpour@cc.iut.ac.ir

چکیده

هواپیماها و سامانه‌های فضایی مدرن بیش از پیش به سامانه‌های الکترونیکی پیچیده و پیشرفته متکی‌اند. با افزایش قابلیت‌ها این سامانه‌ها، توان مصرفی و در نتیجه تولید و شوک حرارتی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. حرارت بیش از حد، منجر به خرابی سامانه‌های الکترونیکی و پیامدهای جدی ایمنی پرواز می‌شود. بنابراین طراحی سامانه‌های خنک‌کننده مؤثر یک ضرورت است. سامانه خودخنک‌کننده پیشنهادی در این پژوهش شامل یک قطعه مستطیلی با کانال‌های موازی است که این کانال‌ها به دو دسته فعال (دارای جریان سیال خنک‌کننده) و غیرفعال (دارای سیال ساکن) تقسیم می‌شوند. این کانال‌ها از طریق میکروتروموسسات‌های حرارتی به یکدیگر متصل هستند و در صورت افزایش شار حرارتی در بخش‌هایی از قطعه، کانال‌های غیرفعال به کانال فعال تبدیل شده و خنک‌سازی موضعی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که خنک‌سازی با افزایش شار حرارتی، افزایش می‌یابد بنابراین این سازوکار برای حفاظت از قطعات الکترونیکی که تحت شرایط شار حرارتی بالا قرار دارند، مناسب است. همچنین اختلاف نتایج مربوط به جریان سه‌بعدی این پژوهش و جریان دو‌بعدی انجام شده در پژوهش‌های پیشین، ناچیز بوده و خنک‌سازی یکسانی را سبب می‌شوند. این مطلب نشان می‌دهد که به‌جای حل‌های تحلیلی سه‌بعدی پیچیده جریان در داکت می‌توان از حل‌های ساده دو‌بعدی استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: قطعات الکترونیکی، هوافضا، خودخنک‌کننده غیرفعال، شوک حرارتی

دانشگاه عالی دفاع ملی ♦ پژوهشکده آماد، فناوری دفاعی و عرصه‌های نوپدید / فصلنامه آماد و فناوری دفاعی



20.1001.1.28212606.1405.9.2.1.5

<https://amfad.sndu.ac.ir/> E-ISSN: 2980-8073



صحت مطالب بر عهده نویسنده مقاله است و بیانگر دیدگاه دانشگاه عالی دفاع ملی نیست.



مقدمه و بیان مسئله

صنعت هوافضا در دهه‌های اخیر شاهد تحولات چشمگیری در زمینه الکترونیک پرواز بوده است. سیستم‌های ناوبری، کنترل پرواز، پردازش سیگنال‌های راداری و ارتباطات ماهواره‌ای همگی به تراشه‌های الکترونیکی پیشرفته وابسته هستند. با این حال، این پیشرفت‌ها با چالش جدی مدیریت حرارتی همراه بوده است. در محیط‌های عملیاتی هواپیماها و موشک‌ها، تراشه‌های الکترونیکی علاوه بر گرمای تولیدی داخلی، با گرمای محیطی ناشی از اصطکاک آیرودینامیکی در سرعت‌های بالا، در ارتفاعات نیز مواجه هستند. این شرایط منجر به ایجاد گرادیان‌های حرارتی شدید می‌شود که می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی و خرابی‌های ساختاری شود. تراشه‌های مورد استفاده در سیستم‌های هوایی و موشک‌ها معمولاً پردازنده‌های پرسرعتی هستند که توان مصرفی بالایی دارند. براساس قانون ژول، افزایش جریان الکتریکی و مقاومت منجر به تولید گرمای قابل توجهی می‌شود که اگر مدیریت نشود، دمای تراشه را می‌تواند تا بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برساند، که از محدوده مجاز عملیاتی فراتر می‌رود (پکت^۱، ۲۰۰۹). تأثیرات گرمای بیش از حد بر عملکرد تراشه‌ها عبارت‌اند از: کاهش عمر مفید قطعات، تغییر در مشخصات الکتریکی و خرابی ناگهانی (وی^۲ و همکاران، ۲۰۰۷؛ یازاوا^۳ و همکاران، ۲۰۱۵). برای خنک‌کاری تراشه‌های الکترونیکی هواپیماها و موشک‌ها از خنک‌کننده‌های فعال، خنک‌کننده‌های غیرفعال و خنک‌کننده‌های نوین استفاده می‌شود. خنک‌کننده‌های فعال از فن‌ها، پمپ‌های مایع و مبدل‌های حرارتی در انتقال گرما استفاده می‌کنند. در برخی موشک‌ها، از سیستم‌های خنک‌کننده دارای سیالات ویژه مانند «فلورینت»^۴ استفاده می‌شود که ضریب انتقال حرارت بالایی دارند (کاندلیکار^۵ و همکاران، ۲۰۰۵). خنک‌کننده‌های غیرفعال شامل هیت‌سینک‌های پیشرفته و لوله‌های حرارتی هستند که هیت‌سینک‌های پیشرفته از مواد با رسانایی گرمایی بالا مانند مس یا الماس مصنوعی

1. Pecht

2. Wei

3. Yazawa

4. Fluorinert

5. Kandlikar



ساخته می‌شوند و لوله‌های حرارتی با استفاده از تبخیر و میعان یک سیال، گرمای تراشه را به سرعت منتقل می‌کنند (فقری^۱ و همکاران، ۲۰۱۴؛ چن^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). خنک‌کننده‌های نوین شامل خنک‌کنندگی فاز تغییر (موادی مانند پارافین که با ذوب و انجماد، گرمای تراشه را جذب می‌کنند.) و خنک‌کنندگی ترموالکتریک هستند که در این خنک‌کننده‌ها با استفاده از «اثر پلتیر»^۳، گرما از یک سمت تراشه به سمت دیگر منتقل می‌شود (رو^۴، ۲۰۰۵). یکی از شاخص‌های مهم در عملکرد دستگاه‌های مختلف، توانایی آن‌ها در تأمین انرژی مورد نیاز برای خنک‌سازی قطعات، بدون نیاز به منبع انرژی خارجی است. این ویژگی را خودخنک‌کنندگی می‌نامند و می‌تواند شامل تأمین انرژی برای پمپاژ مایع خنک‌کننده در کانال‌ها یا به حرکت درآوردن فن باشد (دوانگتونگسوک^۵ و وانگوایز^۶، ۲۰۱۷). تحقیقات زیادی در زمینه سیستم‌های خودخنک‌کننده و خنک‌سازی قطعات انجام شده است. آوندسازی راه‌حلی است برای طراحی و به‌منظور حداکثر انتقال جرم و حرارت در طراحی مواد هوشمند، ابداع شده و مورد استفاده محققین قرار گرفته است (چو^۷ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لی^۸ و همکاران، ۲۰۰۹؛ روچا^۹ و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به معایب و پیچیدگی سیستم‌های خودخنک‌کننده ترموالکتریک، در این پژوهش قرار است یک سامانه خود خنک‌کننده غیرفعال آوندی که برای اولین بار توسط سجادی و سلیم‌پور (سجادی و سلیم‌پور، ۲۰۲۱). طراحی شده، به‌صورت تحلیلی و سه‌بعدی مورد بررسی قرار گیرد. تعدادی از مطالعات انجام شده به‌صورت عددی راجع به خنک‌کننده‌های آوندی و خود خنک‌کننده‌های ترموالکتریک عبارت‌اند از: سلیم‌پور و منبری به مطالعه و بهینه‌سازی کانال‌های خنک‌کننده درون یک جسم حلقه‌ای شکل پرداختند. هدف پژوهش آن‌ها به‌دست آوردن بهترین ساختار برای دست یافتن

-
1. Faghri
 2. Chen
 3. Peltier Effect
 4. Rowe
 5. Duangthongsuk
 6. Wongwises
 7. Cho
 8. Lee
 9. Rocha

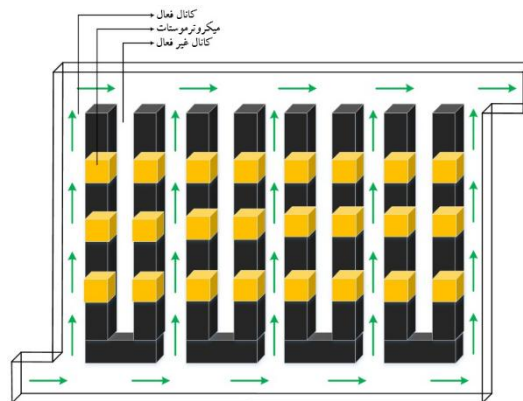
به مقاومت جریان و حرارتی حداقلی بود. نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که نرخ جریان جرمی تأثیر زیادی بر مقاومت حرارتی دارد (سلیم‌پور و منبری، ۲۰۱۵). «کیفلماریام»^۱ و «لین»^۲ مطالعه‌ای در مورد شبیه‌سازی عددی یک سامانه خنک‌کننده همراه با تولید ترموالکتریک برای خودخنک‌کنندگی دستگاه‌های الکتریکی انجام دادند. در پژوهش آن‌ها، مدل‌سازی عددی انجام شده و اعتبارسنجی آن براساس یک مطالعه‌ی تجربی صورت گرفته است. رابطه بین سرعت مایع خنک‌کننده و شار حرارتی در دستگاه حرارتی نیز برای اعتبارسنجی مفهوم خودخنک‌کنندگی مدل‌سازی شده است (کیفلماریام و لین، ۲۰۱۵). «ینیجون»^۳ و «ستکین»^۴ پژوهشی در مورد ساختارهای طراحی درخت‌مانند برای خودخنک‌کنندگی انجام دادند. در این تحقیق، دو مدل طراحی آوندی (یکی با آوندهای شعاعی و دیگری با آوندهای درخت‌مانند) با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که با تغییر طراحی از آوندهای شعاعی به درخت‌مانند، افت فشار کاهش یافته و ضریب جابه‌جایی افزایش می‌یابد (ینیجون و ستکین، ۲۰۱۶). «کانگ»^۵ و همکاران پژوهشی در مورد طراحی ساختار خودخنک‌کاری چرخشی برای ماشین‌های مغناطیسی در وسایل نقلیه الکتریکی انجام دادند. این تحقیق نشان داد که ساختار خنک‌کننده‌ی پیشنهادی می‌تواند گردش هوا را در سوراخ‌های خروجی روتور به‌طور مؤثر افزایش دهد و خنک‌کاری مناسبی با افت مقاومت هوای پایین ارائه دهد (کانگ و همکاران، ۲۰۲۰). «یانگ»^۶ و همکاران در پژوهشی به‌منظور حل مشکلات ناشی از افزایش دما و مصرف بالای برق در باتری‌هایی که با روش‌های سنتی مایع خنک‌کننده خنک می‌شدند، سیستمی جدید با الهام از ساختار رگ‌های خونی انسان پیشنهاد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این سامانه عملکرد بهتری در دفع حرارت دارد (یانگ و همکاران، ۲۰۲۵). «مارتینز»^۷ و همکاران پژوهشی در مورد خودخنک‌کننده‌های ترموالکتریک برای دستگاه‌های الکترونیکی

1. Kiflemariam
2. Lin
3. Yenigün
4. Çetkin
5. Kang
6. Yang
7. Martinez



انجام دادند. این پژوهش به بررسی ترکیب مبدل‌های حرارتی لوله‌ای و خودخنک‌کننده‌های ترموالکتریک و کاربرد آن‌ها در خنک‌سازی وسایل الکترونیکی می‌پردازد (مارتینز و همکاران، ۲۰۱۶). «الشهری»^۱ و «صابر»^۲ به بررسی تجربی خنک‌کاری ترموالکتریک برای تراشه‌های کامپیوتری پرداختند که هدف پژوهش آن‌ها در این پروژه تحقیقاتی، توسعه ابزاری برای خنک‌سازی قطعات الکترونیکی با نقاط شار حرارتی بالا و ناگهانی، با حداقل افزایش در توان کلی، است (الشهری و صابر، ۲۰۲۰). با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده، تاکنون پژوهش تحلیلی سه‌بعدی راجع به خودخنک‌کننده‌های غیرفعال آوندی انجام نشده و فقط حل تحلیلی دوبعدی آن برای جریان آرام توسط سجادی و سلیم‌پور (سجادی و سلیم‌پور، ۲۰۲۱) ارائه شده است. با توجه به سادگی حل معادلات دوبعدی نسبت به معادلات سه‌بعدی، در این پژوهش برای نخستین بار حل تحلیلی جریان آرام درون یک خودخنک‌کننده غیرفعال آوندی به صورت سه‌بعدی انجام شده و نتایج به دست آمده با نتایج حل تحلیلی دوبعدی جریان آرام مقایسه شده است. با توجه به این که ماکزیمم کاهش دما در حالت دوبعدی و سه‌بعدی تفاوت ناچیزی با یکدیگر دارند، می‌توان برای حل جریان تحلیلی درون داکت، حل دوبعدی را جایگزین حل تحلیلی پیچیده سه‌بعدی کرد. این امر هم در ساده‌سازی و هم در کاهش زمان حل مسائل تأثیر بسزایی دارد.

قطعه در نظر گرفته شده، قطعه‌ای با سطح مقطع مستطیلی شکل بوده و ابعاد آن ثابت فرض شده است. در حل تحلیلی، ابعاد قطعه برای جریان آرام تقریباً 216×111 میلی‌متر مربع است و کانال‌هایی در این قطعه برای جریان مایع خنک‌کننده تعبیه شده‌اند. برای بررسی ساختار، آوندها به صورت کانال‌های موازی در نظر گرفته (مطابق شکل ۱) شده است.



شکل ۱: شماتیک کلی قطعه مورد بررسی در این پژوهش

کانال‌های درون قطعه به دو دسته کانال‌های فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. کانال‌های فعال کانال‌هایی هستند که مایع خنک‌کننده در آن‌ها جریان دارد، درحالی‌که در کانال‌های غیرفعال سیال در حالت کارکرد عادی ساکن است و جریان ندارد. این کانال‌ها از یک سمت مسدود بوده از سمت دیگر به مجرای جمع‌آوری کننده سیال متصل هستند. چیدمان کانال‌های فعال و غیرفعال به‌گونه‌ای است که در دو سمت هر کانال فعال، دو کانال غیرفعال قرار دارد. همچنین در دو لبه عرضی صفحه نیز کانال فعال قرار دارد. نحوه کارکرد این سامانه به این شکل است که کانال‌های غیرفعال در نقاط مشخصی توسط میکروترموستات‌هایی به کانال‌های فعال متصل شده‌اند و زمانی که دمای سیال در نقطه یا نقاطی از قطعه بالا رود، میکروترموستات‌ها مسیر بین دو کانال فعال و غیرفعال را باز کرده، سیال خنک‌کن وارد کانال‌های غیرفعال شده، خنک‌کاری در آن نقاط (نقاط با شار حرارتی بالا) افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که اگر سیال از همان ابتدا درون همه کانال‌ها جریان داشته باشد، با توجه به این‌که دبی حجمی سیال ورودی ثابت است، دبی حجمی در هر کانال کم شده و در نتیجه خنک‌کاری کلی قطعه کاهش یافته و دمای متوسط قطعه افزایش می‌یابد. حال آنکه با تقسیم کانال‌ها به دو دسته فعال و غیرفعال، در حالت عادی، دبی در کانال‌های فعال افزایش یافته دمای کلی قطعه کاهش می‌یابد. سیال خنک‌کن درون مجراها آب و جریان سیال آرام است. برای خنک‌کاری قطعه، حجم آوندها و حجم قطعه ثابت در نظر گرفته می‌شود. زمانی که



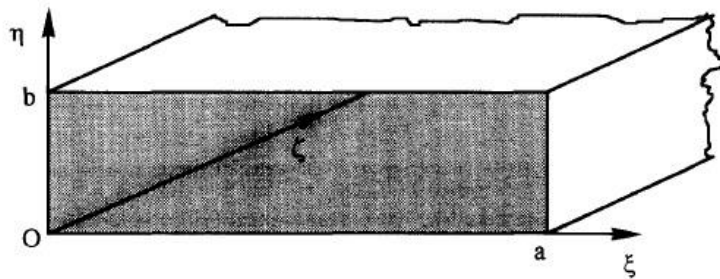
شار حرارتی در قسمتی از قطعه زیاد شده و دمای آن قسمت بالاتر از حد مجاز شود، ترموستات-ترموستات‌های نصب شده در آن قسمت در اثر دمای بالا، مسیر را باز کرده و جریان سیال بین کانال فعال و کانال غیرفعال در آن قسمت از قطعه برقرار می‌شود و در نتیجه محدوده مورد نظر خنک‌شده دمای آن کاهش می‌یابد. در این پژوهش محاسبات مربوط به حل تحلیلی جریان درون قطعه، با فرض ۱۹ کانال (۱۰ کانال فعال و ۹ کانال غیرفعال) انجام شده است.

پژوهش حاضر به صورت تحلیلی و با استفاده از نرم‌افزار «ای. ای. اس»^۱ انجام شده است. در حل تحلیلی، هدف به دست آوردن پاسخ‌های کاملاً تحلیلی است. بنابراین، مجبور به انجام ساده‌سازی‌هایی هستیم تا انجام حل تحلیلی ممکن شود. این ساده‌سازی‌ها عبارت‌اند از: جریان آرام، تراکم‌ناپذیر، سیال نیوتنی و پایا.

۱. بررسی مهندسی اهمیت قطعه با معادله‌های حل تحلیلی جریان سه‌بعدی

در این بخش با در نظر گرفتن فرضیات و ساده‌سازی‌های مربوط به حل تحلیلی جریان دوبعدی بین صفحات موازی، به بررسی جریان سیال آرام، توسعه‌یافته و دائم درون یک داکت با سطح مقطع مستطیلی شکل پرداخته شده است (اسپیگا^۲ و مورینو^۳، ۱۹۹۴). مطابق شکل (۲)، یک داکت در مختصات کارتزین در نظر گرفته شده و جهت جریان در راستای محور z است.

-
1. Engineering Equation Solver (EES)
 2. Spiga
 3. Morino



شکل ۲: مقطعی از یک کانال (اسپیگا و مورینو، ۱۹۹۴).

علاوه بر فرضیات حل جریان دوبعدی، سیال نیوتنی با خواص فیزیکی ثابت نیز فرض شده، از انتقال حرارت طبیعی صرف نظر شده و گرادیان فشار در راستای جریان ثابت است. با در نظر گرفتن فرضیات ذکر شده، معادله مومنوم عبارت است از:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + 1 = 0 \quad (1)$$

مختصات بی بعد عبارت است از:

$$x = \xi/a \quad (0 \leq x \leq 1), \quad y = \eta/a \quad (0 \leq y \leq \beta, \beta = b/a) \quad (2)$$

سرعت بدون بعد نیز عبارت است از:

$$V(x, y) = v(x, y)/P + 1 = 0 \quad (3)$$

و P برابر است با:

$$P = \frac{a^2}{\mu} \left(-\frac{\partial p}{\partial \zeta} + \rho g \zeta \right) \quad (4)$$

برای حل معادله دیفرانسیل جزئی ذکر شده، شرط مرزی عدم لغزش نیز فرض شده است (سرعت بر روی دیوارهای جانبی مستطیل صفر است).

$$V = 0 \text{ at } x = 0, x = 1 \quad \forall y \quad V = 0 \text{ at } y = 0, y = \beta \quad \forall x \quad (5)$$

با در نظر گرفتن تبدیل فوریه نسبت به x، سرعت بدون بعد و مشتقات دوم آن عبارت است از:



$$\tilde{V}(n, y) = \int_0^1 V(x, y) \sin(n\pi x) dx \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial x^2} = n\pi[V(0, y) - (-1)^n V(1, y)] - n^2 \pi^2 \tilde{V}(n, y) \quad (7)$$

با توجه به شرایط مرزی و ضرب همه جملات معادله مومنتوم در $\sin(n\pi x)$ و ادغام بر روی $[0, 1]$ ، معادله مومنتوم به صورت معادله ۸ نوشته شده است.

$$-n^2 \pi^2 \tilde{V} + \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial y^2} = -\frac{1 - (-1)^n}{n\pi} \quad (8)$$

با استفاده از تبدیل فوریه سینوسی نسبت به y و ضرب هر جمله معادله ۸ در $\sin(m\pi y/\beta)$ معادله ۸ به معادله ۹ تبدیل شده است.

$$-n^2 \pi^2 \tilde{\tilde{V}}(n, m) - \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \tilde{\tilde{V}}(n, m) + \frac{m\pi}{\beta} [\tilde{V}(n, 0) - (-1)^m \tilde{V}(n, \beta)] = \frac{-\beta}{nm\pi^2} [1 - (-1)^n] + [1 - (-1)^m] \quad (9)$$

با استفاده از معادله ۹، $\tilde{\tilde{V}}(n, m)$ برابر است با:

$$\tilde{\tilde{V}}(n, m) = \frac{\beta^3}{nm\pi^4} \frac{[1 - (-1)^n][1 - (-1)^m]}{m^2 + \beta^2 n^2} \quad (10)$$

با استفاده از معادله ۹ توزیع سرعت عبارت است از:

$$V(x, y) = \frac{16\beta^2}{\pi^4} \sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \sum_{m \text{ odd}}^{\infty} \frac{\sin(n\pi \frac{x}{a}) \sin(m\pi \frac{y}{b})}{nm(\beta^2 n^2 + m^2)} \quad (11)$$

با توجه به معادله ۱۱ می‌توان گفت، پروفیل سرعت نسبت به محورهای مختصات ξ و η متقارن است و اگر ξ/a و η/b تغییر کنند، معادله ۱۱ تغییر نمی‌کند. توابع سینوسی در ξ و η تقارن توزیع را نسبت به مرکز مقطع مستطیلی شکل نشان می‌دهند و یک هم‌گرایی سریع با توان سوم n و m در مخرج معادله ۱۱ ایجاد می‌شود. هم‌گرایی یکنواخت با استفاده از روابط کوشی قابل اثبات است. با استفاده از معادله ۱۱ سرعت متوسط محاسبه شده و عبارت است از:

$$W = \frac{64P}{\pi^6} \sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \sum_{m \text{ odd}}^{\infty} \frac{1}{n^2 m^2 (n^2 + \frac{m^2}{\beta^2})} \quad (12)$$

با استفاده از معادله‌های ۴ و ۱۲ و با توجه به شکل هندسه قطعه بررسی شده در این پژوهش (شکل ۱) و این‌که طول ضلع و طول کانال‌های قطعه به ترتیب برابر D و L است، معادله مربوط به افت فشار در راستای جریان محاسبه شده و عبارت است از:

$$\Delta P = \frac{v\pi^6}{64} \frac{1}{\sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \sum_{m \text{ odd}}^{\infty} \frac{1}{n^2 m^2 (n^2 + \frac{m^2}{\beta^2})}} \dot{m} \frac{L}{D^4} - \rho g \dot{m} L^2 \quad (13)$$

با توجه به هندسه مسئله، $\beta = a/b$ در این پژوهش برابر یک است.

برای ساده‌سازی معادله ۱۳ فرض شده است که:

$$\frac{v\pi^6}{64} \frac{1}{\sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \sum_{m \text{ odd}}^{\infty} \frac{1}{n^2 m^2 (n^2 + \frac{m^2}{\beta^2})}} = C \quad (14)$$

در نتیجه با استفاده از معادله ۱۳ و ۱۴ برای افت فشار می‌توان نوشت:

$$\Delta P = C \dot{m} \frac{L}{D^4} - \rho g \dot{m} L^2 \quad (15)$$

در طول لوله‌ها علاوه بر اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک، افت‌های دیگری تحت عنوان افت‌های موضعی نیز وجود دارد. این افت‌های موضعی در اثر عواملی مانند ورودی یا خروجی لوله، بزرگ یا کوچک شدن ناگهانی مقطع و اتصالات به‌کاررفته در سامانه مانند زانویی، سه‌راهی و ... به وجود می‌آیند. این افت‌ها ممکن است ناچیز باشند. افت جزئی اندازه‌گیری شده معمولاً به‌صورت رابطه ۱۶ بیان می‌شود:

$$Lc = \frac{h_m}{(U^2/2g)} = \frac{\Delta P_L}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (16)$$

در رابطه ۱۶، Lc ضریب افت است. این ضریب بدون بُعد بوده و مقدار آن بستگی به شکل و ابعاد قسمت‌های مختلف دارد. در این رابطه h_m ارتفاع معادل تلف‌شده برحسب متر، U سرعت متوسط سیال برحسب متر بر ثانیه و ΔP_L افت فشار موضعی برحسب پاسکال هستند (جی جی^۱، ۲۰۰۶).



از طرفی دبی جرمی برای یک کانال با سطح مقطع مربعی شکل و به طول D برابر است با:

$$\dot{m} = \rho U D^2 \quad (۱۷)$$

بنابراین با توجه به رابطه ۱۶ و ۱۷ افت فشار موضعی برای هر کانال را می‌توان به صورت رابطه ۱۸ نوشت.

$$\Delta P_L = \frac{Lc}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}^2}{D^4} \right) \quad (۱۸)$$

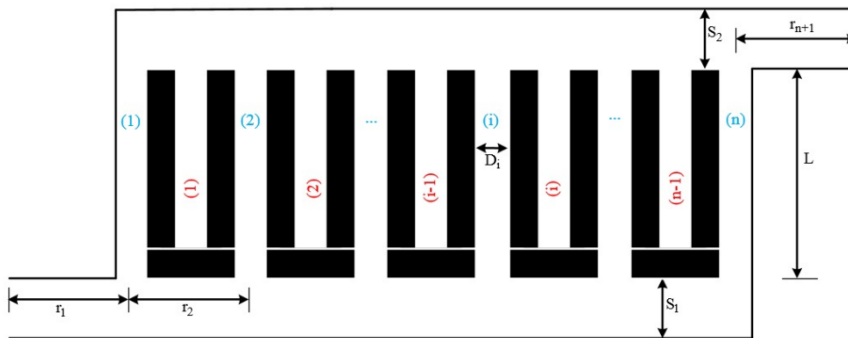
حال با در نظر گرفتن فرضیات و ساده‌سازی‌های مربوط به حل تحلیلی، عمل نکردن ترموستات‌ها و شکل (۳)، معادلات مربوط به تغییرات فشار در کانال‌های قطعه مورد بررسی در این پژوهش (کانال با صفحات موازی) عبارت‌اند از:

$$\Delta P_i = \Delta P_{i1} + \Delta P_{i2} + \Delta P_{i3} + \Delta P_{Li} \quad (۱۹)$$

با توجه به شکل (۳)، در رابطه ۱۹، ΔP_i افت فشار مربوط به کانال نام است. ΔP_{i1} افت فشار از ورودی قطعه تا ورود به کانال نام، ΔP_{i2} افت فشار در طول کانال نام و ΔP_{i3} افت فشار از خروجی کانال نام تا خروجی قطعه و ΔP_{Li} افت فشار موضعی کانال نام می‌باشند. با توجه به معادلات ۱۵، ۱۸ و معادله ۱۹، معادلات مربوط به افت فشار اصطکاکی برای کانال‌های جریان درون قطعه (جریان سه‌بعدی) با سطح مقطع مستطیلی شکل بررسی شده در این پژوهش عبارت است از:

$$\begin{aligned} \Delta P_i = & \frac{C}{S_1^4} \sum_{j=1}^i [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=0}^{j-1} \dot{m}_k] r_j + C \dot{m}_i \frac{L}{D_i^4} + \frac{C}{S_2^4} \sum_{j=1}^n [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=j+1}^{n+1} \dot{m}_k] r_{j+1} - \\ & \rho g \sum_{j=1}^i [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=0}^{j-1} \dot{m}_k] r_j^2 - \rho g \dot{m}_i L^2 - \rho g \sum_{j=1}^n [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=j+1}^{n+1} \dot{m}_k] r_{j+1}^2 + \\ & \frac{1}{2\rho S_1^4} \left(\sum_{j=1}^{i-1} [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=0}^{j-1} \dot{m}_k]^2 L_{C1,j} \right) + \frac{L_{C2,i}}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_i^2}{D_i^4} \right) + \frac{L_{C3,i}}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_i^2}{D_i^4} \right) + \frac{1}{2\rho S_2^4} \left(\sum_{j=i+1}^n [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=j+1}^{n+1} \dot{m}_k]^2 L_{C4,j+1} \right) \end{aligned} \quad (۲۰)$$

رابطه ۲۰ افت فشار مربوط به هر کانال بسته را نشان می‌دهد.

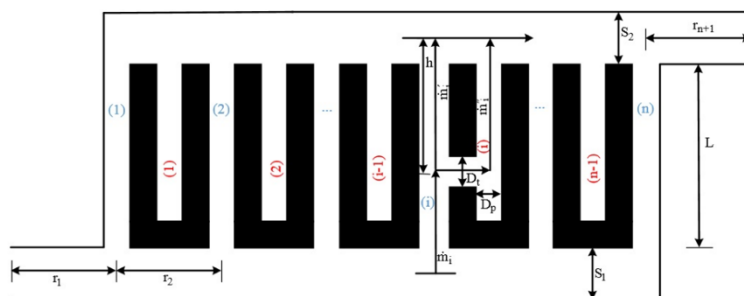


شکل ۳: قطعه مورد بررسی

در رابطه ۲۰، ΔP_i تغییرات فشار مربوط به کانال i ام را نشان می‌دهد. در این رابطه مقادیر C ، L ، S_1 ، S_2 ، ρ و r_j ها مقادیر معلومی دارند. از طرفی افت فشار یعنی ΔP_i در کانال‌ها برابر است و دبی جرمی کل یعنی $\dot{m}_{tot}$ نیز برابر است با مجموع دبی جرمی در همه کانال‌ها. در رابطه ۲۰، $\dot{m}_{tot}$ دبی جرمی کل، $\dot{m}_i$ دبی جرمی مربوط به هر کانال، L طول کانال‌ها، D قطر کانال‌های فعال، S_1 قطر کانال ورودی جریان، S_2 قطر کانال خروجی جریان، L_c ضریب اصطکاک موضعی، C ضریب ثابت، ρ چگالی سیال و r فاصله بین دو کانال فعال هستند.

$$\dot{m}_{tot} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \quad (21)$$

سیال در نظر گرفته شده در حل تحلیلی این پژوهش، آب در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۲۰ کیلوپاسکال است.



شکل ۴: تصویر مربوط به قطعه مورد بررسی با فرض عمل کردن یکی از ترموستات‌ها



معادلات حاکم برای به دست آوردن دبی جرمی درون کانال‌ها با فرض برابر بودن افت فشار همه کانال‌ها حل شده‌اند. ضرایب اصطکاک موضعی در جریان آرام با افت موضعی همگی مساوی و برابر با ۰/۱ فرض شده‌اند. حال در صورتی که یکی از ترموستات‌ها عمل کند، مطابق شکل (۴)، یکی از مسیرهای بین کانال‌ها باز شده و دو معادله دیگر به معادلات موجود اضافه می‌شوند. در این بررسی فرض شده که مسیر $i=a$ باز شده است. در شکل (۳) و (۴)، مسیرهایی که با شماره‌هایی با رنگ آبی مشخص شده‌اند، مسیرهای فعال و مسیرهای با شماره‌هایی با رنگ قرمز مسیرهای غیرفعال هستند.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_a' + \dot{m}_a'' \quad (22)$$

در حالتی که ترموستات در مسیر a باز می‌شود، معادله مربوط به مسیر a به صورت زیر تغییر می‌کند. سایر معادلات مربوط به افت فشار بقیه کانال‌ها به صورت قبل باقی می‌مانند.

$$\begin{aligned} & \frac{C\dot{m}_a'h}{D_a^4} + \frac{Cr_{a+1}}{2S_2^4} [\dot{m}_a' + \sum_{j=1}^{a-1} \dot{m}_j] - \rho g \dot{m}_a' h^2 - \rho g [\dot{m}_a' + \sum_{j=1}^{a-1} \dot{m}_j] r_{a+1}^2 + \frac{Lc_1}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a'^2}{D_a^4} \right) + \\ & \frac{Lc_2}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a'^2}{D_a^4} \right) + \frac{Lc_3}{2\rho} \left(\frac{\sum_{j=0}^{a-1} \dot{m}_j^2}{S_2^4} \right) = \frac{C\dot{m}_a'' r_{a+1}}{2D_t^4} + \frac{C\dot{m}_a'' h}{D_p^4} - \rho g \dot{m}_a'' \left(\frac{r_{a+1}}{2} \right)^2 - \rho g \dot{m}_a'' h^2 + \frac{Lc_4}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a''^2}{D_t^4} \right) + \\ & \frac{Lc_2}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a''^2}{D_t^4} \right) + \frac{Lc_2}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a''^2}{D_p^4} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_a = & \frac{C}{S_1^4} \sum_{j=1}^a [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=0}^{j-1} \dot{m}_k] r_j + \frac{C\dot{m}_a(L-h)}{D_a^4} + \frac{C\dot{m}_a'' r_{a+1}}{2D_t^4} + \frac{C\dot{m}_a'' h}{D_p^4} + \frac{Cr_{a+1}}{2S_2^4} [\sum_{j=1}^a \dot{m}_j] + \\ & \frac{C}{S_2^4} \sum_{j=a+1}^{n+1} [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=j+1}^{n+1} \dot{m}_k] r_{j+1} - \rho g \sum_{j=1}^a [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=0}^{j-1} \dot{m}_k] r_j^2 - \rho g \dot{m}_a(L-h)^2 - \\ & \rho g \dot{m}_a'' \left(\frac{r_{a+1}}{2} \right)^2 - \rho g \dot{m}_a'' h^2 - \rho g [\sum_{j=1}^a \dot{m}_j] \left(\frac{r_{a+1}}{2} \right)^2 - \rho g \sum_{j=a+1}^{n+1} [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=j+1}^{n+1} \dot{m}_k] r_{j+1}^2 + \\ & \frac{1}{2\rho S_1^4} \left(\sum_{j=0}^{i-1} [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=0}^{j-1} \dot{m}_k]^2 L_{c1,j} \right) + \frac{Lc_4}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a'^2}{D_a^4} \right) + \frac{Lc_4}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a''^2}{D_t^4} \right) + \frac{Lc_2}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a'^2}{D_t^4} \right) + \frac{Lc_2}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_a''^2}{D_p^4} \right) + \\ & \frac{1}{2\rho S_2^4} \left(\sum_{j=a+1}^n [\dot{m}_{tot} - \sum_{k=j+1}^n \dot{m}_k]^2 L_{c3,j+1} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

در این پژوهش مشخصات مربوط به هندسه و جریان درون کانال‌ها برای حل تحلیلی سه‌بعدی و دوبعدی مشابه یکدیگر در نظر گرفته شده است.

۲. نتایج حاصل از حل تحلیلی جریان آرام و سه‌بُعدی

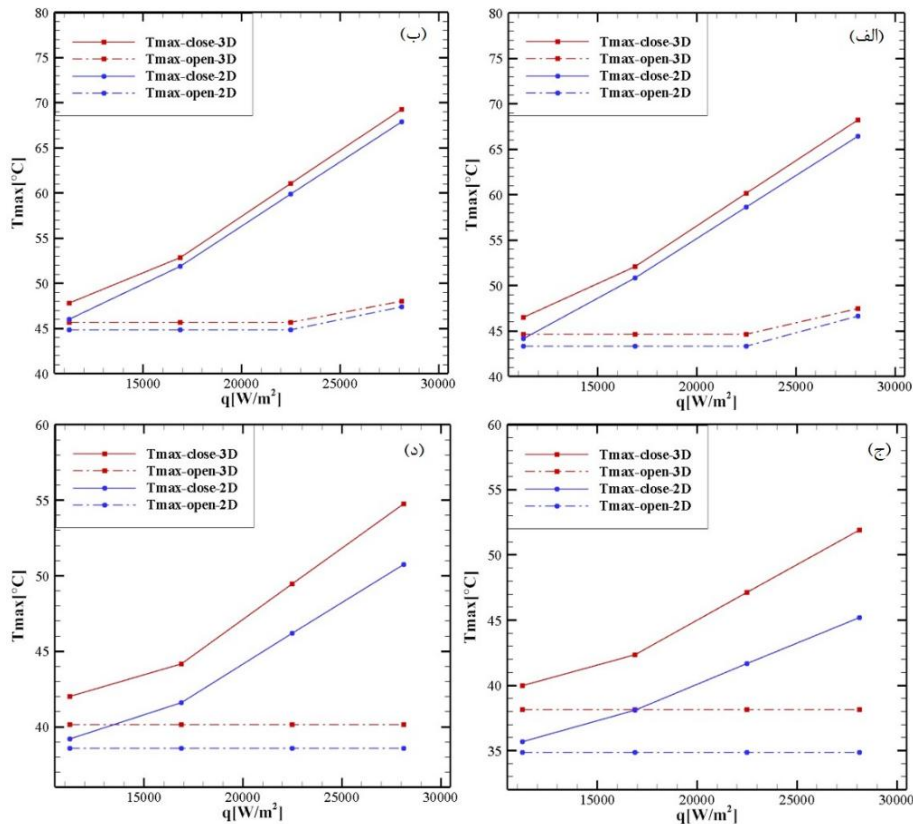
حل تحلیلی جریان آرام سه‌بُعدی و حل تحلیلی جریان آرام دو‌بُعدی برای شرایط کاملاً توسعه‌یافته و یا زمانی که طول ورودی حرارتی وجود دارد، بررسی شده‌اند. در حل تحلیلی جریان آرام و سه‌بُعدی ابتدا از افت فشار موضعی صرف‌نظر کرده و برای حالت ترموستات بسته و حالتی که در فاصله ۸۰ میلی‌متری از ابتدای کانال دوم ترموستات باز می‌شود، ماکزیمم دمای جسم برای شارهای حرارتی مختلف محاسبه شده و با ماکزیمم دمای جسم در حالت‌های ترموستات باز و بسته در حل تحلیلی جریان آرام دو‌بُعدی مقایسه شده است سپس برای همین حالت بازشدگی و با در نظر گرفتن افت فشار موضعی مجدداً ماکزیمم دمای جسم برای شارهای حرارتی مختلف در جریان دو‌بُعدی و سه‌بُعدی محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. در حل تحلیلی جریان سه‌بُعدی ابتدا یک شار حرارتی عادی برابر با ۱۱۲۵۰ وات بر مترمربع به کف قطعه وارد شده و سپس شارهای حرارتی ناگهانی به اندازه‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر شار حرارتی عادی در فاصله ۸۰ میلی‌متری از ابتدای کانال دوم به قطعه وارد شده که در نتیجه در همان محل ترموستات مسیر بین کانال فعال و غیرفعال مجاورش را باز کرده و خنک‌سازی قطعه انجام می‌شود.

شکل (۵: الف) مقایسه نتایج مربوط به دمای ماکزیمم جسم برای حالت‌های ترموستات باز و ترموستات بسته در جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته دو‌بُعدی و سه‌بُعدی را نشان می‌دهد. در شکل‌های مربوط به قسمت حل تحلیلی جریان آرام سه‌بُعدی، خطوط قرمز رنگ مربوط به جریان سه‌بُعدی و خطوط آبی‌رنگ مربوط به جریان دو‌بُعدی است. همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود روند تغییرات دمای ماکزیمم در جریان دو‌بُعدی و سه‌بُعدی مشابه یکدیگر است و اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند. میزان کاهش دمای ماکزیمم جسم در جریان دو‌بُعدی برای شار حرارتی ۲۸۱۲۵ وات بر مترمربع ۱۹/۷۹ درجه سانتی‌گراد و این میزان برای جریان سه‌بُعدی ۲۰/۷۶ درجه سانتی‌گراد است. شکل (۵: ب) مقایسه نتایج دمای ماکزیمم جسم را در حالت‌های ترموستات باز و ترموستات بسته و برای جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته دو‌بُعدی و سه‌بُعدی با در نظر گرفتن افت فشار موضعی نشان می‌دهد. در این



حالت نیز مشابه حالت بدون در نظر گرفتن افت فشار موضعی، روند تغییرات ماکزیمم دمای جسم در حالت‌های ترموستات باز و ترموستات بسته و برای جریان دوبُعدی و سه‌بُعدی مشابه یکدیگر است. در هر دو حالت جریان دوبُعدی و جریان سه‌بُعدی با در نظر گرفتن افت فشار موضعی ماکزیمم دمای قطعه و میزان خنک‌کنندگی آن افزایش یافته است. میزان کاهش دمای ماکزیمم جسم برای حالت جریان دوبُعدی $20/43$ درجه سانتی‌گراد و این کاهش برای جریان سه‌بُعدی $21/23$ درجه سانتی‌گراد است. علاوه بر جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته برای جریان دوبُعدی و سه‌بُعدی جریان با طول ورودی حرارتی و دو حالت صرف‌نظر از افت فشار موضعی و در نظر گرفتن افت فشار موضعی بررسی شده است. شکل (۵: ج) مقایسه نتایج مربوط به دمای ماکزیمم جسم برای حالت‌های ترموستات باز و ترموستات بسته را برای جریان آرام با طول ورودی حرارتی و با صرف‌نظر از افت فشار موضعی نشان می‌دهد. در حل تحلیلی جریان آرام سه‌بُعدی مشابه حل تحلیلی جریان آرام دوبُعدی، توسعه‌نیافتگی سبب افزایش میزان انتقال حرارت شده، در نتیجه ماکزیمم دمای جسم و خنک‌سازی آن نسبت به جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته کاهش یافته است. کاهش ماکزیمم دمای جسم با باز شدن ترموستات‌ها و خنک‌سازی قطعه برای جریان آرام دوبُعدی با طول ورودی حرارتی و صرف‌نظر از افت فشار موضعی $10/36$ درجه سانتی‌گراد و این میزان کاهش برای جریان سه‌بُعدی $13/78$ درجه سانتی‌گراد است. شکل (۵: د) مقایسه نتایج مربوط به دمای ماکزیمم قطعه در حالت‌های ترموستات باز و ترموستات بسته را برای جریان آرام دوبُعدی و سه‌بُعدی با طول ورودی حرارتی و با در نظر گرفتن افت فشار موضعی نشان می‌دهد. در این حالت مشابه جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته دوبُعدی و سه‌بُعدی، افت فشار موضعی سبب افزایش ماکزیمم دمای قطعه و در نتیجه افزایش میزان خنک‌سازی آن می‌شود. میزان این خنک‌سازی برای جریان آرام دوبُعدی با طول ورودی حرارتی و با در نظر گرفتن افت فشار موضعی $12/18$ درجه سانتی‌گراد و کاهش دمای ماکزیمم قطعه برای جریان سه‌بُعدی با طول ورودی حرارتی و با در نظر گرفتن افت فشار موضعی $14/63$ درجه سانتی‌گراد است. در جریان آرام سه‌بُعدی و دوبُعدی با طول ورودی حرارتی در هر دو حالت

صرف نظر از افت فشار موضعی و در نظر گرفتن افت فشار موضعی روند تغییرات دمای ماکزیمم قطعه مشابه یکدیگر است و میزان خنک سازی جسم (اختلاف دمای ماکزیمم بین حالت ترموستات باز و ترموستات بسته) در حالت جریان سه بُعدی و جریان دوبُعدی اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند.



شکل ۵: مقایسه نتایج مربوط به دمای ماکزیمم قطعه در حالت های ترموستات بسته و ترموستات باز برای جریان سه بُعدی و دوبُعدی، جریان توسعه یافته و بدون در نظر گرفتن افت فشار موضعی.

کلیه نتایج مربوط به حل تحلیلی جریان آرام دوبُعدی و سه بُعدی در جدول (۱) تا (۴) آمده است.



جدول ۱: نتایج مربوط به دمای ماکزیمم قطعه در حالت‌های ترموستات بسته و ترموستات باز برای جریان سه‌بعدی و دوبعدی، جریان توسعه‌یافته و بدون در نظر گرفتن افت فشار موضعی

q (W/m ²)	Tmax, 2D			Tmax, 3D		
	Close	Open	ΔT	Close	Open	ΔT
۱۱۲۵۰	۴۴/۱۸	۴۳/۲۹	۰/۸۹	۴۶/۴۸	۴۶/۶۰	۰/۱۲
۱۶۸۷۵	۵۰/۸۳	۴۳/۲۹	۷/۵۴	۵۲/۱۱	۴۶/۶۰	۵/۵۱
۲۲۵۰۰	۵۸/۶۳	۴۳/۲۹	۱۵/۳۴	۶۰/۱۶	۴۶/۶۰	۱۳/۵۶
۲۸۱۲۵	۶۶/۴۲	۴۶/۶۳	۱۹/۷۹	۶۸/۲۱	۴۷/۴۵	۲۰/۷۶

جدول ۲: نتایج مربوط به دمای ماکزیمم قطعه در حالت‌های ترموستات بسته و ترموستات باز برای جریان سه‌بعدی و دوبعدی، جریان توسعه‌یافته و با در نظر گرفتن افت فشار موضعی

q (W/m ²)	Tmax, 2D			Tmax, 3D		
	Close	Open	ΔT	Close	Open	ΔT
۱۱۲۵۰	۴۶/۰۱	۴۴/۸۲	۱/۱۹	۴۷/۸۱	۴۵/۶۴	۲/۱۷
۱۶۸۷۵	۵۱/۸۵	۴۴/۸۲	۷/۰۳	۵۲/۸۵	۴۵/۶۴	۷/۲۱
۲۲۵۰۰	۵۹/۸۵	۴۴/۸۲	۱۵/۰۳	۶۱/۰۵	۴۵/۶۴	۱۵/۴۱
۲۸۱۲۵	۶۷/۸۵	۴۷/۴۲	۲۰/۴۳	۶۹/۲۴	۴۸/۰۱	۲۱/۲۳

جدول ۳: نتایج مربوط به دمای ماکزیمم قطعه در حالت‌های ترموستات بسته و ترموستات باز برای جریان سه‌بعدی و دوبعدی، جریان با طول ورودی حرارتی و بدون در نظر گرفتن افت فشار موضعی

q (W/m ²)	Tmax, 2D			Tmax, 3D		
	Close	Open	ΔT	Close	Open	ΔT
۱۱۲۵۰	۳۵/۷۰	۳۴/۸۵	۰/۸۵	۳۹/۹۶	۳۸/۱۳	۱/۸۳
۱۶۸۷۵	۳۸/۱۱	۳۴/۸۵	۳/۲۶	۴۲/۳۳	۳۸/۱۳	۴/۲
۲۲۵۰۰	۴۱/۶۶	۳۴/۸۵	۶/۸۱	۴۷/۱۲	۳۸/۱۳	۸/۹۹
۲۸۱۲۵	۴۵/۲۱	۳۴/۸۵	۱۰/۳۶	۵۱/۹۱	۳۸/۱۳	۱۳/۷۸

جدول ۴: نتایج مربوط به دمای ماکزیمم قطعه در حالت‌های ترموستات بسته و ترموستات باز برای جریان سه‌بُعدی و دو‌بُعدی، جریان با طول ورودی حرارتی و با در نظر گرفتن افت فشار موضعی

q (W/m ²)	Tmax, 2D			Tmax, 3D		
	Close	Open	ΔT	Close	Open	ΔT
۱۱۲۵۰	۳۹/۱۸	۳۸/۵۸	۰/۶	۴۲/۰۲	۴۰/۱۳	۱/۸۹
۱۶۸۷۵	۴۱/۶۰	۳۸/۵۸	۳/۰۲	۴۴/۱۵	۴۰/۱۳	۴/۰۲
۲۲۵۰۰	۴۶/۱۸	۳۸/۵۸	۷/۶	۴۹/۴۶	۴۰/۱۳	۹/۳۳
۲۸۱۲۵	۵۰/۷۶	۳۸/۵۸	۱۲/۱۸	۵۴/۷۶	۴۰/۱۳	۱۴/۶۳

داده‌های موجود در جدول (۱) تا (۴) نیز نشان می‌دهند که نتایج مربوط به اختلاف دمای ماکزیمم قطعه در حالت ترموستات بسته و ترموستات باز در حل تحلیلی جریان آرام دو‌بُعدی و سه‌بُعدی تفاوت ناچیزی با یکدیگر دارند بنابراین همان‌طور که پیش‌تر هم بیان شد به‌جای حل تحلیلی سه‌بُعدی جریان درون داکت‌ها که هم پیچیده و هم زمان‌بر است، می‌توان با فرض خوبی از تحلیلی جریان دو‌بُعدی استفاده کرد.

۳. نتیجه‌گیری

رقابت در صنایع هوافضایی نظیر هواپیماها، موشک‌ها و سامانه‌های فضایی مدرن و به‌کارگیری قطعات پیچیده الکترونیکی سبک‌تر، سریع‌تر و باکیفیت‌تر و نقش حیاتی این قطعات در عملکرد ایمن، کارآمد و راحت حین مسیر پرواز نگرانی شدید دانشمندان این حوزه‌ها را در پی داشته است. در محیط‌های عملیاتی هواپیماها و موشک‌ها، تراشه‌های الکترونیکی علاوه بر گرمای تولیدی داخلی، با گرمای محیطی ناشی از اصطکاک آیرودینامیکی در سرعت‌های بالا نیز مواجه هستند. این شرایط منجر به ایجاد گرادیان‌های حرارتی شدید می‌شود که می‌تواند باعث بروز تنش‌های مکانیکی و خرابی‌های ساختاری شود بنابراین سرمایه‌گذاری روی بُعد خنک‌سازی سریع قطعات در کنار توجه به کوچک‌ترسازی حجم‌های قطعات به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در این پژوهش تلاش شده ضمن پرداختن به اهمیت موضوع، به‌صورت مهندسی نیز مدل سامانه



خودخنک‌کننده غیرفعال را معرفی، طراحی و بررسی کند و با توجه به پشتیبانی تجربی انجام یافته و نتایج خوب کاهش دمای بیش از ۲۰ درجه سانتی‌گراد، ارزش توجه و تقویت رویکرد به سمت سیستم‌های خود خنک‌کننده را طبق توضیحات مفصل‌تر ذیل نتیجه گرفته است. در این پژوهش در بخش تحقیق مهندسی برای نخستین بار یک خودخنک‌کننده غیرفعال آوندی طراحی شده که در صورت افزایش شار حرارتی در هر قسمت از قطعه خنک‌سازی را افزایش داده و دمای ماکزیمم قطعه را کاهش دهد. برای چهار شار حرارتی مختلف ۱۱۲۵۰، ۱۶۸۷۵، ۲۲۵۰۰ و ۲۸۱۲۵ وات بر متر مربع و افزایش شار حرارتی در نقطه‌ای با فاصله ۸۰ میلی‌متری از ابتدای کانال دوم و با در نظر گرفتن و یا صرف‌نظر از افت موضعی، خنک‌سازی قطعه مستطیلی بررسی و نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که

۱. هر چه شار حرارتی افزایش یابد افت دمای ماکزیمم و تأثیر عمل کردن ترموستات‌ها و بازشدگی ترموستات‌ها بیشتر می‌شود و خنک‌سازی افزایش می‌یابد.
۲. نتایج نشان می‌دهند که افت فشار موضعی در تحلیل جریان و عملکرد حرارتی قطعه مهم است. در نظر گرفتن افت فشار موضعی منجر به کاهش جریان جرمی مایعات و افزایش دمای قطعه می‌شود. با استفاده از این سامانه خودخنک‌کن غیرفعال، خنک‌سازی در حالتی که افت فشار موضعی در نظر گرفته شده، بیشتر از حالت افت فشار موضعی صرف‌نظر شده است. مثلاً در جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته در حالت با افت فشار موضعی و برای شار حرارتی ۲۸۱۲۵ وات بر مترمربع، میزان خنک‌سازی قطعه با فرض جریان دو‌بعدی و سه‌بعدی به ترتیب ۲۰/۴۳ و ۲۱/۲۳ درجه سانتی‌گراد و در حالت صرف‌نظر از افت فشار موضعی و با فرض جریان دو‌بعدی و سه‌بعدی به ترتیب ۱۹/۷۹ و ۲۰/۷۶ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است.

۳. نتایج حل تحلیلی جریان درون قطعه مستطیلی شکل، به‌صورت دو‌بعدی و سه‌بعدی تفاوت ناچیزی دارند و با توجه به سادگی جریان به‌صورت دو‌بعدی نسبت به حالت سه‌بعدی، می‌توان از معادلات حالت دو‌بعدی به‌جای سه‌بعدی در پژوهش‌ها استفاده کرد.

جدول ۵: فهرست علائم

پارامتر	علامت	ردیف	پارامتر	علامت	ردیف
دمای ماکزیمم قطعه (°C)	T_{max}	۳۴	مساحت سطح کانال	A_s	۱
دمای متوسط سیال (°C)	T_m	۳۵	طول مستطیل	a	۲
سرعت متوسط سیال (m/s)	U	۳۶	عرض مستطیل	b	۳
سرعت سیال (m/s)	v	۳۷	مقدار ثابت	C	۴
سرعت بدون بُعد	$V(.)$	۳۸	ضریب اصطکاک	C_f	۵
تبدیل فوریه سینوسی V نسبت به x	$\tilde{V}(.)$	۳۹	گرمای ویژه	c_p	۶
تبدیل فوریه دو برابری سینوسی V	$\tilde{\tilde{V}}(.)$	۴۰	قطر کانال فعال	D	۷
سرعت متوسط (m/s)	W	۴۱	قطر کانال a ام	D_a	۸
طول قسمتی از کانال (m)	x	۴۲	قطر کانال غیرفعال	D_p	۹
مختصات دکارتی بدون بُعد	x	۴۳	قطر ترموستات	D_t	۱۰
پارامتر بدون بُعد	x_*	۴۴	قطر هیدرولیکی	D_h	۱۱
مختصات دکارتی بدون بُعد	y	۴۵	فاصله بین ترموستات تا مسیر خروجی جریان	h	۱۲
فاصله نقطه داغ تا ترموستات (m)	γ	۴۶	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m^2K)	h	۱۳
نرخ اضمحلال	ε	۴۷	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط (W/m^2K)	$\bar{h}$	۱۴
مختصات دکارتی (m)	ζ	۴۸	ضریب انتقال حرارت جابه- جایی مرجع (W/m^2K)	$\bar{h}_0$	۱۵
مختصات دکارتی (m)	η	۴۹	ارتفاع (m)	$\hat{h}$	۱۶
نسبت منظری	β	۵۰	طول کانال (m)	L	۱۷
لزجت دینامیکی (kg/ms)	μ	۵۱	ضریب اصطکاک موضعی	Lc	۱۸
لزجت سینماتیکی (m^2/s)	ν	۵۲	دبی جرمی کل (kg/s)	$\dot{m}_{tot}$	۱۹



ردیف	علامت	پارامتر	ردیف	علامت	پارامتر
۲۰	$\dot{m}_i$	دبی جرمی مربوط به هر کانال (kg/s)	۵۳	v_T	ویسکوزیته گردابی
۲۱	Nu	عدد ناسلت متوسط	۵۴	ξ	مختصات دکارتی (m)
۲۲	p	سرعت در حل سه‌بعدی جریان (m/s)	۵۵	ρ	چگالی (kg/m ³)
۲۳	p	فشار (kg/ms ²)	زیرنویس‌ها		
۲۴	ΔP	تغییرات فشار (kg/ms ²)	ردیف	علامت	پارامتر
۲۵	Pr	عدد پرانتل	۵۶	D_h	قطر هیدرولیکی
۲۶	$\frac{dp}{dx}$	گرادیان فشار (kg/ms ²)	۵۷	f	اصطکاک
۲۷	$q(x)$	انتقال حرارت (W)	۵۸	h	هیدرولیکی
۲۸	$\dot{q}_{max}$	ماکزیمم شار حرارتی (W/m ²)	۵۹	m	متوسط
۲۹	$\dot{q}_s$	شار حرارتی یکنواخت (W/m ²)	۶۰	max	ماکزیمم
۳۰	r	فاصله بین دو کانال فعال (m)	۶۱	s	سطح
۳۱	Re_{D_h}	عدد رینولدز	۶۲	tot	کل
۳۲	S	قطر ورودی و خروجی کانال (m)	۶۳	t	ترموستات
۳۳	T	دمای اولیه قطعه (°C)	۶۴	x	موضعی (محلی)

References

- Al-Shehri, S., & Saber, H. H. (2020). Experimental investigation of using thermoelectric cooling for computer chips. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(5), 321-329.
- Chen, L., Liu, R., & Shi, X. (2020). *Thermoelectric materials and devices*. Elsevier.
- Cho, K.-H., Lee, J., Kim, M.-H., & Bejan, A. (2010). Vascular design of constructal structures with low flow resistance and nonuniformity. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(12), 2309-2318.
- Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2017). An experimental investigation on the heat transfer and pressure drop characteristics of nanofluid flowing in microchannel heat sink with multiple zigzag flow channel structures. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 87, 30-39.
- Faghri, A. (2014). Heat pipes: review, opportunities and challenges. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 5(1).
- Jiji, L. M. (2006). Heat Transfer in Channel Flow. *Heat Convection*, 203-258.
- Kandlikar, S., Garimella, S., Li, D., Colin, S., & King, M. R. (2005). Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. *elsevier*.
- Kang, M., Wang, H., Guo, L., Shi, T., & Xia, C. (2020). Self-circulation cooling structure design of permanent magnet machines for electric vehicle. *Applied thermal engineering*, 165, 114593.
- Kiflemariam, R., & Lin, C.-X. (2015). Numerical simulation of integrated liquid cooling and thermoelectric generation for self-cooling of electronic devices. *International Journal of Thermal Sciences*, 94, 193-203.
- Lee, J., Lorente, S., Bejan, A & .Kim, M. (2009). Vascular structures with flow uniformity and small resistance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8), 1761-1768.
- Martinez, A., Astrain, D., & Aranguren, P. (2016). Thermoelectric self-cooling for power electronics: Increasing the cooling power. *Energy*, 112, 1-7.
- Pecht, M. (2009). *Product reliability, maintainability, and supportability handbook*. CRC press.
- Rocha, L., Lorente, S., & Bejan, A. (2009). Tree-shaped vascular wall designs for localized intense cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(19-20), 4535-4544.
- Rowe, D. M. (2005). *Thermoelectrics handbook: macro to nano*. CRC press.
- Sajadi, S. Z., & Salimpour, M. R. (2021). Proposing a novel passive vascular self-cooling system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(5), 3719-3730.
- Salimpour, M. R., & Menbari, A. (2015). Analytical optimization of constructal channels used for cooling a ring shaped body based on minimum flow and thermal resistances. *Energy*, 81, 645-651.
- Spiga, M., & Morino, G. (1994). A symmetric solution for velocity profile in laminar flow through rectangular ducts. *International communications in heat and mass transfer*, 21(4), 469-475.
- Wei, X., Joshi, Y., & Patterson, M. K. (2007). Experimental and numerical study of a stacked microchannel heat sink for liquid cooling of microelectronic devices.



- Yang, Z., Sun, H., & Zhang, Y. (2025). Thermal characteristics and reliability analysis of liquid-cooled heat dissipation system for lithium-ion batteries with bionic vascular structure. *Applied thermal engineering*, 269, 126005.
- Yazawa, K., Fedorov, A., Joshi, Y., & Shakouri, A. (2015). Energy Efficient Solid-State Cooling for Hot Spot Removal. In *Cooling of Microelectronic and Nanoelectronic Equipment: Advances and Emerging Research* (pp. 195-226). World Scientific.
- Yenigün, O., & Çetkin, E. (2016). Constructal tree-shaped designs for self-cooling.



سال نهم، شماره دوم (پیاپی ۳۰)، تابستان ۱۴۰۵، صص. ۱۱-۳۶
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷
