



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد در
رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در میکروکانال با دیواره موجی و

حضور موانع V-شکل به منظور خنک‌کاری فتوولتائیک

دانشجو:

علی حسین غلطه‌الکصیرات

استاد راهنما:

دکتر موسی فرهادی

شهریور ۱۴۰۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(در این صفحه، کپی صورت جلسه دفاع با مهر تحصیلات تکمیلی پس از جلسه دفاع در نسخه نهایی پایان نامه/رساله قرار می گیرد.)

تأییدیه صحت و اصالت نتایج و مالکیت مادی و معنوی

باسمه تعالی

اینجانب **علی حسین غلطه الکصیرات** به شماره دانشجویی ۴۰۰۴۰۴۱۳۰۰۸ دانشجوی رشته‌ی مهندسی مکانیک دوره‌ی تحصیلی کارشناسی ارشد/دکتری تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه‌ی ارشد/رساله‌ی دکتری با عنوان **شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در میکروکانال با دیواره موجی و حضور موانع V-شکل به منظور خنک‌کاری فتوولتاییک** به راهنمایی **دکتر موسی فرهادی** حاصل کار اینجانب بوده و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت. در ضمن تمام دستاوردهای مادی و معنوی حاصله از پایان‌نامه ارشد/رساله دکتری متعلق به دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل می‌باشد و اینجانب هیچ گونه ادعایی در قبال آن ندارم.

نام و نام خانوادگی: **علی حسین غلطه الکصیرات**

تاریخ و امضا

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه/رساله

بهره‌برداری از این پایان‌نامه/رساله در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/رساله برای همگان بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/رساله تا تاریخ ممنوع است.

استاد راهنما:

تاریخ و امضا

تقدیم

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به :

- محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت‌آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و نامهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.
- به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است.
- به استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.
- به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.
- به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه‌ی راهم بود.

سپاس‌گزاری

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهنمایی اساتید بزرگ موفق به پایان این رساله شده‌ام وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده‌اند را به عمل آورم. در آغاز از استاد گرامی جناب آقای دکتر موسی فرهادی که راهنمای این پایان نامه را بر عهده داشته اند، کمال تشکر را دارم. از داوران گرامی که زحمت داوری و تصحیح این پایان نامه را به عهده داشتند کمال سپاس را دارم.

چکیده

انرژی خورشیدی بعنوان یکی از جذاب‌ترین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر یک منبع انرژی تجدیدپذیر بسیار حیاتی است. به‌طور کلی، عوامل متعددی مانند کاهش هزینه‌ها، پیشرفت‌های فناوری، تابش خورشید فراوان و استقلال آن، انرژی فتوولتائیک را به یکی از سریع‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان تبدیل کرده است. عملکرد سلول‌های خورشیدی در اصل به دو پارامتر، تابش خورشیدی و دمای عملیاتی، وابسته است. هنگامی که تابش خورشیدی به سطح سلول خورشیدی برخورد می‌کند، یک مقدار جزئی از آن به برق تبدیل می‌شود در حالی که بخش باقی‌مانده به حرارت تبدیل شده و دمای سلول خورشیدی را افزایش می‌دهد. از آنجاییکه کنترل بر میزان تابش خورشید ممکن نیست کاهش دمای کارکرد این پنل‌ها می‌تواند راهکاری مناسب جهت افزایش ضریب عملکرد سیستم باشد. از این رو در این پایان‌نامه تلاش شده است تا با افزودن کانال‌های خنک کاری به این پنل‌ها دمای کارکرد هرچه بیشتر کاهش یابد. در این راستا استفاده ترکیبی از کانال‌های موجدار و موانع V شکل مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا سه متغیر نسبت منظر ارتفاع ریب در بازه ۰.۱ تا ۰.۵، زاویه دهانه ریب در بازه ۴۵ تا ۹۰ درجه و تعداد مانع بر یک طول موج در تعداد ۱، ۲ و ۴ در دو رینولدز ۵۰۰ و ۵۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهد که در رینولدزهای پایین تر نسبت منظر ۰.۵ در زاویه ۹۰ درجه تا ۴۲٪ افزایش انتقال را نشان می‌دهد. از طرفی بهترین عملکرد را اندازه منظرهای ۰.۱ و ۰.۲ در زوایای بزرگتر از خود نشان می‌دهند و بهبود ضریب عملکرد تا باز ۱۳٪ محقق گشته است.

واژه‌های کلیدی: فتوولتائیک؛ انتقال حرارت؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ میکروکانال؛ موانع.

فهرست مطالب

ح.....	چکیده.....
ط.....	فهرست مطالب.....
ک.....	فهرست جدول‌ها.....
ل.....	فهرست شکل‌ها.....
۱.....	فصل ۱ آشنایی با پژوهش.....
۱-۱.....	۱-۱ مقدمه.....
۲.....	۲-۱ تکنولوژی فتوولتائیک.....
۳.....	۳-۱ تأثیر دما بر عملکرد پنل فتوولتائیک خورشیدی.....
۴.....	۴-۱ روش‌های سرمایه‌ش پیل‌های فتوولتائیک.....
۵.....	۵-۱ میکروکانال.....
۸.....	فصل ۲ پیشینه‌ی پژوهش.....
۸.....	۱-۲ مقدمه.....
۹.....	۲-۲ مروری بر ادبیات.....
۳۲.....	۳-۲ خلاصه‌های پژوهشی.....
۳۳.....	۴-۲ اهداف پژوهش.....
۳۴.....	فصل ۳ روش تحقیق.....
۳۴.....	۱-۳ مقدمه.....
۳۴.....	۲-۳ مدلسازی عددی.....
۳۵.....	۱-۲-۳ معادلات حاکم.....
۳۶.....	۲-۲-۳ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی.....
۳۷.....	۳-۲-۳ موانع.....
۳۸.....	۳-۳ اعداد بی‌بعد.....
۴۱.....	فصل ۴ نتایج و بحث‌ها.....
۴۱.....	۱-۴ مقدمه.....
۴۱.....	۲-۴ شبیه‌سازی عددی.....
۴۲.....	۳-۴ استقلال حل از شبکه.....
۴۳.....	۴-۴ اعتبارسنجی کانال صاف با حضور موانع ۹۰ درجه.....
۴۶.....	۵-۴ اعتبارسنجی کانال صاف بدون حضور مانع.....

۴-۶ نتایج مدل سازی عددی ۴۷

۴-۶-۱ زاویه ۴۵ درجه ۴۷

۴-۶-۲ زاویه ۶۰ درجه ۵۰

۴-۶-۳ زاویه ۷۵ درجه ۵۲

۴-۶-۴ زاویه ۹۰ درجه ۵۴

۴-۶-۵ افزایش عدد رینولدز ۵۵

۴-۶-۶ جمع بندی نتایج ۶۰

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۳

۵-۱ نتیجه گیری ۶۳

۵-۲ پیشنهادات ۶۴

مراجع ۶۶

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱: شرایط مرزی مفروض در مسئله	۳۷
جدول ۳-۲: محدوده اعداد بی‌بعد بکار رفته در این تحقیق	۴۰
جدول ۴-۱: خواص سیال و ذرات استفاده شده در شبیه‌سازی	۴۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: اصول کارکرد سیستم فتوولتائیک و اجزای حیاتی آن را نشان می‌دهد [۸] ۳
- شکل ۱-۲: نمودار تفصیلی سیستم خورشیدی PV با فرآیندهای حرارتی [۷] ۴
- شکل ۱-۳: بیشترین روش‌های استفاده شده برای بهینه‌سازی تولید برق سیستم‌های PV [۱۴] ۴
- شکل ۱-۴: میکروکانال [۱۹] ۶
- شکل ۲-۱: شکل شماتیک سیستم آزمایشگاهی سوئی و همکاران [۲۵] ۹
- شکل ۲-۲: نمودار مختصات سینک حرارتی میکروکانال برای (الف) سینک حرارتی، (ب) میکروکانال مستقیم و (ج) میکروکانال موجدار [۲۶] ۱۰
- شکل ۲-۳: انواع ترتیب موانع بر روی سطح انتقال حرارت [۲۷] ۱۱
- شکل ۲-۴: نمودار مختصات (الف) سینک حرارتی میکروکانال موجدار و (ب) واحد دوره‌ای آن [۲۸] ۱۱
- شکل ۲-۵: سینک حرارتی میکروکانال با فن‌های مثلی [۲۹] ۱۲
- شکل ۲-۶: هندسه کانال‌های SRC و DRC [۳۰] ۱۳
- شکل ۲-۷: پارامترهای هندسی مانع‌های مستطیلی مایل RRS [۳۰] ۱۳
- شکل ۲-۸: ساختار سینک‌های حرارتی میکروکانال منقطع. (A) سینک حرارتی میکروکانال منقطع، (B) حوزه محاسباتی و (C) هندسه مانع‌ها [۳۱] ۱۴
- شکل ۲-۹: نمودار شماتیک و پارامترهای هندسی میکروکانال [۳۲] ۱۵
- شکل ۲-۱۰: مفهوم مانع‌ها و کانال‌های فرعی در سینک حرارتی میکروکانال [۳۲] ۱۵
- شکل ۲-۱۱: تنظیمات مختلف میکروکانال‌ها (از چپ به راست): حالت ۱: کانال مستطیل ساده؛ حالت ۲: مانع‌های استوانه‌ای با ارتفاع کاهشی در جهت جریان؛ حالت ۳: مانع‌های سیلندری با ارتفاع افزایشی در جهت جریان [۳۳] ۱۶
- شکل ۲-۱۲: نمودارهای سینک‌های حرارتی موجدار میکروکانال: (الف) طراحی موجدار چپ-راست؛ و (ب) طراحی موجدار بالا-پایین [۳۴] ۱۷
- شکل ۲-۱۳: نمودارهای سینک‌های حرارتی بهبودیافته: (الف) طرح بهبودیافته، (ب) واحد محاسباتی طرح بهبودیافته، (ج) واحد محاسباتی طرح لایه واحد با مانع‌های جامد، (د) واحد محاسباتی طرح لایه واحد با مانع‌های متخلخل، (ه) واحد محاسباتی طرح لایه دوگانه با مانع‌های جامد و (و) واحد محاسباتی طرح لایه دوگانه با مانع‌های متخلخل [۳۵] ۱۸
- شکل ۲-۱۴: نمایش شماتیک سینک حرارتی میکروکانال دو لایه با میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های متخلخل؛ الف حوزه‌های محاسباتی برای سینک‌های حرارتی میکروکانال دو لایه با میکروکانال‌ها و مانع‌های مختلف؛ ب میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های متخلخل؛ ج میکروکانال‌های راست و مانع‌های جامد؛ د میکروکانال‌های راست و مانع‌های متخلخل؛ ه میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های جامد [۳۶] ۱۹
- شکل ۲-۱۵: سیستم مختصات و ابعاد میکروکانال نوع شبیه‌فن حاضر (PR=0.25) [۳۷] ۲۰
- شکل ۲-۱۶: نمودار ساختار میکروکانال نوع شبیه‌فن: (الف) نقشه‌ی یک بعدی؛ (ب) نمودار ساختار سه‌بعدی [۳۸] ۲۰

- شکل ۱۷-۲: نمایش شماتیک از میکروکانال‌های موجدار [۳۹]. ۲۱
- شکل ۱۸-۲: جزئیات هندسه محاسباتی را نشان می‌دهد: A بلوک مس (CU BLOCK) که به صورت مارک دار با چند نوار از میکروکانال‌های موجدار استخراج شده است، B یک نوار تکی از میکروکانال موجدار - حوزه همپیوندی، C حوزه همپیوندی با شرایط مرزی [۳۹]. ۲۲
- شکل ۱۹-۲: شماتیک پیکربندی های مختلف فن [۴۰]. ۲۳
- شکل ۲۰-۲: مدل هندسی سینک حرارتی فن مورد مطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد: (الف) سینک حرارتی فن مستطیلی، (ب) سینک حرارتی فن چند سطحه کوتاه شده [۴۰]. ۲۴
- شکل ۲۱-۲: تنظیمات مختلف میکروکانال (الف) میکروکانال ساده، (ب) مورد ۱، (ج) مورد ۲، (د) مورد ۳، (ه) مورد ۴، (و) مورد ۵ [۴۸]. ۲۴
- شکل ۲۲-۲: توصیف شماتیک ۲ بعدی مربوط به نمایش فیزیکی [۴۲]. ۲۵
- شکل ۲۳-۲: نمودارهای شماتیک از سینک حرارتی میکروکانال دو لایه طراحی شده: (الف) سینک حرارتی میکروکانال دو لایه سنتی و (ب) سینک حرارتی میکروکانال دو لایه پیشنهادی [۴۳]. ۲۶
- شکل ۲۴-۲: هندسه (A) دوگانه موجدار، (B) موجدار و (C) راست [۴۴]. ۲۶
- شکل ۲۵-۲: نمای بالایی یک بخش از (الف) میکروکانال راست، (ب) موجدار حالت ۱، (ج) موجدار حالت ۲، (د) موجدار حالت ۳، (ه) موجدار حالت ۴ و (و) موجدار حالت ۵ [۴۵]. ۲۷
- شکل ۲۶-۲: نمودار شماتیک از کانال موجدار و شرایط مرزی مورد نظر [۴۵]. ۲۷
- شکل ۲۷-۲: نمایی از (الف) هیت سنک میکروکانال موجدار و (ب) دامنه محاسباتی [۴۶]. ۲۸
- شکل ۲۸-۲: ناحیه میکروکانال‌ها با پروفیل فیل و اندازه دیمپل ۱ میلی متر را نشان می‌دهد [۴۷]. ۲۹
- شکل ۲۹-۲: نمای شماتیک حرارت گیر میکروکانال زیگزآگ که از یک زیرلایه سیلیکونی در بالا و یک زیرلایه شیشه‌ای در پایین تشکیل شده است [۴۸]. ۳۰
- شکل ۳۰-۲: (A) نمای بالایی محل جایگذاری میکروکانال‌ها در پلاک. (B) هندسه ی آرایه ی میکروکانال‌ها [۴۹]. ۳۱
- شکل ۳۱-۲: سینک حرارتی میکروکانال موجدار و ساختار واحد [۵۰]. ۳۲
- شکل ۱-۳: کانال موجی انتخاب شده براساس پژوهش قربانی و همکاران [۴۵] با طول موج ۲۵۰۰ میکرومتر و دامنه موج ۲۵۰ میکرومتر ۳۶
- شکل ۲-۳: نمای سه بعدی موانع قرار گرفته در کانال در زاویه ۴۵ درجه ۳۸
- شکل ۳-۳: نمایش اندازه‌های دقیق مرتبط با موانع ۳۸
- شکل ۱-۴: شبکه سازمان یافته تولید شده جهت گسسته سازی دامنه محاسباتی ۴۲
- شکل ۲-۴: نمودار استقلال حل از شبکه. ۴۳
- شکل ۳-۴: نمایش دامنه محاسباتی و دیواره ریب‌دار طبق پژوهش لو و همکاران [۵۴]. ۴۴
- شکل ۴-۴: نمایش شبکه‌های تولید شده جهت اعتبارسنجی کانال صاف ریب‌دار ۴۴
- شکل ۵-۴: نمودار مقایسه نتایج عددی حاضر با نتایج پژوهش لو و همکاران [۵۴]. ۴۵

- شکل ۴-۶ (الف) توزیع سرعت در مقطع طولی در میان کانال ب) توزیع دما در مقطع مذکور برای حالت کانال صاف ریب‌دار ... ۴۵
- شکل ۴-۷ نمودار مقایسه نتایج جهت اعتبارسنجی ۴۷
- شکل ۴-۸ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۴۸
- شکل ۴-۹ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۴۹
- شکل ۴-۱۰ خطوط جریان در رژیم درهم در تعداد موانع مختلف ۴۹
- شکل ۴-۱۱ شکل گردابه در پشت مانع در الف- جریان آرام ب- در رژیم جریان درهم ۵۰
- شکل ۴-۱۲ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۶۰ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۱
- شکل ۴-۱۳ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۶۰ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۲
- شکل ۴-۱۴ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۷۵ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۳
- شکل ۴-۱۵ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۷۵ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۳
- شکل ۴-۱۶ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۹۰ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۴
- شکل ۴-۱۷ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۹۰ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۵
- شکل ۴-۱۸ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۶
- شکل ۴-۱۹ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۶۰ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۶
- شکل ۴-۲۰ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۷۵ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۷
- شکل ۴-۲۱ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۹۰ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۷
- شکل ۴-۲۲ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۸
- شکل ۴-۲۳ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۶۰ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۸
- شکل ۴-۲۴ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۷۵ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۹
- شکل ۴-۲۵ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۹۰ درجه در رینولدز ۵۰۰ ۵۹
- شکل ۴-۲۶ توزیع دما در کانال موجدار بدون مانع ۶۰
- شکل ۴-۲۷ توزیع سرعت در کانال موجدار بدون مانع ۶۰
- شکل ۴-۲۸ توزیع دما در حالت مانع با زاویه ۷۵ درجه، نسبت منظر ۰.۵ در رینولدز ۵۰۰ ۶۱
- شکل ۴-۲۹ توزیع سرعت در مقطع طولی میانی در حالت زاویه ریب ۷۵ درجه، نسبت منظر ۰.۵ و رینولدز ۵۰۰ ۶۱
- شکل ۴-۳۰ نمایش خطوط جریان و توزیع دما روی سطح مانع‌ها ۶۲

فهرست نمادها، و نشانه‌ها

F	نیرو بر حسب نیوتن (N)
A	مساحت بر حسب متر مربع (m^2)
Ac	سطح مقطع تصویر (m^2)
avg	متوسط
ch	کانال
C_p	ظرفیت حرارتی ویژه ($J / kg.K$)
D_h	قطر هیدرولیکی (m)
f	ضریب اصطکاک (-)
g	شتاب گرانش (m / s^2)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W / m^2 K$)
H	ارتفاع کانال (m)
L	طول کانال (m)
N	تعداد مانع (-)
Nu	عدد ناسلت (-)
P	فشار (pa)
PEC	ضریب عملکرد (-)
q''	شار حرارتی (W / m^2)
Q	دبی (m^3 / h)
Re	عدد رینولدز (-)
ref	حالت مرجع
T	دما (K)
u	سرعت در جهت x (m / s)
v	سرعت در جهت y (m / s)
w	سرعت در جهت z (m / s)
x	جهت مختصات (m)
y	جهت مختصات (m)
z	جهت مختصات (m)
μ	ویسکوزیته ($Pa.s$)
α	زاویه دهانه (-)
ρ	چگالی (kg / m^3)

فصل ۱

آشنایی با پژوهش

۱-۱ مقدمه

انرژی یک عنصر ضروری برای زندگی انسان در دنیای امروز است و در توسعه پایدار نقشی حیاتی ایفا می‌کند. بدون انرژی، امکان تأمین نیازهای خانه‌ها، کسب‌وکارها و صنایع، و همچنین اجرای سامانه‌های حمل‌ونقل و ارتباطی وجود نخواهد داشت. در سال ۲۰۱۵، مجمع عمومی سازمان ملل متحد اهداف توسعه پایدار را تصویب کرد تا یک چارچوب قدرتمند برای همکاری بین‌المللی در دستیابی به آینده‌ای پایدار برای سیاره ایجاد کند. اهداف توسعه پایدار که شامل ۱۷ هدف و ۱۶۹ توصیف‌کننده در قلب "برنامه ۲۰۳۰" قرار دارند، یک مسیر برای از بین بردن فقر بدیهی، مبارزه با نابرابری و بی‌عدالتی، و حفظ محیط زیست ارائه می‌دهند. یکی از اجزای کلیدی برای موفقیت برنامه ۲۰۳۰، انرژی پایدار است. تضمین دسترسی به خدمات انرژی قابل تأمین، قابل اعتماد و مدرن برای همه؛ افزایش قابل توجه در نسبت انرژی تجدیدپذیر در ترکیب انرژی جهانی؛ و دو برابر کردن نرخ بهبود جهانی در بهره‌وری انرژی [۱].

نیاز به داشتن تأمین انرژی پایدار، نیاز به بررسی منابع انرژی موجود را می‌طلبد و در بین این منابع، منابع تجدیدپذیر در رأس اولویت قرار دارند. اکنون حقیقت است که انرژی تجدیدپذیر به دلیل طبیعت بی‌نهایت و ویژگی‌های سازگار با محیط زیست، می‌تواند بخشی جدایی‌ناپذیر از توسعه پایدار باشد. منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توانند نقش مهمی در حل بحران انرژی در مناطق شهری بازی کنند. نیازهای انرژی‌مان تقریباً به طور کامل توسط منابع فسیلی حاوی کربن مانند نفت، زغال‌سنگ و گاز طبیعی رفع می‌شوند. استفاده سریع از این منابع فسیلی باعث آزادشدن سریع‌تر کربن مرتبط به صورت CO₂ می‌شود. افزایش غلظت CO₂ در جو برای طبیعت خطرناک بوده و منجر به گرمایش جهانی شده است. استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر بومی می‌تواند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی گران‌قیمت منجر شود [۲].

افزایش مداوم تقاضای انرژی برای مصارف صنعتی و خانگی منجر به افزایش علاقه به انرژی تجدیدپذیر به عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی شده است. استفاده سنتی از سوخت‌های فسیلی باعث نگرانی‌های جدی محیط زیستی شده است به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای به جو و باعث گرمایش جهانی و تغییرات آب‌وهوایی شده است. فناوری‌های مختلفی برای مقابله با

مشکلات انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی استفاده شده است. یکی از این فناوری‌ها استفاده از انرژی خورشیدی است از طریق استفاده از ماژول‌های فتوولتائیک که انرژی خورشیدی با طول‌موج کوتاه را جذب کرده و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند[۳].

انرژی خورشیدی یک منبع انرژی تجدیدپذیر بسیار حیاتی است که دی‌اکسیدکربن را تولید نمی‌کند و آلودگی را ایجاد نمی‌کند. خورشید مقدار زیادی انرژی تابان می‌کند که قادر است نیاز جهانی به انرژی را ۷۹۰۰ برابر برآورده کند. امکان تولید ۱۷۰۰ کیلووات‌ساعت برق از هر مترمربع از زمینی که به میزان کافی از نور خورشید به دست می‌آید وجود دارد[۴].

به‌طور کلی، عوامل متعددی مانند کاهش هزینه‌ها، پیشرفت‌های فناوری، تابش خورشید فراوان و استقلال آن، انرژی فتوولتائیک را به یکی از سریع‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان تبدیل کرده است. درحالی‌که سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و برق آبی نیز نقش مهمی در انتقال به اقتصاد کم‌کربن دارند، انرژی خورشیدی فتوولتائیک به دلیل قابلیت توسعه و ارزان‌تر شدن روزافزون، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین موجودیت‌ها ظاهر شده است.

۱-۲ تکنولوژی فتوولتائیک

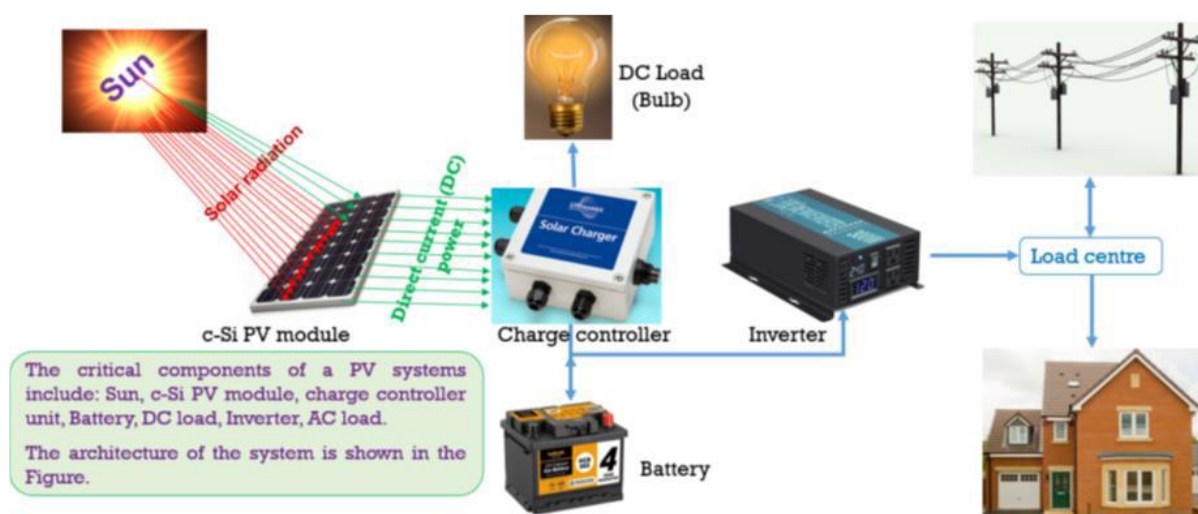
عبارت انرژی خورشیدی به انرژی ای اشاره دارد که مستقیماً از خورشید به دست می‌آید. هر روز، خورشید مقدار زیادی انرژی را به سطح زمین انتشار می‌دهد (به‌عنوان مثال، در یک ساعت، زمین ۱۷۲^{۰۰۰} تراوات‌ساعت انرژی از خورشید دریافت می‌کند) که اگر به‌درستی جمع‌آوری شود، بیش از حد کافی برای تأمین نیازهای انرژی جهان است.

نگرانی‌های روزافزون درباره تأثیرات محیط‌زیستی نگران‌کننده منابع انرژی سنتی، توجه را به توسعه سوخت‌های سبز و جایگزین جلب می‌کند. به دلیل ظرفیت بالای آن، در دسترسی جهانی و قابلیت استفاده رایگان، سیستم فتوولتائیک خورشیدی به‌عنوان یک روش برداشت انرژی خورشیدی، به‌عنوان منبع انرژی پاک، ترجیح داده می‌شود و به طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شود[۵].

سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی به‌عنوان یکی از منابع اصلی انرژی تجدیدپذیر برای کاهش انتشارات کربن در تأمین برق به اهمیت بالایی دست یافته‌اند[۶].

سلول‌های فتوولتائیک از مواد نیمه‌رسانا، به طور معمول سیلیکون، ساخته می‌شوند و دارای دو لایه هستند: لایه p-type که شامل نقاط مثبت بار است و لایه n-type که شامل الکترون‌های منفی بار است. وقتی فوتون‌های نور خورشید به سلول می‌رسند، توسط ماده نیمه‌رسانا جذب می‌شوند و از لایه p-type الکترون‌ها را به لایه n-type آزاد می‌کنند. این موجب ایجاد جریان الکترونی، یا جریان، می‌شود که می‌تواند توسط تماس‌های فلزی در بالا و پایین سلول ضبط شود.

ظرفیت نیروگاه برق فتوولتائیک برای تولید برق به عوامل مختلفی وابسته است، مانند مکان و ظرفیت نیروگاه، شرایط آب‌وهوایی، فناوری خورشیدی، زمان و شدت نور خورشید و کارایی سلول فتوولتائیک[۷].



شکل ۱-۱: اصول کارکرد سیستم فتوولتائیک و اجزای حیاتی آن را نشان می‌دهد [۸]

فتوولتائیک در حال حاضر یکی از سریع‌ترین بخش‌های رشد انرژی در جهان است. در طول ۲۰ سال گذشته، پیشرفت‌های در فناوری منجر به کاهش قابل توجه هزینه مازول‌های فتوولتائیک و سایر اجزا، افزایش کارایی و بهبود قابل توجه همچنین قابلیت اعتماد و بازده سیستم شده است که در نتیجه منجر به کاهش قیمت برق می‌شود.

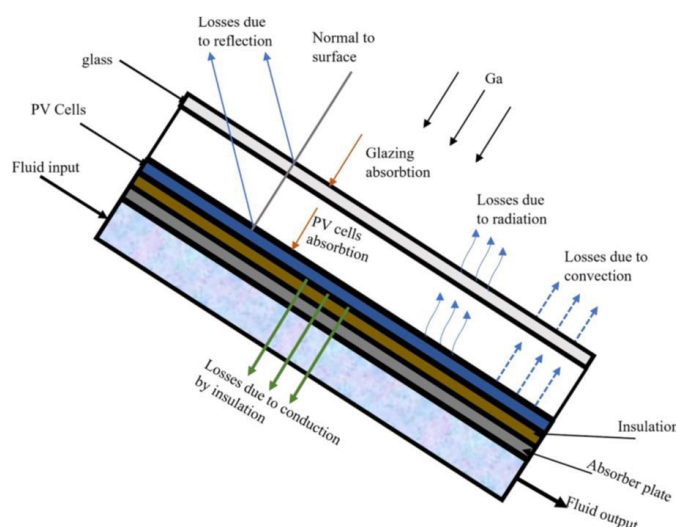
این به رشد سریع در ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های فتوولتائیک مرتبط است. ظرفیت فتوولتائیک نصب شده در سراسر جهان در سال ۲۰۱۹ بیش از ۶۳۵ گیگاوات - پیکووات (GWp) بود [۹].

اگرچه هزینه هر وات به طور چشمگیری در دهه گذشته کاهش یافته است، هزینه انرژی فتوولتائیک هنوز به طور قابل توجهی بیشتر از برق معمولی است.

۳-۱ تأثیر دما بر عملکرد پنل فتوولتائیک خورشیدی

ماژول‌های PV از آرایه‌هایی از سلول‌های خورشیدی تشکیل شده‌اند. عملکرد سلول‌های خورشیدی در اصل به دو پارامتر، تابش خورشیدی و دمای عملیاتی، وابسته است. هنگامی که تابش خورشیدی به سطح سلول خورشیدی برخورد می‌کند، یک مقدار جزئی از آن به برق تبدیل می‌شود درحالی‌که بخش باقی‌مانده به حرارت تبدیل شده و دمای سلول خورشیدی را افزایش می‌دهد [۱۰].

دمای بالا باعث کاهش کارایی تبدیل فوتوالکتریک سلول‌های خورشیدی می‌شود. بیش‌گرمی باعث کاهش عملکرد مازول PV به مقدار ۰.۲۵-۰.۵٪ C در مقایسه با دمای مشترک شده می‌شود و به آن ضریب دمایی توان گفته می‌شود [۱۱].

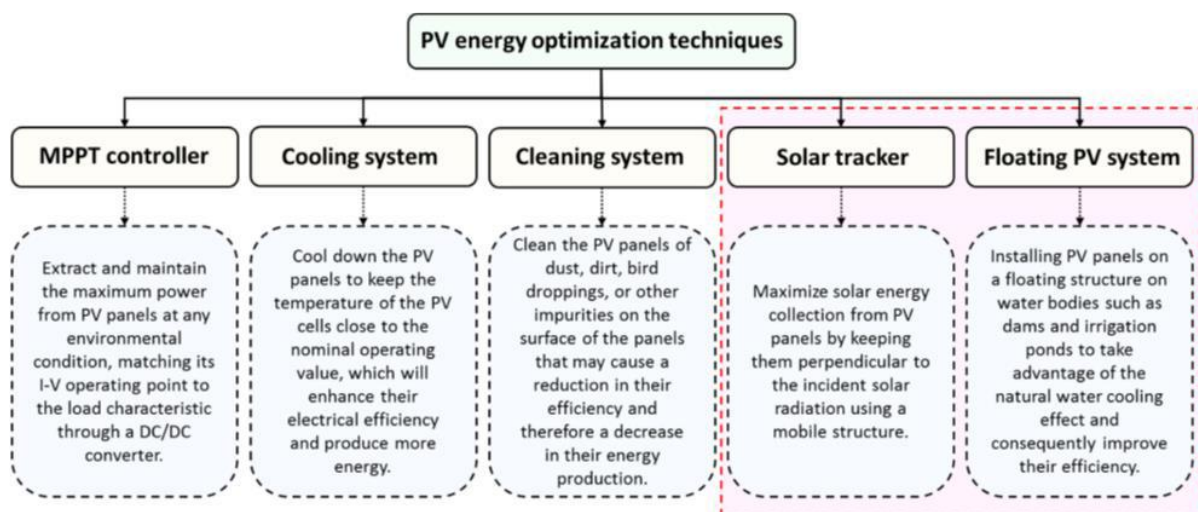


شکل ۲-۱: نمودار تفصیلی سیستم خورشیدی PV با فرآیندهای حرارتی [۷]

۴-۱ روش‌های سرمایش پنل‌های فتوولتائیک

کارایی سلول‌های خورشیدی سنتی، در بازه ۱۵-۲۵٪ قرار دارد. بقیه انرژی خورشیدی به حرارت تبدیل می‌شود که تأثیر مخربی بر تولید برق و عمر دستگاه‌های فتوولتائیک خواهد داشت؛ بنابراین، استفاده از سیستم‌های سرمایش برای تنظیم دمای عملیاتی آنها ضروری است [۱۲].

کارایی پنل PV با افزایش دما کاهش می‌یابد. روش‌های متعددی برای سرمایش پنل‌های PV استفاده می‌شود که می‌توان آنها را به دو دسته روش‌های فعال و غیرفعال تقسیم کرد [۱۳].



شکل ۳-۱: بیشترین روش‌های استفاده شده برای بهینه‌سازی تولید برق سیستم‌های PV [۱۴]

هدف اصلی تکنولوژی سرمایش سیستم‌های خورشیدی PV، به‌دست‌آوردن و تبدیل حرارت تولید شده از پرتوهای خورشید به انرژی قابل استفاده است. بهترین راه برای دستیابی به این هدف استفاده از سیستم‌های سرمایشی فعال یا غیرفعال است. سیستم‌های فعال انرژی خورشیدی از انواع مختلفی از تجهیزات مکانیکی و الکتریکی برای بهره‌برداری از انرژی خورشید استفاده

می‌کنند. این سیستم‌ها از پمپ‌ها، جمع‌آورنده‌ها، دمنده‌ها، کنترلرهای ولتاژ و پنل‌های فتوولتائیک برای پردازش حرارت دریافتی از خورشید استفاده می‌کنند. تکنولوژی سرمایش فعال همچنین می‌تواند از باتری‌ها برای ذخیره انرژی جذب شده برای استفاده در آینده مانند گرمایش ساختمان و تولید برق استفاده کند. در این روش، از دستگاه‌ها و تأثیرات خارجی برای بهره‌برداری از پتانسیل خورشید استفاده می‌شود. آن به طور کامل به خود و ترمودینامیک برای جمع‌آوری حرارت خورشیدی و تبدیل آن به برق وابسته است. سیستم انرژی خورشیدی غیرفعال برای سیستم‌های گرمایش و سرمایش، به‌ویژه در خانه‌های کوچک، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد. باین‌حال، این سیستم در مناطقی که آب‌وهوای آنها بارانی یا ابری است، به‌خوبی عمل نمی‌کند [۱۵].

به طور عمده، فناوری‌های سرمایش PV را می‌توان به سه گروه دسته‌بندی کرد:

۱- سرمایش غیرفعال (بدون نیاز به انرژی اضافی).

۲- سرمایش فعال (نیاز به انرژی اضافی دارد).

۳- ترکیبی از سرمایش فعال و غیرفعال.

این روش‌ها به طور جامع توسط غرضی و همکاران [۱۶] مورد مطالعه دقیق قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج آنها، ترکیبی از سرمایش فعال و غیرفعال بهترین روش از نظر حفظ کارایی الکتریکی PV و بهره‌برداری از انرژی حرارتی است.

استفاده از کانال‌های میکرو یک روش فعال برای سرمایش کارآمد پنل‌های فتوولتائیک است که محققان در آن تمرکز بر افزایش نرخ انتقال حرارت در این کانال‌ها دارند. برای دستیابی به این هدف، محققان در زمینه تغییر هندسه کانال‌های میکرو، بهبود کارایی سیال با نانوسیال‌ها و استفاده از سطوح گسترده بررسی‌هایی انجام داده‌اند.

۵-۱ میکروکانال

مفهوم تبادل حرارت در میکروکانال ابتدا توسط تاکرمن و پیس در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد و استفاده شد. تاکرمن و پیس از طریق استفاده از کانال‌های نسبت ارتفاع به عرض بالا، خنک‌کننده مایع بازیافتی با کارایی بالا را در دستگاه‌های الکتریکی معرفی کردند. این پژوهش زمینه را برای پژوهش‌های بیشتر درباره رادیاتورهای حرارتی میکروکانال فراهم کرد. پس از آن، محققان بسیاری بر روی بهبود عملکرد حرارتی در رادیاتورهای میکروکانال تمرکز کردند. هر دو رژیم جریان لایه‌ای و آشسته برای سیستم‌های کانال‌های عمیق مورد بررسی قرار گرفتند [۱۷]. هدف اولیه تعیین بهترین راه برای بهینه‌سازی میانگین دما، افت فشار، ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت بود. ویژگی‌های طراحی شده، از جمله شکل مقطع، الگو، شکل سرصفحه و پورت‌های ورودی/خروجی، از موثرترین پارامترها در بررسی‌ها بودند [۱۸].



شکل ۴-۱: میکروکانال [۱۹]

افزایش تقاضا برای انرژی در محیط مدرن، نیازمند توسعه دستگاه‌های حرارتی با انتقال حرارت با کارایی بالا شده است. به دلیل کارایی بالای انتقال حرارت، رادیاتور میکروکانال (MCHS) به طرز فزاینده‌ای در صنایع مختلف محبوب شده است. برای بهبود عملکرد MCHS، مطالعات گسترده‌ای با استفاده از روش‌های فعال و غیرفعال انجام شده است. روش فعال نیاز به انرژی اضافی دارد درحالی‌که روش غیرفعال کارآمدتر است و نیاز به انرژی اضافی ندارد [۲۰].

تحقیقات گسترده‌ای در حدود سی سال در خصوص استفاده از رادیاتورهای میکروکانال برای مدیریت حرارت در دستگاه‌های الکترونیکی و نوری صورت گرفته است. این رادیاتورها برای از بین بردن حرارت از دستگاه‌هایی مانند مدارهای یکپارچه با استفاده از نسبت سطح به حجم بالا و بهره‌گیری از تکنیک‌های افزایش سطح، پتانسیل قدرتمندی دارند. رادیاتورهای میکروکانال به طور معمول با میردهای مایع استفاده می‌شوند که ضرایب انتقال حرارت بالاتری نسبت به میردهای گازی دارند. فرایند از بین بردن حرارت از سطح از طریق جریان مایع تک‌فاز یا جریان دوفازی جوشش که در آن میرد تغییر فاز می‌کند، رخ می‌دهد. رادیاتورهای میکروکانال ویژگی‌های منحصربه‌فردی از جمله مقیاس‌های کوچک، زیرساخت هادی، تنگش/توسعه ناگهانی در ورودی/خروجی و افت فشار بالا دارند. این ویژگی‌ها شرایطی را ایجاد می‌کنند که به طرز چشمگیری از شرایط موجود در کانال‌های معمولی متفاوت است [۲۱].

ویژگی بحرانی رادیاتورهای میکروکانال، توانایی یکپارچه‌سازی عملکرد انتقال حرارت مؤثر را شامل می‌شود، از جمله نسبت سطح به حجم بالا، ضریب انتقال حرارت همرفتی قابل توجه، جرم و حجم کم و موجودی کوچک میرد [۲۲].

مطالعه تجربی اسپارو و کومب درباره استفاده از دیواره‌های موجدار به عنوان یک بررسی اولیه در رویکرد غیرفعال برای محققان مورد توجه قرار می‌گیرد که شامل پیاده‌سازی یک کانال موجدار می‌شود. کانال‌های موجدار با افزایش مساحت تماس بین رابط‌های، حفظ شرایط یکنواخت دمای دیوار و افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی همراه هستند. استفاده از میکروکانال‌ها در

برنامه‌های انتقال حرارت به دلیل نسبت سطح به حجم بالا که امکان انتقال حرارت کارآمدتر را می‌دهد، به طور فزاینده‌ای محبوب شده است. یک راه برای بهبود بیشتر انتقال حرارت در میکروکانال‌ها، استفاده از موانع و فن‌ها یا خروجی‌ها در دیواره‌های کانال است. صفحات توسعه‌یافته یا سطوح گسترده برای افزایش پخش حرارت در قرن گذشته کشف شدند. رشته‌های مهندسی مختلف با استفاده از سطوح گسترده در برنامه‌های متنوعی مانند دستگاه‌های الکتریکی و الکترونیکی، تهویه هوا، یخچال، حرارت فرایندی و فرایندهای کریوژنیک مشغول به کار هستند. از طریق صفحات یا سطوح گسترده، پخش حرارت به طرز قابل توجهی کارایی سرمایشی را افزایش می‌دهد با ایجاد سطح اضافی برای انتقال حرارت [۲۳].

استفاده از موانع می‌تواند با افزایش آشفتگی و ایجاد گرداب‌ها در سیال، انتقال حرارت را تقویت کند و ضخامت لایه مرزی را کاهش دهد. این باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و بهبود عملکرد حرارتی می‌شود. موانع همچنین می‌توانند استحکام مکانیکی دیواره‌های میکروکانال را افزایش داده و جلوی تغییر شکل ناشی از تنش‌های حرارتی را بگیرند. به‌طور کلی، استفاده از موانع در میکروکانال‌ها راهکاری امیدبخش برای بهبود انتقال حرارت در برنامه‌های مختلف مانند سرمایش الکترونیکی، میکروراکتورها و مبدل‌های حرارتی میکرو می‌باشد.

در سال‌های اخیر، مطالعاتی درباره رادباتورهای صفحه‌ای به‌عنوان یک مکانیزم سرمایشی، توجه قابل توجهی به مقابله با مسئله بیش‌گرم شدن ماژول‌های PV به خود جلب کرده است. در این راستا، بیش‌گرم شدن ماژول‌های PV بر کارایی تبدیل الکتریکی سیستم در عملکرد مداوم و در شدت تابش خورشید بالا، تأثیر قابل توجهی دارد [۲۴].

این پژوهش هدف دارد تا انتقال حرارت در یک کانال مایکروکانال با دیواره‌های موجدار که شامل موانع با شکل V برای سرمایش ماژول‌های PV است، مورد بررسی قرار گیرد. به طور خاص، این مطالعه تأثیر موانع با طول‌موج‌ها و بزرگی موج‌های کانال موجدار را بر انتقال حرارت ارزیابی خواهد کرد، با انتخاب قسمتی از میکروکانال با دیواره‌های موجدار و قراردادن آنها در جهت محوری موانع با شکل V در داخل کانال. درج این موانع می‌تواند جریان فرعی ایجاد کند و انتقال حرارت از دیواره‌ها را افزایش دهد. استفاده از موانع در میکروکانال‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی انتقال حرارت را بهبود بخشد. موانع مساحت سطح کانال را افزایش می‌دهند، که منجر به بیشترین تماس بین سیال و دیواره‌های کانال می‌شود و این مسئله انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، موانع می‌توانند آشفتگی در سیال را ترویج داده و باعث فرایند انتقال حرارت کارآمدتری شوند. موانع همچنین تحریکی در جریان سیال ایجاد می‌کنند که باعث می‌شود سیال به طور مؤثرتری مخلوط شود و در نتیجه لایه مرزی حرارتی کاهش یابد و ضریب انتقال حرارت افزایش یابد. این تأثیر با تغییر اندازه، شکل و جهت موانع برای بهینه‌سازی الگوهای جریان و آشفتگی می‌تواند بهبود یابد. علاوه بر این، استفاده از موانع می‌تواند به کاهش مشکل عدم توزیع جریان در میکروکانال‌ها کمک کند که می‌تواند منجر به نقاط داغ محلی و کاهش کارایی انتقال حرارت شود. با توزیع یکنواخت‌تر جریان در کانال، موانع می‌توانند به جلوگیری از چنین مشکلاتی کمک کرده و عملکرد کلی انتقال حرارت را بهبود بخشند.

به‌طور کلی، استفاده از موانع در میکروکانال‌ها یک رویکرد امیدبخش برای بهبود انتقال حرارت در گستره‌ای از برنامه‌ها، از جمله سرمایش الکترونیکی، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و میکرو راکتورها می‌باشد.

فصل ۲

پیشینه‌ی پژوهش

۱-۲ مقدمه

کانال‌های میکرو در بین پژوهشگران حوزه‌های سردکنندگی و مدیریت حرارت، توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده‌اند. کوچک‌شدن و ادغام انواع دستگاه‌ها مانند الکترونیک، سیستم‌های قدرت و لیزرها، منجر به افزایش تولید حرارت و نیاز به تکنیک‌های سردکنندگی مؤثر گشته است. کانال‌های میکرو در این خصوص چندین مزیت را ارائه می‌دهند که شامل قابلیت‌های بهبود یافته انتقال حرارت و کم‌حجمی می‌شود.

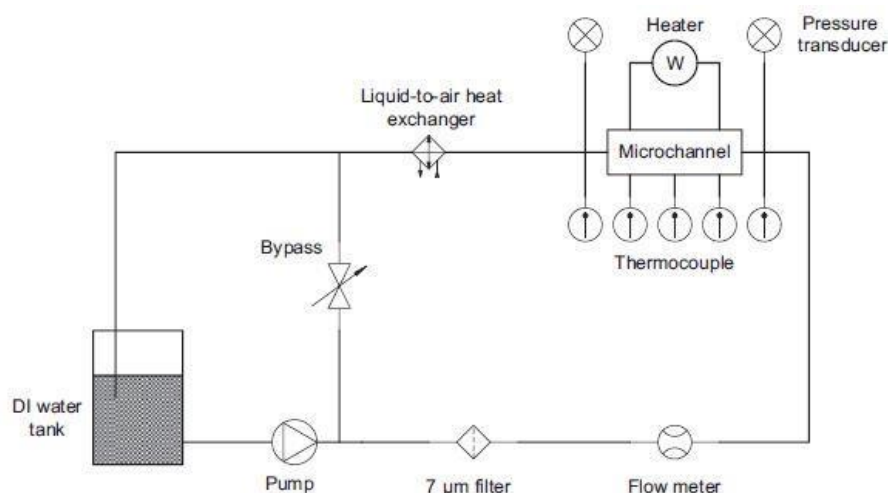
در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای درباره سیستم‌های سردکنندگی مبتنی بر کانال‌های میکرو به دلیل قابلیت‌های بالقوه‌ی آن‌ها برای انتقال بهینه‌ی حرارت انجام شده است. این سیستم‌ها معمولاً از استفاده از کانال‌های باریک با قطر هیدرولیکی میان ده تا صد میکرومتر تشکیل شده‌اند. ابعاد کوچک کانال‌ها باعث می‌شود نسبت مساحت سطح به حجم بالا باشد که انتقال حرارت به‌طور مؤثر را ترویج می‌دهد. پژوهشگران برخی از جنبه‌های مختلف کانال‌های میکرو در حوزه‌های سردکنندگی و مدیریت حرارت، از جمله ویژگی‌های جریان سیال و انتقال حرارت، بهینه‌سازی هندسه کانال‌ها، تکنیک‌های بهبودی مانند تغییرات سطح و افزودنی‌ها، و توسعه فرآیندهای پیشرفته برای ساخت کانال‌های میکرو، مورد بررسی قرار داده‌اند. علاوه بر این، کانال‌های میکرو در حوزه‌های مختلفی مانند سردکنندگی الکترونیک، میکروالکترونیک، الکترونیک قدرت، میکروالکترونیک نوری، سلول‌های سوختی و مدیریت حرارت دستگاه‌های با توان بالا کاربرد داشته‌اند.

توانایی دستیابی به نرخ‌های انتقال حرارت بالا و یکنواختی دما در کانال‌های میکرو، آن‌ها را برای انتقال حرارت از نقاط داغ محلی در دستگاه‌های کوچک جذاب می‌کند. به طور کلی، علاقه به کانال‌های میکرو برای سردکنندگی و مدیریت حرارت همچنان بالاست، زیرا پژوهشگران همچنان به تجدیدنظر در طرح‌ها، مواد و تکنیک‌های نوآورانه برای بهبود انتقال حرارت و مقابله با چالش‌های حرارتی مرتبط با فناوری‌های نوظهور می‌پردازند.

در زیر، برخی از پژوهش‌ها و مراجعی آورده شده‌اند که به بهبود انتقال حرارت و فرایندهای سردکنندگی با استفاده از کانال‌های میکرو می‌پرداخته‌اند.

۲-۲ مروری بر ادبیات

سوئی و همکاران (۲۰۱۱) [۲۵] یک مطالعه تجربی را برای بررسی خواص اصطکاک جریان و انتقال حرارت در میکروکانال‌های مقطع مستطیلی و سینوسی انجام دادند. شکل ۱-۲ نمودار مختصات مجسمی نصب آزمایشی را نشان می‌دهد که شباهت زیادی به تنظیمات مورد استفاده در تحقیقات قبلی درباره بررسی انتقال حرارت در کانال‌های میکرو مستقیم با مقاطع مستطیلی دارد.

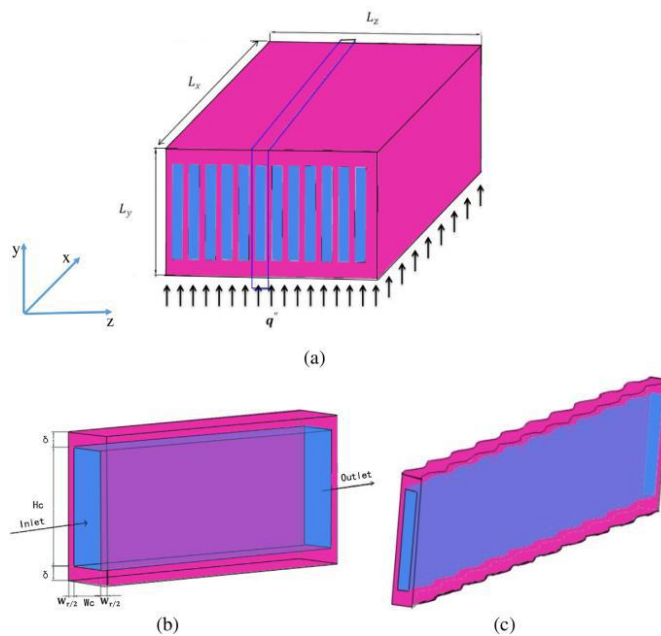


شکل ۱-۲: شکل شماتیک سیستم آزمایشگاهی سوئی و همکاران [۲۵].

در این مطالعه، هنگام مقایسه کانال‌های میکروی موجدار با کانال‌های مستقیم، مشاهده می‌شود که هر دو بهبود انتقال حرارت و جریان فشار تحت تأثیر عدد رینولدز جریان و اندازه امواج قرار دارند. در کل دامنه کامل از اعداد رینولدز و امواج مورد بررسی، افزایش انتقال حرارت به ثابت برتری جریان فشار همراه است و به طور مداوم متوسط تا بسیار بیشتر از جریان فشار همراه با افزایش می‌شود. به عنوان مثال، در عدد رینولدز ۸۰۰ و امواج با اندازه ۱۳۸ میلی‌متر، ضریب اصطکاک ۴۱٪ افزایش می‌یابد، در حالی که ضریب انتقال حرارت یک افزایش چشم‌گیر برابر با ۱۴۹٪ را تجربه می‌کند. علاوه بر این، هنگامی که اندازه امواج به ۲۵۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد، ضریب اصطکاک و ضریب بهبود انتقال حرارت به ترتیب به ۷۶٪ و ۲۱۱٪ افزایش می‌یابند. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که کانال‌های میکروی موجدار نسبت به کانال‌های مستقیم با مقاطع مشابه و طول کل یکسان، عملکرد انتقال حرارت به طور قابل توجهی بالاتری دارند. علاوه بر این، میزان جریان فشار همراه با افزایش انتقال حرارت در کانال‌های میکروموج، به مقداری بسیار کمتر از بهبود انتقال حرارت مرتبط است. نتایج مطالعه تجربی با این مشاهدات سازگار هستند و تأیید می‌کنند که سینک حرارتی کانال‌های میکرو با لوله‌های موجدار، از نظر عملکرد انتقال حرارت بهتر از آن‌هایی هستند که از کانال‌های میکروی مستقیم تشکیل شده‌اند [۲۵].

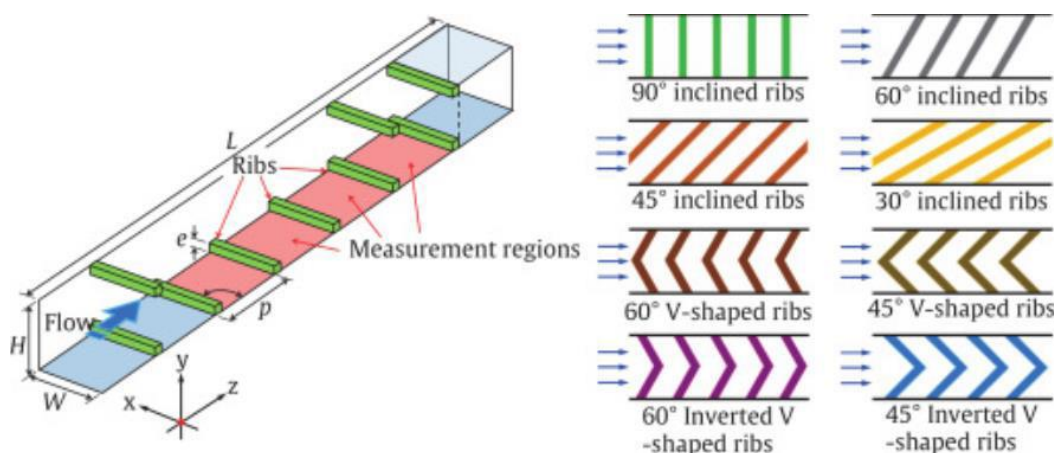
ژو و همکاران (۲۰۱۶) [۲۶] ساختار میکروکانال موجدار با شکل سینوسی برای سینک حرارتی کامپکت دستگاه‌های الکترونیکی مانند ترانزیستورهای دوقطبی با دروازه ایزوله‌شده را مورد مطالعه قرار دادند. با ترکیب روش حجم محدود، پارامتر هندسی دیوار موجدار، به عنوان عامل کلیدی برای بهبود کارایی انتقال حرارت، با استفاده از روش‌شناسی نوین سطح پاسخ بهینه‌سازی شده است که به عنوان یک روش کارآمد و دقیق شناخته می‌شود. برای مقایسه ابعاد هندسی یک میکروکانال مستقیم از کانالی که به خوبی طراحی شده است که در ادبیات توضیح داده شده است (شکل ۲-۲a). برای حفظ منابع محاسباتی، تنها یک میکروکانال

مستقیم به عنوان حوزه محاسباتی انتخاب می‌شود، همانطور که در شکل ۲-۲b نشان داده شده است. عملکرد کانال‌های موج‌دار با هندسه‌های مختلف با مقایسه آن‌ها با یک هیت سینک مستقیم میکروکانالی، که به عنوان معیار عمل می‌کند، ارزیابی می‌شود. در این مطالعه، همانطور که در شکل ۲-۲c نشان داده شده است، در ابتدا یک هیت سینک موج‌دار تک لایه در مقایسه با یک میکروکانال مستقیم مستطیلی به عنوان یک طراحی پیشرفته در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۲: نمودار مختصات سینک حرارتی میکروکانال برای (الف) سینک حرارتی، (ب) میکروکانال مستقیم و (ج) میکروکانال موج‌دار [۲۶].

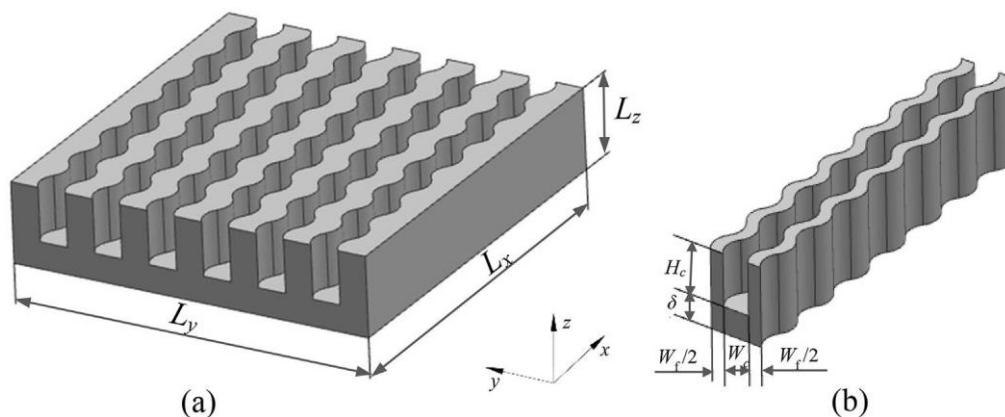
با توجه به نتایج، کانال موجی تقویت‌شده در مقایسه با کانال مستقیم معمولی، حداکثر بهبود انتقال حرارت را ۲.۸ برابر نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) نشان می‌دهد که وجود گرداب‌ها و تلاطم آن‌ها به نازک شدن لایه مرزی کمک می‌کند و در نتیجه انتقال حرارت مؤثرتر انجام می‌شود. این نتایج برای طراحی مبدل حرارتی فشرده اهمیت عملی دارند و روش بهینه‌سازی پیشنهادی کاربرد وسیعی در افزایش بازده زمانی انتقال حرارت در پیکربندی‌های نامنظم دارد. کائوچوتانگ و همکاران (۲۰۱۷) [۲۷] اثر آرایش مانع را بر توزیع ضریب انتقال حرارت محلی در یک کانال ثابت به عنوان هدف اصلی تحقیق مورد مطالعه قرار دادند. از مانع‌هایی با مقطع مربع برای قرار دادن آن‌ها بر روی دو دیوار جانبی به منظور مطالعه استفاده شد. سه نوع مانع مختلف برای مانع‌های مورب، مانع‌های V-شکل و مانع‌های V معکوس بررسی شدند. زاویه دهانه (α) از ۳۰ درجه تا ۹۰ درجه برای مانع‌های مورب و ۴۵ درجه و ۶۰ درجه برای هر دو شکل V-شکل و مانع‌های V معکوس، و آن را با عدد ثابت رینولدز $Re = 30000$ مقایسه کنید. تمرکز اصلی این مطالعه بررسی گسترده این است که چگونه دیوارهایی با مانع‌های ناهموار بر رفتار جریان و توزیع گرما در یک کانال مربعی که در آن مانع‌ها به دیواره‌های مقابل متصل هستند، تأثیر می‌گذارند. شکل ۲-۳ آرایش خاص مانع‌های مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد. این مطالعه هشت زاویه مورب مختلف (α) از مانع‌ها را بررسی می‌کند: ۳۰ درجه، ۴۵ درجه، ۶۰ درجه، ۹۰ درجه، ۴۵ درجه V-شکل، و ۶۰ درجه مانع‌های V-شکل معکوس.



شکل ۲-۳: انواع ترتیب موانع بر روی سطح انتقال حرارت [۲۷].

این مطالعه، نتایج نشان داد که میانگین عدد نوسلت بر روی سطح‌ها با زوایای مورب موانع‌ها به اندازه‌های ۶۰ درجه، ۴۵ درجه و موانع‌های به شکل V به اندازه ۶۰ درجه، به مقدار تقریباً ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ افزایش می‌یابد که به ترتیب بالاتر از مورد زاویه ۹۰ درجه است و زاویه مورب موانع‌ها به شکل V به اندازه ۶۰ درجه بالاترین عدد نوسلت و پوشش بزرگ‌ترین مساحت را نسبت به سایر موارد ارائه می‌دهد. نتایج حاصله از این مطالعه می‌توانند در طراحی موانع‌های شکسته برای بهبود انتقال حرارت در کارهای آتی مورد استفاده قرار گیرند.

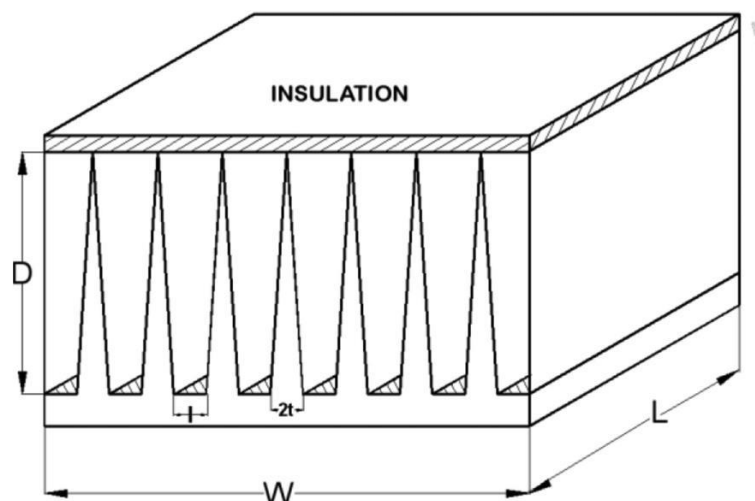
لین و همکاران (۲۰۱۷) [۲۸] طراحی بهبودیافته‌ای از سینک حرارتی میکروکانال موجدار با تغییر طول موج و دامنه آن در طول جهت جریان پیشنهاد شده است. مقاومت حرارتی R و بیشینه‌ترین تفاوت دمای دیوار پایین $\max b, \max$ برای طراحی جدید با استفاده از توان پمپ‌کننده ثابت با طراحی‌های مستقیم و موجدار اصلی مقایسه می‌شود. سینک حرارتی میکروکانال (شکل ۲-۴ الف)) مورد مطالعه در اینجا از ۵۰ کانال و ۵۰ موانع با مقاطع مستطیلی تشکیل شده است. با توجه به تقارن هندسی، فقط یک واحد به عنوان دامنه محاسباتی مدل‌سازی شده است، که شامل یک کانال و دو نیم‌پره عمودی است (شکل ۲-۴ ب)).



شکل ۲-۴: نمودار مختصات (الف) سینک حرارتی میکروکانال موجدار و (ب) واحد دوره‌ای آن [۲۸]

صورت متساوی بر روی دیوار پایین را نسبت به هر دو طراحی مستقیم و موجدار اصلی نشان می‌دهد. این نتایج شواهد دیگری از کارایی طراحی جدید در ارتفاع‌ها و عرض‌های کانال‌های مختلف ارائه می‌دهد. به علاوه، وقتی عرض کانال ثابت باقی‌ماند، بهبود

عملکرد در طراحی جدید بخصوص برای ارتفاع‌های کانال کوچک به‌طور قابل توجهی است. در مقابل، وقتی ارتفاع کانال ثابت است، بهبود در اندازه‌های بزرگتر کانال به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که برای سینک‌های حرارتی با نسبت‌های ارتفاع کانال کوچک‌تر، توصیه می‌شود از طراحی موجدار با طول موج کاهش‌یافته در جهت جریان استفاده شود. روی و کوندو (۲۰۱۸) [۲۹] در این تحقیق ابعاد بهینه یک سینک حرارتی را طوری به دست آوردند که مقاومت حرارتی بین سیال و سینک حرارتی را کمینه کند. نتایج به‌دست‌آمده سپس با نتایج فن‌های مستطیلی مقایسه می‌شود. در این مطالعه کنونی، یک سینک حرارتی مثلثی به‌طور خاص برای خنک‌کردن مدارها توسعه داده شده است. این سینک حرارتی از سیلیکون به عنوان زیرپایه استفاده می‌کند و نسبت ضخامت فن به عرض کانال برابر با یک باقی می‌ماند. شکل ۲-۵ یک نمودار از یک سینک حرارتی میکروکانال با فن‌های مثلثی را نمایش می‌دهد. این سینک حرارتی شامل یک پلیت پایه مستطیلی صاف است که در یک دمای ثابت نگهداری می‌شود. علاوه بر این، شامل یک سری از فن‌های مثلثی و کانال‌ها می‌باشد.

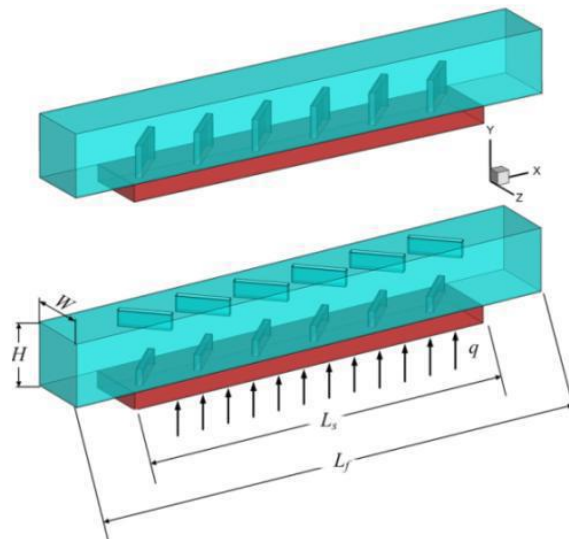


شکل ۲-۵: سینک حرارتی میکروکانال با فن‌های مثلثی [۲۹].

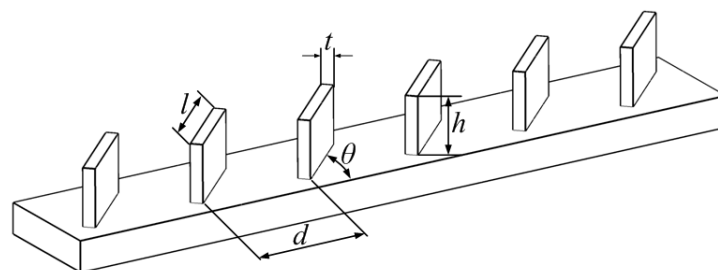
فن‌های مثلثی در طول مطالعه با بازده ثابت ۹۲ درصد حفظ شد، در حالی که عدد پراوندتل به‌طور ثابت در ۳.۷۷ باقی ماند. سپس نتایج به‌دست‌آمده با نتایج فن‌های مستطیلی مقایسه شد.

نتایج بدیهی است که سینک حرارتی مثلثی به مقدار کمتری از مواد بستر در مقایسه با فن‌های مستطیلی نیاز دارد. به علاوه، نرخ انتقال حرارت در هر واحد حجم تقریباً دو برابر می‌شود هنگام استفاده از سینک‌های حرارتی مثلثی. علاوه بر این، کارایی فن‌های مثلثی از فن‌های مستطیلی فوق‌است. بنابراین، سینک حرارتی مثلثی توانایی انتقال مقادیر قابل توجهی از حرارت را با تجربه افت دما به نسبت کمتر برای همان حجم فن ارائه می‌دهد. به عنوان یک جایگزین، سینک حرارتی مثلثی در مقایسه با سینک‌های حرارتی مستطیلی می‌تواند در خنک‌کردن مدارهای VLSI بسیار سریع و با سرعت بالا به صورت اقتصادی‌تر مدنظر قرار گیرد. ونگ و همکاران (۲۰۱۸) [۳۰] نشان دادند ترتیب موانع‌های مستطیلی مایل در یک میکروکانال می‌تواند با ایجاد اختلال در جریان، وقفه در لایه مرزی و افزایش مساحت انتقال حرارت، کارایی انتقال حرارت را بهبود بخشد. به‌منظور درک مکانیسم این بهبود، آنها شبیه‌سازی‌های عددی در جریان و انتقال حرارت درون میکروکانال با موانع‌های مستطیلی مایل تک‌ردیفه و دو‌ردیفه را انجام دادند. این شبیه‌سازی‌ها محدوده‌ای از اعداد رینولدز از ۶۲.۵ تا ۶۲۵ را پوشش می‌دهند.

دو سینک حرارتی میکروکانال برای بررسی عددی با پیکربندی‌های مانع مختلف ساخته شد. طرح اول که کانال مانع تک ردیفی نامیده می‌شود، فقط بر روی دیوار پایینی، مانع‌های شیبدار مستطیلی را نشان می‌داد. طرح دوم که به عنوان کانال مانع دو ردیفه شناخته می‌شود، دارای مانع‌های مستطیلی مایل در هر دو دیوار پایین و بالایی است (شکل ۶-۲). توجه به این نکته حائز اهمیت است که ضخامت دیواره‌های بالا و جانبی نادیده گرفته شده و در شکل ۶-۲ و شکل ۷-۲ نشان داده نشده است زیرا شار حرارتی $q = 0$ دارند.



شکل ۶-۲: هندسه کانال‌های SRC و DRC [۳۰]



شکل ۷-۲: پارامترهای هندسی مانع‌های مستطیلی مایل RRs [۳۰]

شکل ۷-۲ پارامترهای هندسی اضلاع مستطیلی مایل را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ارتفاع مانع در کانال مانع دو ردیفه نصف ارتفاع مانع در کانال دنده تک ردیفه است.

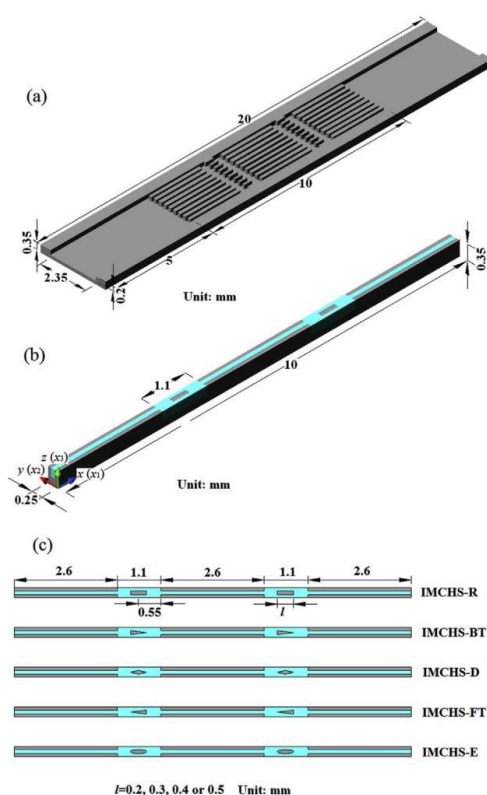
نتایج عددی نشان‌دهنده تغییر زیادی در الگوی جریان سینک‌های حرارتی میکروکانالی مجهز به مانع‌های مستطیلی شیبدار تک ردیفی و دو ردیفه است. ضرایب مانع‌های مستطیلی شیبدار تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت در شرایط مختلف نشان می‌دهد. توزیع جریان‌ها نقش حیاتی در افزایش انتقال حرارت دارد.

چای و ونگ (۲۰۱۸) [۳۱] عملکرد ترمو-هیدرولیک سینک‌های حرارتی میکروکانالی با محفظه‌های مقطع را بررسی کردند؛ یا حل همزمان هدایت و جابجایی سه بعدی. عوامل مختلفی مانند اثر ورودی، گرمای لغزشی و خواص فیزیکی حرارتی وابسته به دما مد نظر قرار می‌گیرند. تأثیر هندسه مانع‌ها بر عملکرد حرارتی-هیدرولیکی با مد نظر گرفتن از پنج پیکربندی مانع‌های

مختلف (مستطیلی، مثلثی به عقب، الماسی، مثلثی به جلو و بیضوی) و چهار طول مختلف در جهت جریان برای هر پیکربندی موانع مورد تحلیل قرار می‌گیرد. پارامترهای هندسه موانع شامل پروفیل انبساط-تنگ‌شدگی، نسبت و طول هستند.

شکل ۸-۲ هیت سینک های میکرو با محفظه های عرضی با موانع های مستطیلی را نشان می دهد. یک حجم کنترلی شامل یک کانال کوچک و یک پایه جامد که آن را احاطه کرده است، برای ایجاد یک مدل جریان سیال و انتقال حرارت انتخاب شده است، همانطور که در شکل ۸-۲ ب نشان داده شده است.

به منظور بررسی تأثیر هندسه موانع بر عملکرد ترمو هیدرولیک، پنج پیکربندی موانع متمایز (مستطیل، مثلث عقب، الماس، مثلث رو به جلو و بیضوی)، همانطور که در شکل نشان داده شده است. شکل ۸-۲ ج.

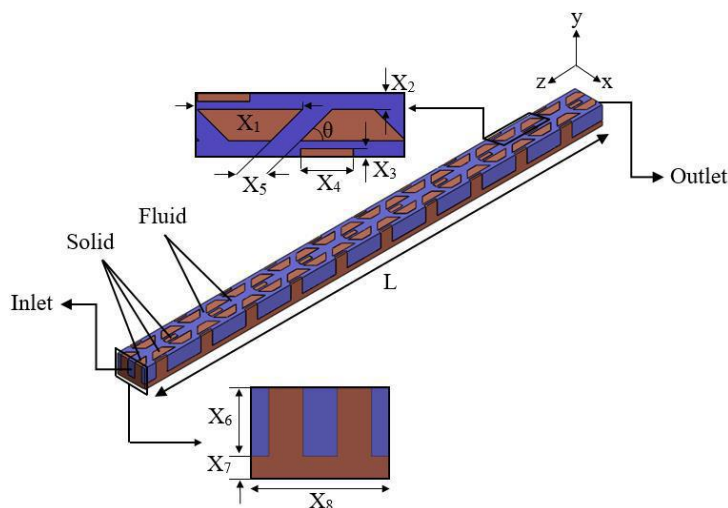


شکل ۸-۲: ساختار سینک‌های حرارتی میکروکانال منقطع. (a) سینک حرارتی میکروکانال منقطع، (b) حوزه محاسباتی و (c) هندسه موانع [۳۱].

در نتیجه این تحقیق، هیت سینک های میکروکانال مقطع با موانع ها در محفظه های مقطعی، کاهش ۴-۳۱٪ در مقاومت حرارتی کل و ۴-۲۶٪ کاهش در نرخ تولید آنتروپی کل را در مقایسه با یک میکرو مستقیم نشان می دهند. هیت سینک کانالی علاوه بر این، معیارهای ارزیابی عملکرد در این زمینه به حداکثر مقدار ۱.۳۹ می رسد.

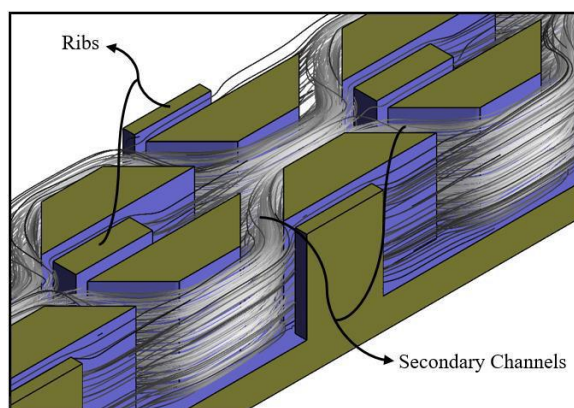
بهیروانی و همکاران (۲۰۱۹) [۳۲] به ارزیابی ویژگی‌های حرارتی-هیدرولیکی یک نانوسیال هیبریدی شامل نانوذرات گرافن-نقره درون یک سینک حرارتی میکروکانالی با موانع ها و کانال‌های فرعی پرداختند. به‌علاوه از افزایش سطح انتقال حرارت، موانع‌ها نقش کلیدی در هدایت جریان به سمت کانال‌های فرعی و ترویج مخلوط جریان بازی می‌کنند. به‌طور همزمان، کانال‌های فرعی منطقه جریان را گسترش می‌دهند و از کاهش فشار ناشی از حضور ریب‌ها در جریان می‌اندازند.

در شکل ۹-۲، سینک حرارتی میکروکانال مورد مطالعه نشان داده شده است که نشان‌دهنده پیاده‌سازی موانع و کانال‌های فرعی برای بهبود عملکرد خنک‌کنندگی آن است. جریان حرارتی از سطح پایینی سینک حرارتی وارد شده و مس به عنوان ماده استفاده شده است. با مخلوط کردن لایه مرزی حرارتی، موانع ها به بهبود نرخ انتقال حرارت کمک می‌کنند.



شکل ۹-۲: نمودار شماتیک و پارامترهای هندسی میکروکانال [۳۲].

همانطور که در شکل ۹-۲ و شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است، دیواره‌های میانی سینک حرارتی میکروکانال حاوی کانال‌های فرعی مورب هستند. این کانال‌ها نقش کلیدی در هدایت جریان به سمت خود پس از مواجهه با موانع ایفا می‌کنند و همچنین موجب مخلوط کردن موثر با مناطق مجاور می‌شوند. به‌طور ویژه، ریب‌ها نه تنها جریان را به سمت کانال‌های فرعی هدایت می‌کنند بلکه به گسترش سطح انتقال حرارت هم کمک می‌کنند. علاوه بر این، حضور کانال‌های فرعی منطقه جریان را افزایش می‌دهد که منجر به کاهش فشار ناشی از موانع ها می‌شود.



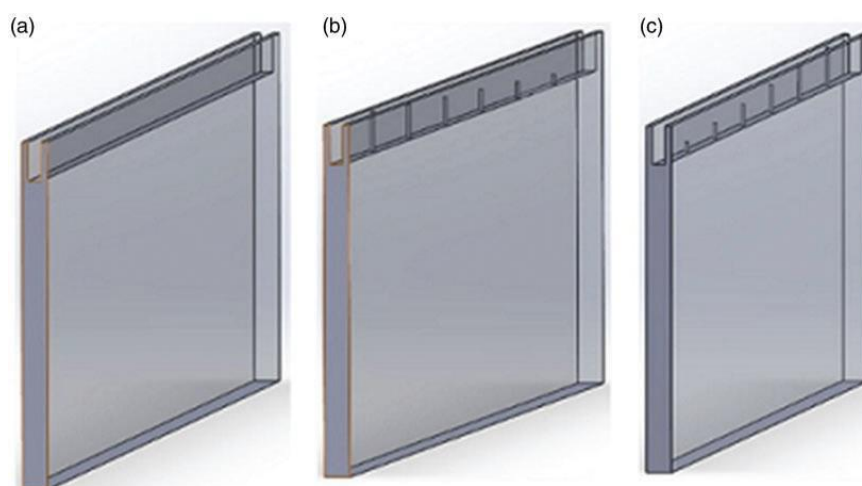
شکل ۱۰-۲: مفهوم موانع و کانال‌های فرعی در سینک حرارتی میکروکانال [۳۲]

نتایج نشان می‌دهند که یکپارچه‌سازی سه رویکرد، به عبارتی استفاده از نانوسیال، موانع و کانال‌های فرعی در میکروکانال، باعث بهبود قابل توجهی در عملکرد سینک حرارتی می‌شود. با افزایش غلظت یا عدد رینولدز، چندین بهبود مشاهده می‌شود. دما کاهش می‌یابد که منجر به بهبود یکنواختی دما و کاهش اندازه مناطق با بالاترین دما می‌شود. علاوه بر این، ضریب انتقال

حرارت همگرایی میانگین با افزایش غلظت و عدد رینولدز بهبود می‌یابد. به عنوان مثال، هنگامی که غلظت از ۰ تا ۰.۱٪ در $Re=100$ افزایش می‌یابد، بهبود چشم‌گیری به میزان ۱۷٪ در ضریب انتقال حرارت همگرایی حاصل می‌شود. علاوه بر این، افزایش غلظت منجر به کاهش دمای سطح پایینی می‌شود، که کاهش ۳.۴۲ کلونی هنگام افزایش غلظت از ۰ تا ۰.۱٪ در $Re=100$ مشاهده می‌شود. هم‌زمان، جریان در عدد رینولدزها و غلظت‌های بالاتر انرژی پمپ‌کردن بالاتری را تجربه می‌کند.

قدوائی و حسن (۲۰۱۹) [۳۳] با انجام یک مطالعه عددی تأثیر تغییر ارتفاع مانع‌های استوانه‌ای موجود در دیوار پایینی میکروکانال را بررسی کردند. سه حالت مختلف از سینک‌های حرارتی میکروکانال مورد بررسی قرار گرفتند: حالت ۱ شامل یک کانال مستطیل ساده بود، در حالی که حالت ۲ و حالت ۳ شامل مانع‌های استوانه‌ای با ارتفاع‌های کاهش یافته و افزایش یافته در جهت جریان بودند. به علاوه، قطر مانع‌ها تغییر داده شد تا تأثیر ویژگی‌های جریان مرتبط بر بهبود انتقال حرارت ارزیابی شود.

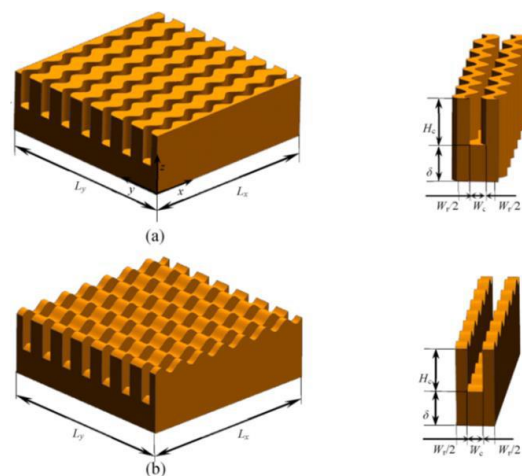
تنظیمات سینک‌های حرارتی میکروکانال به منظور شامل کردن مانع‌های استوانه‌ای با ارتفاع‌های مختلف، با فاصله‌های منظم ۱۰۶.۹۵ میلی‌متری در جهت جریان تغییر یافته‌اند. این مانع‌ها به سطح پایینی کانال متصل می‌شوند. دو دسته اصلی به نام حالت ۲ و حالت ۳ تشخیص داده شده‌اند که براساس روند ارتفاع‌های مانع‌های استوانه‌ای نسبت به جهت جریان می‌باشند، همانطور که در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۲: تنظیمات مختلف میکروکانال‌ها (از چپ به راست): حالت ۱: کانال مستطیل ساده؛ حالت ۲: مانع‌های استوانه‌ای با ارتفاع کاهشی در جهت جریان؛ حالت ۳: مانع‌های سیلندری با ارتفاع افزایشی در جهت جریان [۳۳].

در نتیجه این مطالعه مشاهده شد که حالت ۲ به تعداد نوسلت بالاتری منجر می‌شود، در حالی که حالت ۳ نشان‌دهنده کاهش فشار است. مقایسه حالت ۳ با افزایش ارتفاع مانع‌های استوانه‌ای با حالت ۲ با کاهش ارتفاع مانع‌ها، برای همان قطر مانع‌ها، عملکرد حرارتی حالت ۳ به طور کلی از حالت ۲ عملکرد بهتری دارد. این به توزیع سرعت و کاهش فشار در منطقه پس‌آغازی یک میکروکانال برمی‌گردد، که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه منطقه پس‌آغازی بر کارایی کلی است و همچنین اهمیت فشار افت به عنوان یک ویژگی کلیدی را تأکید می‌کند.

ژو و همکاران (۲۰۱۹) [۳۴] توسعه یک مدل همپیوندی سه‌بعدی سیال-جامد برای بررسی کارایی انتقال حرارت سینک‌های حرارتی میکروکانال موجدار به دو صورت چپ-راست و بالا-پایین را ارائه می‌دهند. تجزیه و تحلیل مقاومت حرارتی کلی و تغییر حداکثر دما در امتداد دیوار پایینی دو طرح موجدار را مقایسه می‌کند. این بررسی شامل دامنه‌های مختلف امواج، طول موج‌ها، نسبت ابعاد کانال و نسبت عرض کانال به برازش است، که به ارزیابی جامع عملکرد آنها اجازه می‌دهد. شکل ۱۲-۲ نمودارهای سینک‌های حرارتی موجدار چپ-راست و بالا-پایین را نشان می‌دهد. هر دو سینک حرارتی ابعاد یکسانی دارند و از N کانال و N مانع عمودی با پروفیل مستطیلی تشکیل شده‌اند. حوزه محاسباتی توسط یک واحد تنها نمایش داده می‌شود که شامل یک میکروکانال و دو نیم باله است، همانطور که در زیرنمودارها در طرف راست شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است.



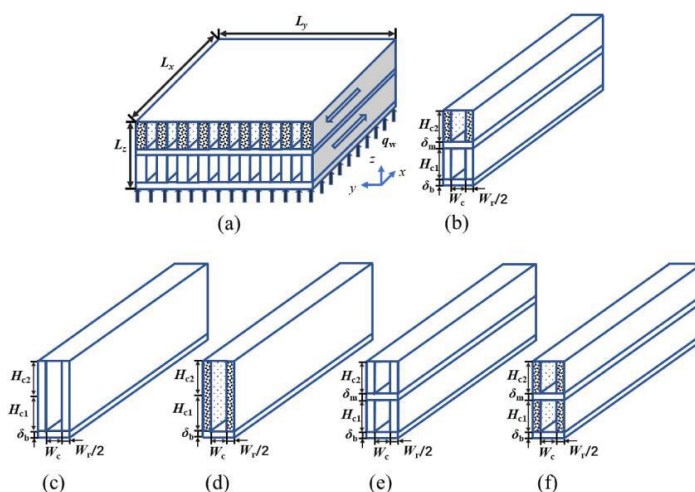
شکل ۱۲-۲: نمودارهای سینک‌های حرارتی موجدار میکروکانال: (الف) طراحی موجدار چپ-راست؛ و (ب) طراحی موجدار بالا-پایین [۳۴].

در این مطالعه، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که هر دو طراحی موجدار جفتی موجب تولید گردابه‌های دین با جهت‌های حرکت مخالف در صفحه تقاطع کانال ایجاد می‌کنند. این گردابه‌های به طور موثر اختلاط مایع خنک‌کننده را افزایش می‌دهند و در نتیجه عملکرد سینک حرارتی را بهبود می‌بخشند. گردابه‌های دین توسط طراحی موجدار بالا-پایین به طور اصلی در نزدیکی دیواره‌های کانال‌ها قرار می‌گیرند، در حالی که برای طراحی موجدار چپ-راست، در نزدیکی دیواره‌های بالا و پایین کانال‌ها رخ می‌دهند. با افزایش طول موج، هر دو طراحی عملکرد مشابهی نشان می‌دهند. این نتایج می‌توانند به خصوصیات متمایز گردابه‌های دین مرتبط با هر طراحی نسبت داده شوند. اندرواره‌های دین ایجاد شده در طراحی موجدار بالا-پایین جریان را به طور موثری میان قسمت پایینی گرم‌تر و قسمت بالایی خنک‌تر کانال‌ها مخلوط می‌کنند. به عبارت دیگر، اندرواره‌های دین ایجاد شده در طراحی موجدار چپ-راست به طور اساسی در یکی از مناطق پایینی گرم‌تر یا مناطق بالایی خنک‌تر محدود می‌شوند. از این رو، طراحی موجدار بالا-پایین به طور کلی نسبت به طراحی موجدار چپ-راست عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. نتایج این مطالعه راهنمایی مفیدی برای بهینه‌سازی طراحی سینک‌های حرارتی میکروکانال موجدار ارائه می‌دهد.

لی و همکاران (۲۰۱۹) [۳۵] پیکربندی بهبود یافته‌ای از سینک‌های حرارتی میکروکانال ارائه می‌دهند که عملکرد حرارتی بالا را با کاهش فشار افت می‌کند. این طراحی به مزایای همزمان مفهوم لایه دوگانه و استفاده از مانع‌های متخلخل توجه داشته است. در این طراحی بهبودیافته، دو لایه‌ی کانال‌های مستطیلی پشت سر هم قرار گرفته‌اند که لایه بالایی از مانع‌های متخلخل و لایه پایینی از مانع‌های جامد استفاده می‌کند. برای بررسی عملکرد حرارتی و ویژگی‌های جریان در طراحی بهبودیافته، از

یک مدل مزدوج سیال جامد سه‌بعدی جامد-سیال استفاده می‌شود. علاوه بر این، چهار سینک حرارتی دیگر با ساختارهای متفاوت (لایه واحد با مانع‌های جامد، لایه واحد با مانع‌های متخلخل، لایه دوگانه با مانع‌های جامد و لایه دوگانه با مانع‌های متخلخل) طراحی شده‌اند تا تجزیه و تحلیل عملکرد مقایسه‌ای انجام شود.

شکل ۱۳-۲ (الف) نمایش شماتیک طرح بهبودیافته است. سینک حرارتی شامل دو لایه با تعداد یکسانی از کانال‌ها (N) فن‌ها ($N+1$) است. تنها یک واحد به عنوان حوزه محاسباتی استخراج شده است، همانطور که در شکل ۱۳-۲ (ب) نشان داده شده است. هر دو لایه از همان عرض کانال (W_c) و عرض مانع عمودی (W_r) استفاده می‌کنند. لایه پایین جریان خنک‌کننده را به جهت x هدایت می‌کند، در حالی که لایه بالایی جریان خنک‌کننده را به جهت x منفی تجربه می‌کند. برجسته است که در طرح بهبودیافته، مانع‌های متخلخل به صورت انحصاری در لایه بالایی استفاده می‌شوند، در حالی که لایه پایینی مانع‌های جامد را شامل می‌شود.

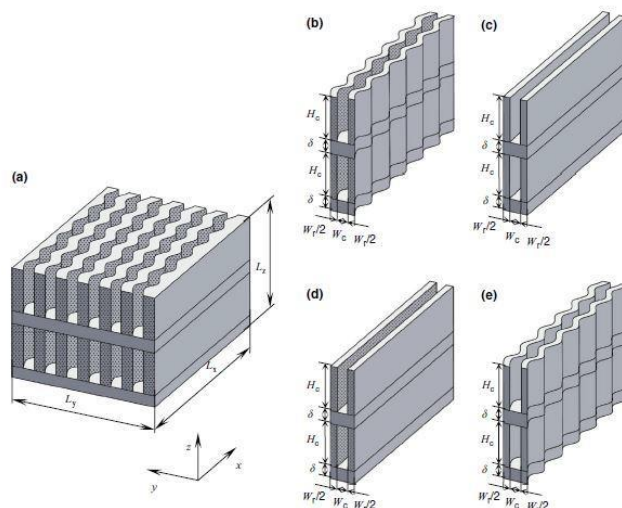


شکل ۱۳-۲: نمودارهای سینک‌های حرارتی بهبودیافته: (الف) طرح بهبودیافته، (ب) واحد محاسباتی طرح بهبودیافته، (ج) واحد محاسباتی طرح لایه واحد با مانع‌های جامد، (د) واحد محاسباتی طرح لایه واحد با مانع‌های متخلخل، (ه) واحد محاسباتی طرح لایه دوگانه با مانع‌های جامد و (و) واحد محاسباتی طرح لایه دوگانه با مانع‌های متخلخل [۳۵].

نتایج نشان می‌دهد که طرح بهبودیافته کمترین مقاومت حرارتی را از میان تمام پنج طرح دارد و دمای بدون یکنواختی بر روی دیواره پایینی بهتر از همه طرح‌هاست، چه در شرایط با عدد رینولدز یکسان و چه در شرایط با قدرت پمپ‌گذاری ثابت. این بهبود عملکرد به ترکیب موثر مانع‌های جامد با هدایت حرارتی بهبودیافته و مانع‌های متخلخل با کاهش فشار در داخل سینک حرارتی دوگانه برمی‌گردد.

شوئو- ونگ و همکاران (۲۰۲۰) [۳۶] یک پیکربندی نوآورانه از سینک‌های حرارتی میکروکانال دو لایه ارائه کردند که شامل میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های عمودی متخلخل است. برای برجسته کردن مزایای طرح جدید، مقایسه‌ای با سه طرح دوگانه دیگر انجام شد که همه تحت محدودیت‌های قدرت پمپ‌گذاری ثابت هستند. این طرح‌های موجود شامل یک طرح با میکروکانال‌های راست و مانع‌های جامد، طرح دیگر با میکروکانال‌های راست و مانع‌های متخلخل و طرح سوم با میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های جامد هستند. شکل ۱۴-۲ (الف) نمایش تصویری طرح پیشنهادی را ارائه می‌دهد و نمایش شماتیک آن را

نشان می‌دهد. ساختار سینک حرارتی شامل دو لایه میکروکانال است. هر لایه شامل N میکروکانال و $N + 1$ مانع عمودی است. از جمله نکات قابل توجه این است که خنک‌کننده در دو لایه به جهت‌های مختلف جریان پیدا می‌کند.

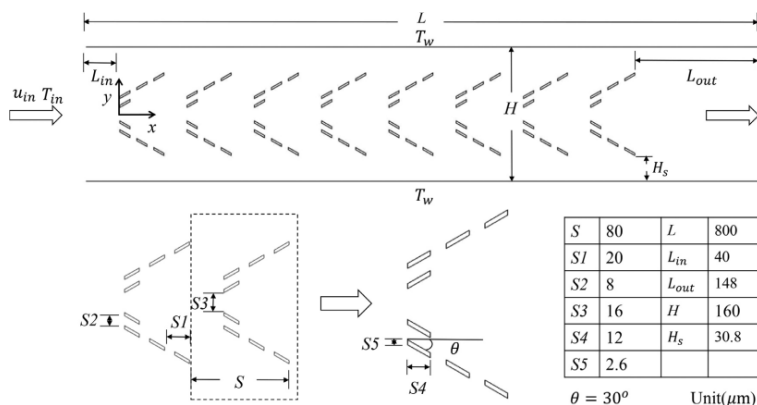


شکل ۱۴-۲: نمایش شماتیک سینک حرارتی میکروکانال دو لایه با میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های متخلخل؛ الف حوزه‌های محاسباتی برای سینک‌های حرارتی میکروکانال دو لایه با میکروکانال‌ها و مانع‌های مختلف؛ ب میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های متخلخل؛ ج میکروکانال‌های راست و مانع‌های جامد؛ د میکروکانال‌های راست و مانع‌های متخلخل؛ ه میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های جامد [۳۶].

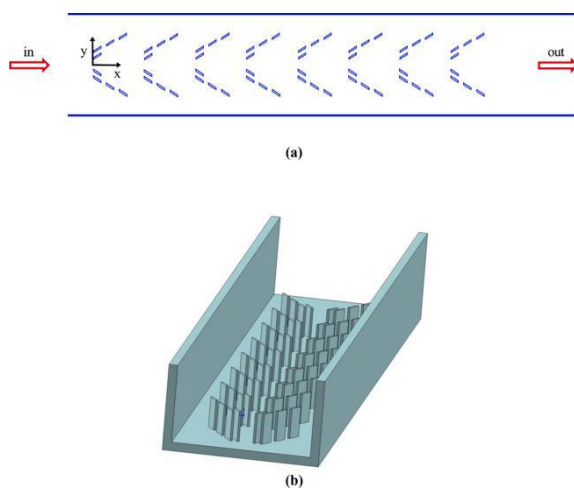
نتایج نشان می‌دهد که شامل کردن مانع‌های متخلخل به طور موثری فشار افت را در سینک‌های حرارتی کاهش می‌دهد، در حالی که استفاده از میکروکانال‌های موجدار، گردابه‌های دین ایجاد می‌کند و اختلاط مایع خنک‌کننده را بهبود می‌بخشد. در محدوده توان‌های پمپ‌گذاری پایین از ۰.۰۰۵ تا ۰.۰۱ وات، ظرفیت خنک‌کنندگی سینک‌های حرارتی به طور اصلی توسط سرعت ورودی کولانت تعیین می‌شود. در مقابل، در محدوده توان‌های پمپ‌گذاری بالا از ۰.۱ تا ۰.۲ وات، مخلوط کولانت عامل مهمی برای افزایش کارایی می‌شود. به طور مقایسه‌ای، طرح جدید که شامل همچنین میکروکانال‌های موجدار و مانع‌های متخلخل است، بین چهار سینک حرارتی دو لایه حاصل از این مطالعه، بالاترین ظرفیت خنک‌کنندگی را در محدوده توان‌های پمپ‌گذاری از ۰.۰۰۵ تا ۰.۲ وات از خود نشان می‌دهد. برای بهبود بیشتر طرح جدید، آنالیزهای تک‌پارامتری انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با محدود کردن توان‌های پمپ‌گذاری به ۰.۰۵ وات، طول موج یا ارتفاع بهینه واحدهای موجدار می‌تواند کمترین مقاومت حرارتی را بدست آورد. با این حال، مقاومت حرارتی به طور پیوسته با افزایش تخلخل مانع‌های متخلخل یا کاهش عامل مقاومت درجه دوم کاهش می‌یابد.

شنگ و ونگ و همکاران (۲۰۲۰) [۳۷] اثرات پالاسیون جریان بر انتقال حرارت اجباری آرام در یک سینک حرارتی میکروکانال نوآورانه با روش بولتزمن شبکه‌ای (LBM) بررسی کردند. دو تا هشت ساختار میکروساختاری شبیه‌فن به ترتیب در یک میکروکانال تناوبی قرار داده شده‌اند که مطابق با نسبت برآزش (PR) از ۰.۲۵ تا ۱.۷۵ است. عدد رینولدز (Re) بر اساس قطر هیدرولیکی کانال و سرعت میانی کلی متناوب به دوره‌ای از ۱۰۰ تا ۳۰۰ تغییر می‌کند. سرعت ورودی پالسه به شکل مثلی با شماره استروهل (St) متغیر از ۰ تا ۲.۸ است. در مدل‌های عددی، رویکرد دو تابع توزیعی LBM برای مدل‌سازی هم جریان سیال و انتقال حرارت استفاده می‌شود.

در این مطالعه، سینک حرارتی میکروکانال مورد بررسی شامل یک میکروکانال با نسبت ابعاد بزرگ ($AR > 47$) است. تفاوت Nu_0 برای $AR > 47$ بین MCHS های D_2 و D_3 کمتر از ۵٪ است. بنابراین، حوزه محاسباتی میکروکانال مورد استفاده در این مقاله دو بعدی است. شکل ۱۵-۲ سیستم مختصات و ابعاد مربوط به آن را نشان می‌دهد. دو تا هشت ساختار میکروساختاری نوع شبیه‌پروانه با $PR = 0.25-1.75$ در کانال قرار داده شده‌اند.



شکل ۱۵-۲: سیستم مختصات و ابعاد میکروکانال نوع شبیه‌فن حاضر ($PR=0.25$) [۳۷].



شکل ۱۶-۲: نمودار ساختار میکروکانال نوع شبیه‌فن: (الف) نقشه‌ی یک بعدی؛ (ب) نمودار ساختار سه‌بعدی [۳۸].

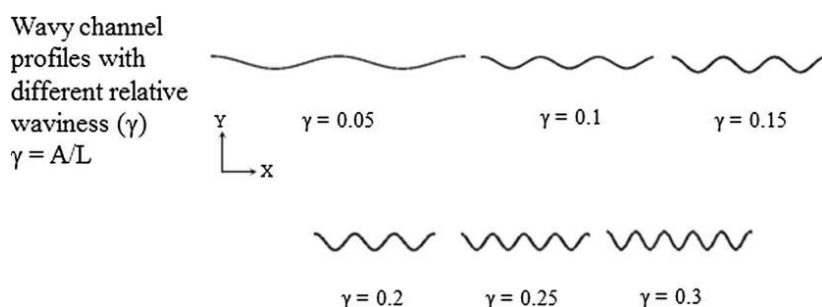
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نمودارهای عدد نوسلت (Nu) و ضریب اصطکاک (f) با عدد استروهال (St) برای میکروکانال نوع شبیه‌فن حاضر، همگی دارای چندین اوج هستند که این یافته از ترند یک‌اوج قبلی متفاوت است. علاوه بر این، طراحی حاضر نسبت بالاترین Nu / Nu_0 برابر با ۶.۱۶ در $St = 1.8$ و $PR = 0.58$ و $Re = 300$ دارد که بیشترین مقدار برای f^+ $f_0 < 50$ در میان MCHS های دارای فن و بستری گزارش شده به دست آمده است. علاوه بر این، نبض جریان در میکروکانال موجود، نه تنها تأثیر هدایت کردن مجدد پروانه را تقویت می‌کند، بلکه ساختارهای گردشی توسعه و انقباضی متوالی ایجاد می‌کند

که باعث اختلاط سیال هسته سرد در نزدیکی دیوار با سیال گرم را تشدید می‌کند و در نتیجه انتقال حرارت را افزایش می‌دهد [۳۷].

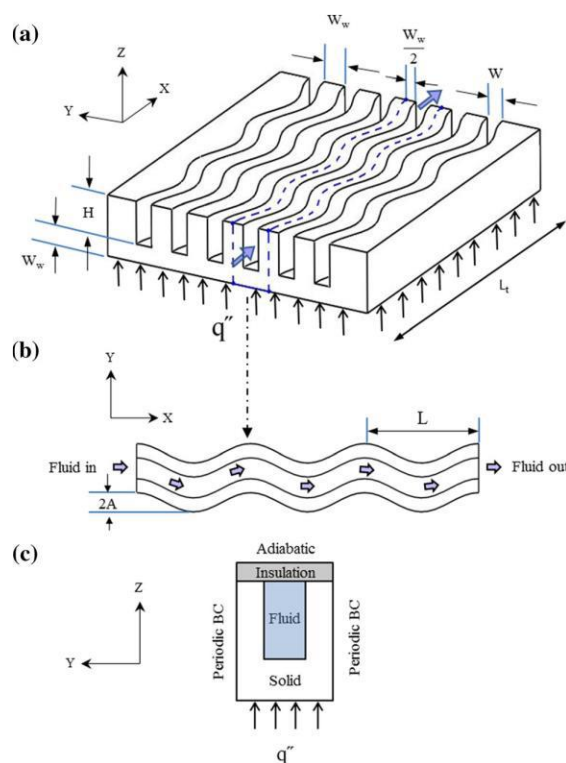
نتایج همچنین نشان داد که جریان سیال در میکروکانال جدید، اثر هدایت فن را افزایش داده و ساختاری داخلی ایجاد می‌کند که انتقال حرارت را افزایش می‌دهد [۳۸].

کریشنا و همکاران (۲۰۲۰) [۳۹] از یک مدل دیجیتالی شامل اتصال ثابت سه بعدی استفاده کرده تا تأثیر موج‌دار بودن بر جریان صاف سیالات و خصوصیات انتقال حرارت در میکروکانال‌هایی با الگوهای موج‌دار را مورد بررسی قرار دهند. دقت مدل عددی با مقایسه آن با داده‌های تجربی موجود تأیید شد.

شکل ۱۷-۲ نمایش شماتیک از میکروکانال‌های نمایش الگوهای موج‌دار را نشان می‌دهد. اطلاعات بیشتری درباره حوزه محاسباتی در شکل ۱۸-۲ مشاهده می‌شود. حوزه شبیه‌سازی توسط ورودی، خروجی و دیواره‌های کانال که از ماده مس تشکیل شده‌اند، محدود می‌شود. یک کانال موج‌دار واحد با دیواره‌های جانبی دوره‌ای استفاده می‌شود. سطح پایین و بالای کانال به شار حرارت ثابت و شرایط مرزی ناهمگونی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در ورودی سیال، ورودی سرعت با دمای ۳۰۰ کلوین ایجاد می‌شود.



شکل ۱۷-۲: نمایش شماتیک از میکروکانال‌های موج‌دار [۳۹].



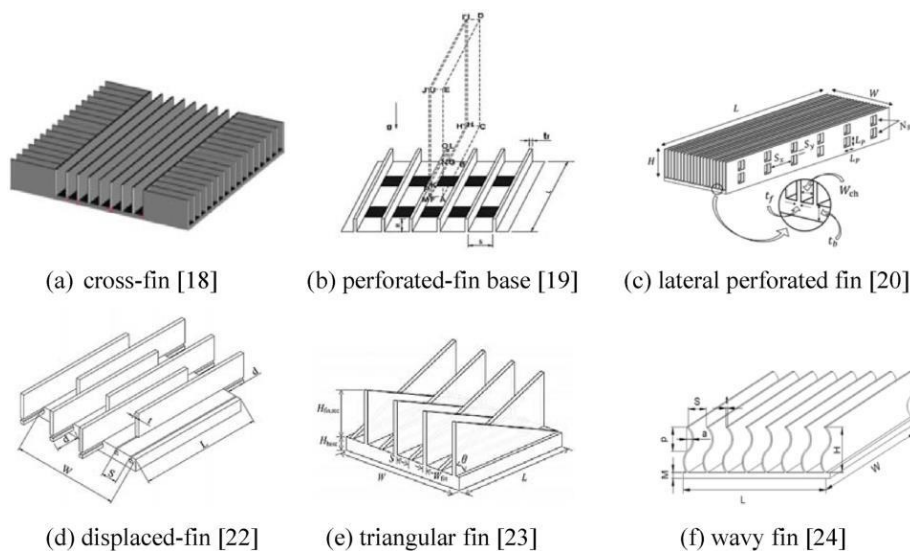
شکل ۱۸-۲: جزئیات هندسه محاسباتی را نشان می‌دهد: a بلوک مس (Cu Block) که به صورت مارک دار با چند نوار از میکروکانال‌های موجدار استخراج شده است، b یک نوار تکی از میکروکانال موجدار - حوزه همپیوندی، c حوزه همپیوندی با شرایط مرزی [۳۹]

مدل عددی با مقایسه با داده‌های تجربی موجود اعتبارسنجی شده است. مشاهده شده است که عدد رینولدز (Re) انتقالی و عدد نوسلت (Nu) میانگین تحت تأثیر موج‌داری کانال قرار می‌گیرند، در حالی که عامل اصطکاک در سطح‌های بالاتر از موج‌داری ثابت می‌ماند. افزایش Nu به دلیل موج‌داری به بازگشت انسانی و جریان‌های ثانویه بازمی‌گردد. به‌ویژه، سطح‌های بالاتر چرخش نقطه راحتی از ۰.۳ تا ۰.۳ افزایش حدود ۶ برابری را نشان می‌دهد و حدود ۲.۵ برابری را نشان می‌دهد که Re از ۱۰۰ تا ۲۰۰ می‌رود. علاوه بر این، حتی برای کانال‌های با موج‌داری بالاتر در $Re = 100$ ، مشاهده هیچ گونه تراکم ناهموار نیست.

احمد و همکاران (۲۰۲۱) [۴۰] نشان دادند افزایش دمای بالاتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌تواند تأثیر منفی بر روی خروجی الکتریکی ماژول‌های فتولتائیک (PV) داشته باشد. یک مطالعه جدید یک طراحی منحصر به فرد هیت سینک به نام هیت سینک ونز چند سطحی کوتاه ارائه می‌دهد که از هدایت طبیعی برای خنک‌کنندگی ماژول‌های PV استفاده می‌کند. ساختار ونز ای پیشنهادی هدف افزایش انتقال حرارت را با ایجاد تغییر ناگهانی در ناحیه محدود مرزی ونز تقویت می‌کند که از طریق استفاده از چندین سطح ونز به‌دست می‌آید.

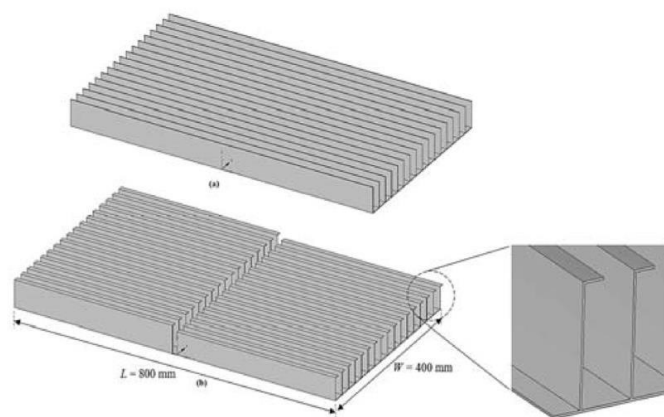
در این مقاله، چندین مطالعه در مورد استفاده از مانع‌های برای بهبود انتقال حرارت بررسی شده است. در این تحقیق، مشخص شد که ورود تلاطم هوا بین فن‌ها می‌تواند به طور موثر تهویه ضعیف ناشی از جریان طبیعی را بهبود بخشد، از جمله استفاده از یک هیت سینک با مانع‌های متقاطع (شکل ۱۹-۲) (الف) که اجازه نفوذ هوا را می‌دهد. که منجر به بهبود راندمان حرارتی می‌شود. علیرغم هندسه ساده آن، وزن و اندازه کلی آن مشابه یک هیت سینک پره صفحه‌ای است و در عین حال افزایش ۱۱ درصدی در ضریب انتقال حرارت هدایت را نشان می‌دهد. و بررسی دیگری در مورد تأثیر پایه فن سوراخ‌شده بر انتقال حرارت

هدایت آرایه مانع افقی (شکل ۱۹-۲(ب)). تحقیق سوم توضیح داد که برخورد با سوراخ‌ها به عنوان مرزهای باز در پایین پایه فن برای اهداف ساده‌سازی. مطالعه آنها نشان داد که طول و الگوی سوراخ‌ها تا حد زیادی بر ضرایب انتقال حرارت توسط هدایت تأثیر می‌گذارد. هیت سینک‌های فن سوراخ شده جانبی (شکل ۱۹-۲(ج))، زیرا آنها ابعاد مهمی از پارامترهای هندسی را تعیین می‌کنند، به ویژه برای اندازه سوراخ و تخلخل سوراخ. این طراحی مانع باعث کاهش قابل توجه ۴۵٪ در مقاومت حرارتی بر اساس جرم می‌شود و آن را به یک راه حل جذاب برای برنامه‌های کاهش وزن تبدیل می‌کند و تحقیق دیگری اثر معرفی جابجایی بین فن‌ها را برای افزایش انتقال حرارت از طریق روش‌های تجربی و عددی مورد مطالعه قرار داده است (شکل ۱۹-۲(د)). یک کشف قابل توجه این بود که طراحی فن با افست می‌تواند مقاومت حرارتی را تا ۵۶٪ کاهش دهد. همچنین، محققان عملکرد مانع‌های مثلثی با طرح متناوب را از نظر انتقال حرارت طبیعی و انتقال حرارت تشعشعی مطالعه کرده‌اند (شکل ۱۹-۲(ه)). هندسه مانع مثلثی پیشنهادی بهبودی تا ۱۴۶٪ در ضریب انتقال حرارت را نشان داد که با ضریب عرض موثر بالاتر همراه بود. در نهایت، محققان یک تجزیه و تحلیل تجربی بر روی پتانسیل‌های هدایت و انتقال حرارت تشعشعی یک سینک حرارتی با فن موج دار با هندسه سینوسی با ظرفیت متغیر انجام دادند (شکل ۱۹-۲(ف)). یافته‌های آنها نشان داد که پیکربندی فن‌های موج‌دار از نظر عملکرد انتقال حرارت از طراحی مانع مستطیلی بهتر عمل می‌کند.



شکل ۱۹-۲: شماتیک پیکربندی‌های مختلف فن [۴۰].

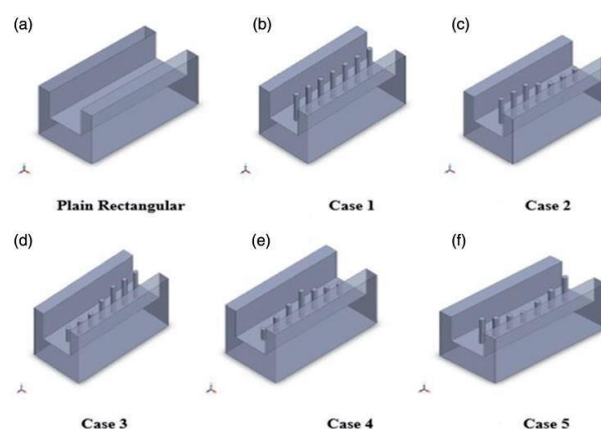
در این حالت خاص، یک فن حرارتی روی سطح پشتی ماژول فتوولتائیک قرار گرفته است که در یک آب و هوای استوایی با زاویه شیب ۱۵ درجه عمل می‌کند. نمایش تنظیمات فن حرارتی مورد بررسی در شکل ۲۰-۲ قابل مشاهده است. هدف اصلی طراحی فن حرارتی متمایز چند سطحه، افزایش نرخ تبخیر حرارت در واحد جرم می‌باشد. پیشنهاد شده است که فن‌های حرارتی با ارتفاع غیر یکنواخت نسبت به فن‌های حرارتی معمول با ارتفاع یکنواخت، عملکرد بهتری داشته باشند. علاوه بر این، هندسه مختصر شده به تولید آشفته‌گی درون محفظه کمک می‌کند و به این ترتیب توانایی تبادل حرارت آن را بهبود می‌بخشد. بنابراین، توصیه می‌شود تحقیقات بیشتری در خصوص ارتباط بین این عوامل انجام شود.



شکل ۲۰-۲: مدل هندسی سینک حرارتی فن مورد مطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد: (الف) سینک حرارتی فن مستطیلی، (ب) سینک حرارتی فن چند سطحه کوتاه‌شده [۴۰]

نتایج مطالعه نشان می‌دهد که دمای میانگین در ابتدا کاهش می‌یابد اما با عواملی مانند ارتفاع فن، فاصله فن و ضخامت فن افزایش می‌یابد. نتایج انگیزه‌بخش هستند، زیرا یک سینک حرارتی فن بهینه‌شده کاهش قابل توجهی در دمای میانگین مازول فتوولتائیک نشان می‌دهد که تا ۶.۱۳٪ و بهبود در تولید توان تا ۲.۸۷٪ دارد. هندسه فن‌های پیشنهادی رویکردی قابل اعتماد برای افزایش انتقال حرارت در برنامه‌های خنک‌کنندگی مازول‌های فتوولتائیک ارائه می‌دهد.

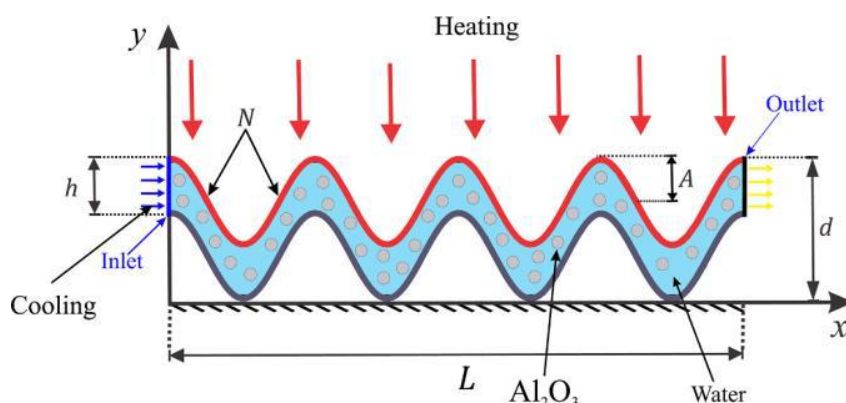
خان و کریمی (۲۰۲۱) [۴۱] در یک مطالعه عددی به بررسی تاثیر اندازه متغیر موانع بر روی انتقال حرارت در یک میکروکانال پرداختند. پنج تنظیمات مختلف موانع مورد بررسی قرار گرفت: مورد ۱ (موانع با اندازه یکسان)، مورد ۲ (موانع‌های تمام طول در محل بالادست)، مورد ۳ (موانع‌های بلند در محل پایین‌دست)، مورد ۴ (موانع‌های بلند در مرکز میکروکانال) و مورد ۵ (موانع‌های بلند در ورودی و خروجی میکروکانال). نتایج حاصل از این پنج مورد با نتایج یک میکروکانال مستطیلی ساده (مطابق شکل ۲۰-۲۱) مقایسه شد.



شکل ۲۱-۲: تنظیمات مختلف میکروکانال (الف) میکروکانال ساده، (ب) مورد ۱، (ج) مورد ۲، (د) مورد ۳، (ه) مورد ۴، (و) مورد ۵ [۴۸].

نتایج نشان می‌دهد که مورد ۲ با کمترین مقدار عدد رینولدز، بیشترین عدد نوسلت را دارد، در حالی که مورد ۵ با بیشترین مقدار عدد رینولدز، بیشترین عدد نوسلت را دارد. به علاوه، مورد ۴ کمترین فشار افت را نشان می‌دهد. به طور کلی، مورد ۲ نسبت به موارد مربوطه عملکرد حرارتی برتری دارد.

در تحقیق صورت گرفته توسط الصابری و همکاران (۲۰۲۱) [۴۲] تجزیه و تحلیل محاسباتی هدایت اجباری نانوسیل در یک کانال موجدار افقی که گرمایش از سطح موجدار بالایی اعمال می‌شود، انجام شده است. این مطالعه از رویکرد نانوسیل استفاده می‌کند و به منظور محاسبه لزجت و هدایت حرارتی از همبستگی‌های مبتنی بر آزمایش استفاده می‌کند. به علاوه، قانون دوم نیوتن برای شرح جابجایی نانوذرات در کانال استفاده می‌شود، مانند آنچه در شکل ۲۲-۲ نشان داده شده است.



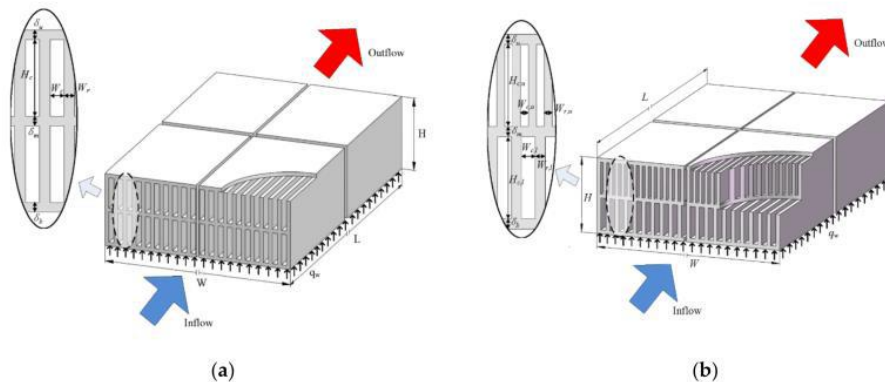
شکل ۲۲-۲: توصیف شماتیک ۲ بعدی مربوط به نمایش فیزیکی [۴۲].

این مطالعه به بررسی رفتار نانوذرات در یک کانال تحت نیروهای حرارتی می‌پردازد. نانوذرات تمایل دارند که در دو خط نزدیک به سطح‌های بالا و پایین تجمع یابند، در حالی که مناطق بازچرخش نزدیک به قله‌های دیوار آنها را از دیواره‌ها دور کرده و به سمت مرکز کانال سوق می‌دهد. بنابراین، توزیع نانوذرات غیریکنواخت است، با غلظت بالاتر نزدیک به دیواره‌های کانال. افزایش عدد رینولدز (Re) ترکیب مایع در نزدیکی سطح‌های کانال را بهبود می‌بخشد و انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. مقادیر بالاتر از Re منجر به افزایش سرعت ذرات، مسیرهای نزدیک به مرکز کانال و خروجی مایع از کانال موجدار با دماهای زیر میانگین می‌شود. کانالی با ارتعاشات دیوار موجدار بیشتر، نرخ انتقال حرارت کمی بالاتر را نشان می‌دهد به دلیل افزایش چینش دیوار و مخلوط شدن مایع بهبود یافته. با افزایش تعداد ارتعاشات دیوار موجدار (N)، سرعت ذرات میانگین نیز افزایش می‌یابد و مایع با میانگین دمای بالاتر از کانال خارج می‌شود.

افزایش عدد رینولدز همراه با کاهش عرض لوله مایع درون کانال، منجر به افزایش سرعت میانگین و عدد نوسلت میانگین می‌شود. همچنین، با افزایش عدد موجدار کانال، همچنین افزایش سرعت میانگین ذرات و دمای میانگین مشاهده می‌شود.

ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) [۴۳] یک مفهوم نوآورانه را برای بهبود عملکرد حرارتی یک سینک حرارتی میکروکانال دو لایه ارائه کردند. طراحی پیشنهادی شامل موانع‌های متراکم در لایه بالا با ضخامت کم، در حالی که لایه پایینی شامل موانع‌های کمتر با ضخامت افزایش یافته است. این تنظیم هدف دارد تا با هدایت مؤثرتر مایع با دمای کمتر به لایه پایینی، انتقال حرارت را

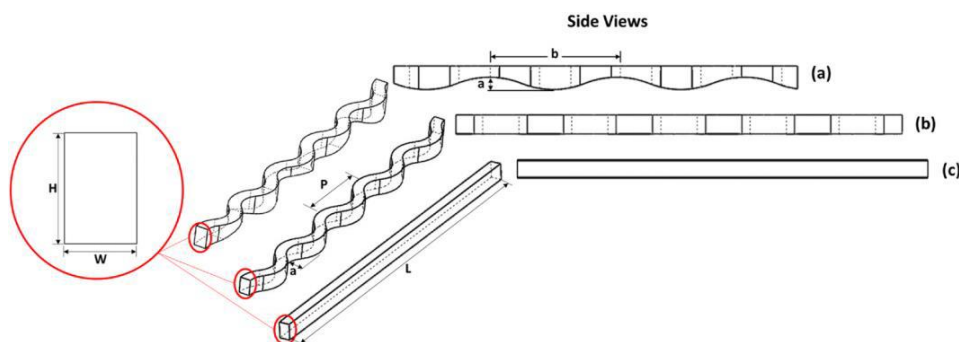
بهینه‌سازی کند. علاوه بر این، ساختار مانع‌های کمتر در لایه پایینی به کاهش عیوب افت فشار کمک می‌کند. در عین حال، مانع‌های ضخیم‌تر در لایه پایینی باعث بهبود کارایی مانع می‌شوند و انتقال حرارت بالا را تسهیل می‌کنند. (مطابق شکل ۲۳-۲).



شکل ۲۳-۲: نمودارهای شماتیک از سینک حرارتی میکروکانال دو لایه طراحی‌شده: (الف) سینک حرارتی میکروکانال دو لایه سنتی و (ب) سینک حرارتی میکروکانال دو لایه پیشنهادی [۴۳]

این مطالعه شامل تجزیه و تحلیل جامعی از یک سینک حرارتی میکروکانال دو لایه پیشنهادی نسبت به یک سینک حرارتی سنتی است، هر دو از جنبه‌های پارامتری و جزئیات. پس از بهینه‌سازی، مقاومت حرارتی سینک حرارتی میکروکانال دو لایه پیشنهادی با عملکرد همان سطح سینک حرارتی سنتی کاهش می‌یابد و در عین حال، با عدد رینولدز معادل، عدد نوسلت طراحی پیشنهادی مقدار سنتی را با ۱۳٪ برتری می‌دهد.

تحقیق خان و همکاران (۲۰۲۱) [۴۴] ارزیابی عملکرد خنک‌کننده‌های میکروکانال راست، موجدار و دوگانه موجدار با ایجاد یک مدل انتقال حرارت در نرم افزار انسیس فلوئنت است. این مطالعه بر روی استفاده از مایعات بی‌تراکم کار می‌کند که در رژیم آرام عمل می‌کنند و نانوسیال‌های مبتنی بر آلومینا با غلظت‌های ۱٪، ۳٪ و ۶٪ را شامل می‌شود. این مطالعه کانال‌های راست، موجدار، موجدار دو لایه با پایه صاف و موجدار دو لایه با پایه موجدار را مورد بررسی قرار می‌دهد. از میان اینها، سه کانال مساحت گرمایش یکسان دارند در حالی که یک کانال مساحت گرمایش بزرگتری دارد [۴۴].

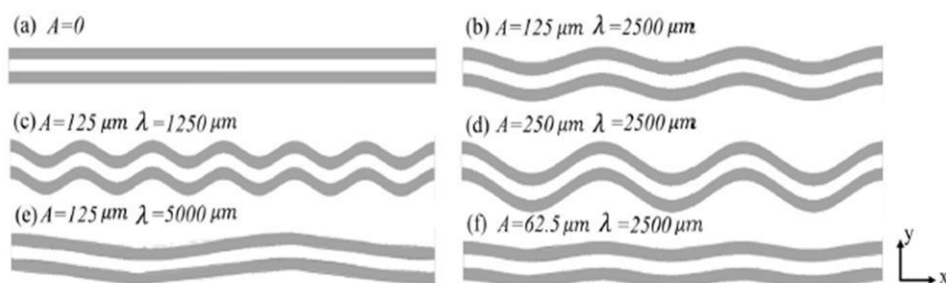


شکل ۲۴-۲: هندسه (a) دوگانه موجدار، (b) موجدار و (c) راست [۴۴]

در طول این مطالعه مشاهده شد که حضور کانال‌های موجدار و دوگانه موجدار منجر به بهبود انتقال حرارت همجوشی نسبت به کانال‌های راست می‌شود. این بهبود می‌تواند به تشکیل گرداب‌های ثانویه در بخش‌های منحنی بازگردانده شود. به ویژه،

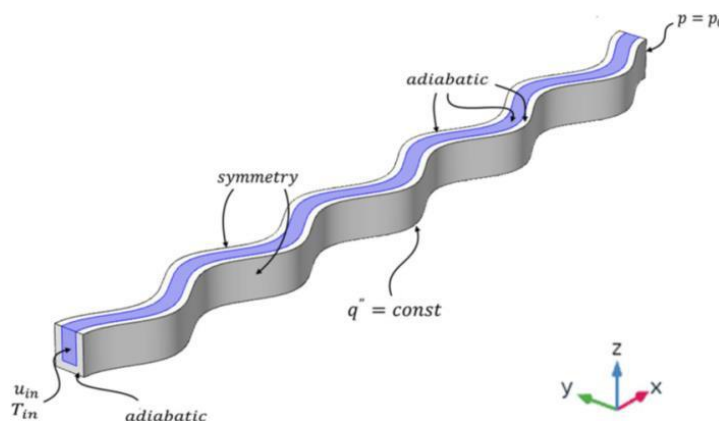
کانال‌های دوگانه موجدار با دیواره‌های پایه موجدار و صاف، افزایش بیشتری در عدد نوسلت ارائه دادند، بیش از دو برابر مقدار کانال مستقیم با غلظت مساوی. وقتی که نانوذرات ۰.۶٪ به همه کانال‌ها افزوده شد، به طور میانگین، هر دو کانال دوگانه موجدار بهبود بزرگتری به میزان ۰.۸٪ نسبت به کانال با غلظت ۰٪ نشان داد. علاوه بر این، کانال‌های دوگانه موجدار با پایه صاف و پایه موجدار دمای مبدأ گرم کن را به ترتیب به مقدار ۱۰ درجه سانتیگراد و ۹ درجه سانتیگراد کاهش دادند نسبت به کانال راست. کانال دوگانه موجدار با تنظیم پایه موجدار با استفاده از نانوذرات ۰.۶٪ بیشترین فاکتور عملکرد حرارتی حاصل از ۲.۲ را داشت.

قربانی و همکاران (۲۰۲۲) [۴۵] به بررسی مدل‌سازی دیجیتال تاثیر میکروکانال‌های موجدار در کاهش نوسانات دما در دستگاه‌های الکترونیکی پرداختند. این مطالعه بر روی پنج الگوی مختلف موجدار با دامنه و طول موج متغیر از ۶۲.۵ تا ۲۵۰ میکرومتر و ۱۲۵۰ تا ۵۰۰۰ میکرومتر به ترتیب متمرکز شد. هدف مطالعه مطالعه این است که چگونگی پدیده جریان در الگوهای موجدار بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی تأثیر می‌گذارد.



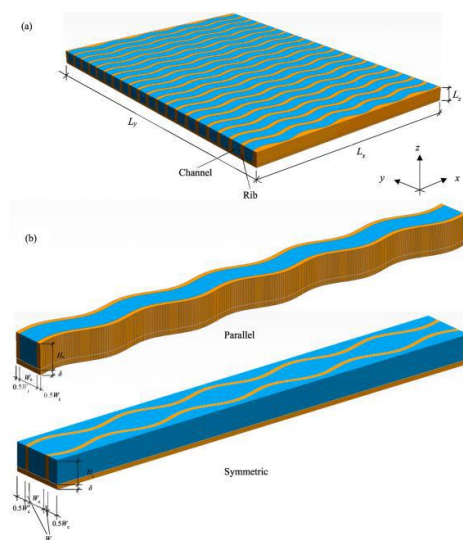
شکل ۲۵-۲: نمای بالایی یک بخش از (الف) میکروکانال راست، (ب) موجدار حالت ۱، (ج) موجدار حالت ۲، (د) موجدار حالت ۳، (ه) موجدار حالت ۴ و (و) موجدار حالت ۵ [۴۵]

در این مطالعه، هندسه میکروکانال تولید شده و به شکل سازمان یافته‌ای ترکیب می‌شود که در شکل ۲۶-۲ نشان داده شده است



شکل ۲۶-۲: نمودار شماتیک از کانال موجدار و شرایط مرزی مورد نظر [۴۵].

نتایج این مطالعه نشان داد که هندسه‌هایی که نسبت دامنه به طول موج بالاتری را نشان می‌دهند، شعاع انحنای کاهش یافته و گردابه دین بزرگتری را نشان می‌دهند. بنابراین، به دلیل افزایش جریان عرضی (جریان ثانویه)، این هندسه‌ها انتقال حرارت بهتری نشان دادند. علاوه بر این، با مقایسه نسبت بین جهت‌های سرعت عرضی و جهت‌های محوری، مشاهده شد که کاهش شعاع خمش و افزایش شماره دین، منجر به افزایش سرعت عرضی می‌شود. این پدیده انتقال حرارت بین دیوار و مایع را بهبود می‌بخشد. نتایج بررسی آنها نشان داد که جریان در میکروکانال با رینولدز بیشتر از ۲۳۰۰ در محدوده جریان متلاطم قرار دارد. شو-وانگ و همکاران (۲۰۲۲) [۴۶] از هیت سینک‌های میکروکانالی که شامل میکروکانال‌های موج‌دار همسان و موازی استفاده کردند. این تحقیق از یک مدل هم‌زمان سه بعدی سیال-جامد استفاده می‌کند و بازه گسترده‌ای از اعداد رینولدز را که از ۵۰ تا ۷۰۰ متغیر می‌باشند بررسی می‌کند. شکل ۲۷-۲ (الف) نمایی از هیت سینک میکروکانالی موج‌دار که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. هر هیت سینک شامل ۲۰ میکروکانال است و در هر میکروکانال، ۵ واحد موج‌دار وجود دارد. برای تنظیم موازی، فقط یک واحد مدل‌سازی می‌شود که در شکل ۲۷-۲ (ب) نشان داده شده است. برای تنظیم هم‌سان، دامنه محاسباتی از یک واحد و نیم تشکیل شده است.



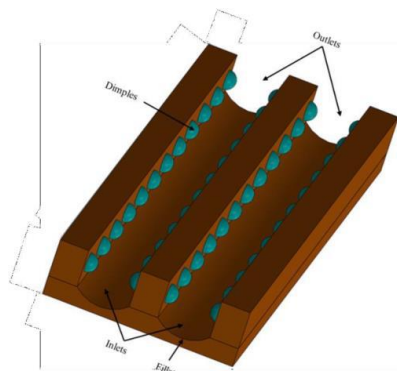
شکل ۲۷-۲: نمایی از (الف) هیت سینک میکروکانال موج‌دار و (ب) دامنه محاسباتی [۴۶].

نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی هم‌تقارن نسبت به پیکربندی موازی، به‌ویژه در اعداد رینولدز بالاتر و نسبت‌های بزرگ‌تر ارتفاع به طول موج، عدد نوسلت بالاتری دارد. این بهبود در انتقال حرارت می‌تواند به حضور چهار گردابه دین ناشی از پیکربندی هم‌تقارن در برش‌های عمود بر مسیر جریان بازگردد. به عبارت دیگر، پیکربندی هم‌تقارن تنها دو گردشگر دین ایجاد می‌کند که منجر به مخلوط‌شدن ضعیف‌تر سیال خنک‌کننده می‌شود و در نتیجه، عدد نوسلت کم‌تری دارد. باید توجه داشت که پیکربندی هم‌تقارن به دلیل وجود گلوهای کانال، با یک تنبلی فشار قابل توجه روبه‌رو می‌شود. بنابراین، عملکرد کلی پیکربندی هم‌تقارن کمی کم‌تر از پیکربندی موازی است. برای بهبود عملکرد خنک‌کننده‌های حرارتی کانال‌های میکرو موج‌دار، نسخه‌های اصلاح‌شده از پیکربندی‌های هم‌تقارن و موازی پیشنهاد شده‌اند. این پیکربندی‌های اصلاح‌شده شامل شکاف‌های عرضی در دیواره‌های داخلی موانع ها برای اتصال کانال‌های میکرو همسایه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که طراحی شاخه ثانویه به‌طور قابل‌توجهی عدد نوسلت در هر دو پیکربندی موازی و هم‌تقارن موج‌دار را بهبود می‌بخشد، به خاطر بهبود مخلوط‌شدن سیال بین کانال‌های میکرو

همسایه. علاوه بر این، پیکربندی اصلاح‌شده موازی تا حدی افزایش فشار را نسبت به پیکربندی موج‌دار اصلی تجربه می‌کند. با این حال، عملکرد کلی برای پیکربندی‌های اصلاح‌شده موازی به طرز چشم‌گیری بهبود می‌یابد. به طرز شگفت‌انگیزی، پیکربندی اصلاح‌شده هم‌تقارن با شاخه‌های ثانویه تجربه‌ای به چشم‌گیری در کاهش فشار ناشی از کانال‌های میکرو موج‌دار دارد. با این حال، اثر جذب گلوهای کانال ناشی از شاخه‌های ثانویه می‌تواند ضعف شدن گردابه‌های دین در ناحیه به‌ناحیه درون وادی‌ها را ضعیف کند و بنابراین تأثیر منفی بر عملکرد انتقال حرارت ایجاد کند، به ویژه برای خنک‌کننده‌های حرارتی با عدد رینولدز بزرگ‌تر و نسبت اندازه‌ی به‌موج‌طول بزرگ‌تر. به همین دلیل، توصیه می‌شود تا از پیکربندی‌های اصلاح‌شده موج‌دار هم‌تقارن با شکاف‌های عریض‌تر و نسبت اندازه به‌موج‌طول کوچک‌تر استفاده شود.

به طور خلاصه، به طور کلی پیکربندی اصلاح‌شده موازی موج‌دار نسبت به پیکربندی هم‌تقارن به‌نسبت عملکرد بهتری دارد.

اوکب و همکاران (۲۰۲۲) [۴۷] در این مطالعه، بر روی بررسی کارایی میکروکانال‌های حاوی دیمپل‌ها و پروفیل‌های فیله در سطح پایین می‌پردازد. دو اندازه مختلف برای دیمپل‌ها، به نام‌های ۰.۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر، قرار داده شده‌اند و میان میکروکانال‌ها با و بدون فیله‌ها قرار دارند. این تحقیق به خصوص شرایط جریان آرام را در بازه‌ی اعداد رینولدز از ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ مورد بررسی قرار می‌دهد. برای افزایش کارایی انتقال حرارت، اصلاحاتی در سطح کانال‌های پایینی و دیمپل‌ها با گنجاندن پروفیل‌های فیله و دیمپل‌ها کاهش یافته است. هر کانال شامل یک پروفیل فیله با عمق ۰.۵ میلی‌متر است. دیمپل‌ها به صورت افقی در طول دیواره‌های کانال قرار گرفته‌اند و فاصله‌ی یکسانی از هم دارند. به‌خصوص، دیمپل‌ها از نقطه‌ی ورود کانال ۱ میلی‌متر فاصله دارند. این تحقیق به بررسی شش حالت مختلف با هدف بهبود عملکرد حرارتی میکروکانال‌ها می‌پردازد. در این بررسی از دو اندازه مختلف برای دیمپل‌ها، به نام‌های ۰.۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر، به همراه دو تکنیک MC-D (میکروکانال با دیمپل) و MC-FP-D (میکروکانال با پروفیل فیله و دیمپل) استفاده شده است. این حالات اثربخشی استفاده از پروفیل‌های فیله، اندازه‌های مختلف برای دیمپل‌ها و تنظیمات میکروکانال ساده را ارزیابی می‌کنند همانطور که در شکل ۲۸ نشان داده شده‌اند.

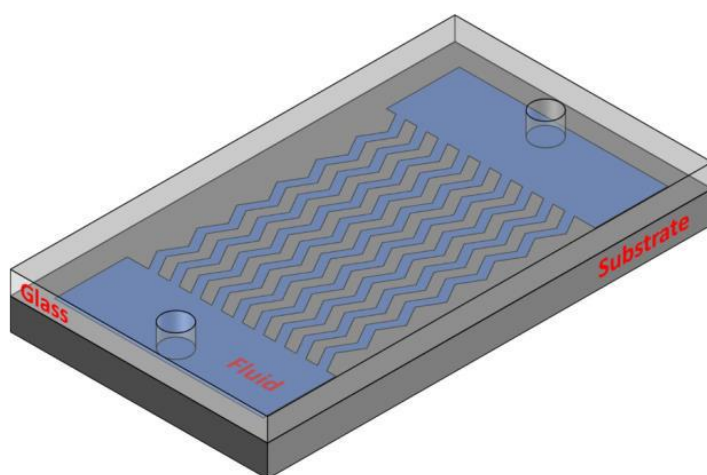


شکل ۲۸-۲: ناحیه میکروکانال‌ها با پروفیل فیلت و اندازه دیمپل ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد [۴۷].

نتایج نشان می‌دهد که حضور دیمپل‌ها و پروفیل فیلت تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی میکروکانال‌ها دارد. به‌طور خاص، میکروکانال‌هایی که دارای دیمپل‌های ۱ میلی‌متر هستند، نسبت به میکروکانال‌های ساده ۲۰ درصد بیشتر از عدد نسلیت برخوردار هستند. با این حال، این بهبود در انتقال حرارت به همراه افزایش ۱۰ درصدی در فشار کاهش یافته همراه است. از سوی دیگر، اضافه‌کردن پروفیل فیلت بر کارایی حرارتی میکروکانال‌ها تأثیر مثبتی دارد و باعث افزایش فشار نمی‌شود. ترکیب همزمان

دیمپل‌ها و پروفیل فیلت باعث بهبود چشم‌گیر عملکرد حرارتی می‌شود. در واقع، میکروکانال‌های مجهز به دیمپل‌های با اندازه ۱ میلی‌متر و پروفیل فیلت عدد نسلت را نشان می‌دهند که ۶۰ درصد بیشتر از میکروکانال‌های ساده هستند.

النعیمات و همکاران (۲۰۲۲) [۴۸]. در این مطالعه، عملکرد یک هیت سینک میکروکانال حافظه‌ی کمبودی با چندین میکروکانال زیگزاگ (MCHSzz) بررسی کردند. در این مطالعه، مقایسه‌ای بین عملکرد MCHS و MCHSzz مستقیم با محاسبه ضرایب نشان داده می‌شود. این بررسی بر روی مقاومت حرارتی کل (R_{th}) و توان پمپاژ (PPf) متمرکز است. به‌ویژه، مقاومت حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۲۹-۲ میکروکانال کامل MCHSzz را نشان می‌دهد.

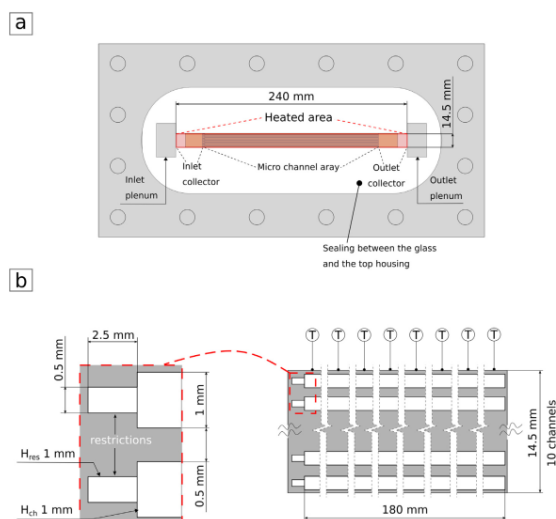


شکل ۲۹-۲: نمای شماتیک حرارت‌گیر میکروکانال زیگزاگ که از یک زیرلایه‌ی سیلیکونی در بالا و یک زیرلایه‌ی شیشه‌ای در پایین تشکیل شده است [۴۸]

براساس حالت‌های تحلیل‌شده در این مطالعه، مشاهده شده است که تغییر نسبی مقاومت حرارتی کل (R_{th}) در محدوده‌ای بین ۲۶٪ تا ۵۱٪ با افزایش عدد رینولدز (Re) متغیر می‌شود. همچنین، تغییر نسبی توان پمپاژ (PPf) نیز در بازه‌ای بین ۴۰٪ تا ۱۲۰٪ با افزایش Re متغیر است. استفاده از میکروکانال‌های زیگزاگ نشان می‌دهد که مقاومت حرارتی همگرای همبسته ($R_{th,cov}$) به طور قابل ملاحظه‌ای در یک مقدار خاص از Re کاهش می‌یابد. همچنین، این کار بر تأثیر قطر هیدرولیکی میکروکانال، جهت میکروکانال، تعداد واحدهای تکراری و فاصله میکروکانال‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشاهده شده است که با وجود پارامترهای هندسی، R_{th} کاهش یافته و PPf با افزایش Re افزایش می‌یابد. همچنین، R_{th} در ابتدا با افزایش پارامترهای هندسی برای یک مقدار خاص از عدد رینولدز کاهش می‌یابد تا مقدار آستانه‌ای که پس از آن تغییرات بیشتری رخ نمی‌دهد.

هدف اصلی مطالعه هالون و همکاران (۲۰۲۳) [۴۹] بررسی آزمایشگاهی الگوهای جریان دو فازی که در فرآیند جوشش جریان R245fa در آرایه‌ی میکروکانال‌ها اتفاق می‌افتد، می‌باشد. این مطالعه به دو نوع میکروکانال، شامل میکروکانال‌های بدون محدودیت و میکروکانال‌های دارای محدودیت ورودی با عرض ۰.۵ میلی‌متر، می‌پردازد تا تأثیر آن بر جریان بررسی شود. از یک دوربین با سرعت بالا برای مشاهده چهار الگوی متمایز جریان دو فازی استفاده می‌شود: جریان حبابی، جریان اسلگی، جریان چرن-حلقه‌ای و جریان حلقه‌ای. جریان‌های حبابی و اسلگی به عنوان جریان‌های متقطع دسته‌بندی می‌شوند، در حالی که

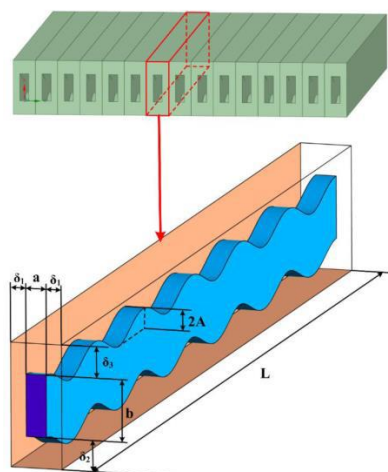
جریان‌های چرن-حلقه‌ای و حلقه‌ای به عنوان جریان حلقه‌ای دسته‌بندی می‌شوند. در این تحقیق، تشخیص کیفیت بخار انتقالی می‌تواند تغییر جریان از جریان متقطع به جریان حلقه‌ای را نشان دهد، و نحوه‌ی تأثیر آن توسط شار حرارتی، شار گرمی و دمای اشباع مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۳۰-۲: (a) نمای بالایی محل جایگذاری میکروکانال‌ها در پلاک. (b) هندسه‌ی آرایه‌ی میکروکانال‌ها [۴۹].

نتایج نشان می‌دهند که کیفیت بخار انتقالی با کاهش جرم جریان، افزایش جرم حرارتی یا افزایش درجه حرارت اشباع افزایش می‌یابد. جریان متناوب در هر دو ناحیه‌ی کنترل‌شده‌ی اجباری و ناحیه‌ی مسخول‌بازی باختری رخ می‌دهد، در حالی که جریان حلقوی، که معمولاً مرتبط با تسلط هدایت اجباری همراه است، همراه با هسته جوش مبدل حرارتی غالب رخ می‌دهد. میکروکانال‌ها با محدودیت‌ها هم رفتار مشابهی دارند، اما کیفیت بخار انتقالی در آن‌ها در مقادیر بالاتری رخ می‌دهد. مقایسه‌ی نتایج با چهار مدل ساخته‌شده برای کیفیت بخار انتقالی، مدل پیشنهادی توسط کوستا-پتری و توم (۲۰۱۳) پیش‌بینی بهتری ارائه می‌دهد، با (میانگین درصد مطلق خطا) (MAPE) محاسبه‌شده ۴۷.۹٪ برای هر دو هندسه‌ی مورد مطالعه.

مطالعه فیو و همکاران (۲۰۲۳) [۵۰] بر روی بهینه‌سازی چند هدفه هیت سینک‌های میکروکانال موجی از طریق ادغام محاسبات عددی، الگوریتم‌های پیش‌بینی و الگوریتم‌های ژنتیک تمرکز دارد. این مطالعه با شبیه‌سازی انتقال حرارت مزدوج مایع-جامد در فلوئنت برای هیت سینک‌ها با پارامترهای مختلف آغاز می‌شود. با استفاده از نتایج این محاسبات، یک مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی دقیق پارامترهای هدف با ترکیب پارامترهای متغیر و پارامترهای هدف آموزش داده می‌شود. شکل ۳۱-۲ یک مدل هیت سینک میکروکانالی موج را نشان می‌دهد و یک واحد واحد برای شبیه‌سازی عددی در این کار استخراج شده است.



شکل ۳۱-۲: سینک حرارتی میکروکانال موجدار و ساختار واحد [۵۰]

نتایج نشان می‌دهند که ضریب تعیین برای مدل‌های شبکه عصبی بیش از ۰.۸۵ است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل پیش‌بینی است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGA-II، مرزهای پارتو برای پارامترهای هدف مختلف به دست می‌آید که نشان می‌دهد کانال‌های با عملکرد بهینه مرتبط با عرض بزرگتر کانال یا عدد رینولدز بالاتر می‌باشند. علاوه بر این، این مطالعه یک ارتباط بین تفاوت دمای بی بعدی و شمار نوسلت برقرار می‌کند.

۳-۲ خلاصه‌ای پژوهشی

گرمای بیش از حد یکی از مهم‌ترین موانعی است که روبه‌روی پنل‌های فتوولتائیک قرار می‌گیرد و باعث می‌شود که عملکرد آنها متوقف شود به دلیل دمای بالای تابش خورشید به علاوه دمای محیط بالا. افزایش دما به طرز قابل توجهی باعث کاهش کارایی پنل‌ها می‌شود و تأثیر منفی بر ساختار و عمر مفید پنل‌ها دارد. گرما تأثیر قابل توجهی بر عملکرد پنل‌های فتوولتائیک (PV) دارد. هنگامی که پنل‌های PV با دماهای بالا مواجه می‌شوند، تغییراتی رخ می‌دهد که می‌تواند بر کارایی و عمر مفید آنها تأثیر بگذارد. برای کاهش این تأثیرات، مهم است که اطمینان حاصل شود پنل‌های فتوولتائیک به گونه‌ای نصب شوند که امکان خنک‌کنی مناسب فراهم شود. این می‌تواند از طریق استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده به دست آید؛ بنابراین، مسئله مطرح شده در این تحقیق ناشی از اهمیت خنک‌سازی سلول‌های فتوولتائیک است به منظور دستیابی به کارایی بالاتر در طول عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک و همچنین تأمین عمر عملیاتی بیشتر برای پنل‌های فتوولتائیک، بنابراین هدف اصلی این تحقیق نیاز فوری به کسب خنک‌کنی مناسب برای پنل‌های فتوولتائیک است. هدف از این تحقیق بهبود کارایی الکتریکی و کاهش نرخ از بین رفتن سلول‌ها در طول زمان است و این کاهش در نرخ از بین رفتن منجر به طولانی شدن عمر ماژول‌های PV می‌شود. با نگاهی به تحقیقات فوق و آگاهی از روش‌ها و طرح‌های پیشنهادی مقالات تحقیقاتی ذکر شده در بالا استفاده از میکروکانال با دیواره موجی و حضور موانع V شکل پرداخته نشده است.

۲-۴ اهداف پژوهش

اهمیت این تحقیق در امکان افزایش کارایی پنل‌های فتوولتائیک و افزایش تولید انرژی الکتریکی آنها با استفاده از کاهش دما و استفاده از سیستم خنک‌کننده پیشنهادی با استفاده از یک میکروکانال قرار دارد. در این مسئله، قسمتی از یک میکروکانال با دیواره‌های موجدار انتخاب و در جهت محوری موانع با شکل V درون کانال قرار خواهد گرفت. ابعاد هندسی موانع در شرایط مختلفی از طول موج بزرگی کانال موجدار بر روی انتقال حرارت از کانال ارزیابی خواهد شد. حضور موانع با شکل V می‌تواند در ایجاد جریان فرعی و افزایش انتقال حرارت از دیواره‌ها به کمک کند. هدف این مطالعه افزایش کارایی الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک است که با استفاده از میکروکانال‌های طراحی شده با یک طرح جدید شامل میکروکانال با دیواره‌های موجدار و موانع‌های V شکل و تأثیرات این طرح جدید میکروکانال‌ها در رادیاتور حرارتی بررسی خواهد شد. بنابراین در این تحقیق، با استفاده از شبیه‌سازی عددی تأثیر موانع V شکل در بهبود انتقال حرارت بررسی خواهد شد. بطور کلی جهت بررسی جریان در آرام و مغشوش در دو عدد ری نولدز ۵۰۰ و ۵۰۰۰، سه متغیر هندسی در نظر گرفته شده است:

- نسبت ارتفاع مانع به ارتفاع کانال (h/H)

- زاویه دهانه V شکل

- تعداد مانع در هر طول موج

نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد یکی از روشهای غیر فعال افزایش انتقال حرارت در میکروکانال‌ها تغییر در شکل هندسی آن است. از این رو تحقیقات بر روی عملکرد میکروکانال با دیوار موجی در چند سال اخیر خیلی مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات گذشته به بررسی اثر طول موج، دامنه و همچنین استفاده از نانوسیال متمرکز شده و چند کار محدود نیز به تأثیر استفاده از پین فین نیز در میکروکانال اشاره می‌کند. با توجه به بررسی این مطالعات، تاکنون هیچ کاری در ارتباط با تأثیر موانع V شکل بر روی عملکرد میکروکانال با دیوار موجی مشاهده نشده است. لذا در این مطالعه به تأثیر این موانع بر روی عملکرد دیوار موجی پرداخته خواهد شد. در این بررسی به تأثیر ارتفاع موانع، تعداد موانع، زاویه V شکل در دو رژیم جریان آرام و درهم پرداخته خواهد شد. در ادامه در فصل سوم به روش حل و در فصل چهارم به نتایج حاصل از این تحقیق اشاره می‌گردد.

فصل ۳

روش تحقیق

۱-۳ مقدمه

در این فصل به شرح معادلات حاکم بر سیال و انتقال حرارت، روش‌های عددی بکار رفته، فرضیات حاکم بر مسئله و دامنه محاسباتی در این پژوهش، پرداخته خواهد شد. در انتها متغیرها و اعداد بی‌بعد دخیل در مسئله معرفی و بطور کامل بررسی خواهد شد.

۲-۳ مدل‌سازی عددی

دینامیک سیالات محاسباتی^۱ به عنوان علمی مورد نظر است که به کامپیوترها کمک می‌کند تا محاسبات کمی جریان سیال را تولید کنند. این محاسبات شامل حرکت سیال و قوانین پایستگی می‌شود و به عنوان ابزارهای پایه‌ای برای طراحی و توسعه برنامه‌های مهندسی در نظر گرفته می‌شود. دینامیک سیالات محاسباتی به دلیل استفاده از پیش‌بینی جریان داخلی و توسعه‌ی دقیق‌تر کامپیوترها و نزدیک‌تر به واقعیت، به عنوان کار ضروری برخی از محققان در سراسر جهان تبدیل شده است. یکی از پیشرفته‌ترین کدهای تجاری تولید شده جهت حل معادلات مذکور، نرم افزار تجاری فلوئنت^۲ می‌باشد. از این نرم افزار بعنوان ماشین حساب پیشرفته در حل بسیاری از مسائل به منظور دستیابی به نتایج مؤثر برای مدل‌های مختلف استفاده می‌شود. تکنیک حل برنامه بر مبنای تئوری حجم کنترل متمرکز شده است که معادلات حاکم را به معادلات جبری تبدیل می‌کند تا آن‌ها را حل کند. تکنیک حجم کنترل به وسیله‌ی ادغام معادلات حاکم برای هر حجم کنترل عمل می‌کند و سپس تجزیه و تحلیل معادلات را ایجاد می‌کند، که مقادیر هر مقدار را بر اساس حجم کنترل حفظ می‌کند [۵۱].

¹ Computational Fluid Dynamics

² Fluent

۳-۲-۱ معادلات حاکم

توصیف حرکت سیال در لوله برای حالت آشفته از طریق حل معادله دیفرانسیل میانگین جرم (پیوستگی) و معادله ی مومنوم به علاوه معادله مدل (k-ε) انجام می‌شود [۵۲]. جریان آشفته به وسیله ی میدان سرعت نوسانی مشخص می‌شود. در توصیف جریان آشفتگی به صورت ریاضی، مناسب است آن را به حرکت میانگین و حرکت نوسان یا گردابی تقسیم کنیم. معادلات حاکم بر جریان مغشوش سیال در حالت سه بعدی در فرم زیر نشان داده شده است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (۱-۳)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \quad (۲-۳)$$

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad (۳-۳)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad (۴-۳)$$

$$\rho(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = \alpha(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) \quad (۵-۳)$$

معادله (۱-۳) بعنوان معادله پیوستگی شناخته می‌شود. در معادلات (۲-۳) تا (۵-۳) بقای اندازه حرکت در سه راستای اصلی مختصات دکارتی معرفی شده است، که در آن‌ها به ترتیب u سرعت در جهت محور x، v سرعت در جهت y و w سرعت در جهت محور z می‌باشد.

در میان مدل‌های مغشوش ارائه شده توسط نرم‌افزار، مدل آشفته $k - \epsilon$ استاندارد طبق پیشنهاد پژوهش‌های پیشین [۴۵] مورد استفاده قرار گرفته است. مدل آشفتگی $k - \epsilon$ مدلی دو معادله ای است. مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای را می‌توان زیر بنای بسیاری از مطالعات در حوزه جریان‌های توربولانس نامید. مدل $k - \epsilon$ در عین ساده بودن، تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که منجر به استفاده از آن در اغلب شبیه سازی‌ها می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (۶-۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \epsilon u) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) + \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7-3)$$

که در آن مقادیر μ_t و G_k از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\mu_t = \rho c_p \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8-3)$$

$$G_k = -\overline{\rho v' u} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (9-3)$$

در این معادلات مقادیر $C_{1\epsilon}$ و $C_{2\epsilon}$ ثابت هستند. مقادیر σ_k و σ_ϵ عدد پراشتل آشفته متناسب با k و ϵ هستند. سایر مقادیر مدل آشفته مدنظر شامل C_μ ، $C_{\epsilon 1}$ ، $C_{\epsilon 2}$ ، σ_k و σ_ϵ به ترتیب ۰.۰۹، ۱.۴۴، ۱.۹۲، ۱.۳ و ۱.۳ در نظر گرفته شده‌اند [۵۲].



شکل ۳-۱ کانال موجی انتخاب شده براساس پژوهش قربانی و همکاران [۴۵] با طول موج ۲۵۰۰ میکرومتر و دامنه موج ۲۵۰ میکرومتر

۳-۲-۲ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

در این مسئله هندسه موجی شکل به همراه حضور موانع^۱ در نظر گرفته شده است. مقطع هندسی کانال مسطح شکل به ابعاد ارتفاع ۴۰۰ میکرومتر و عرض ۲۱۶ میکرومتر مطابق با پژوهش قربانی و همکاران [۴۵] در نظر گرفته شده است. در این تحقیق تلاش شده است تا با افزودن موانع در مسیر جریان میزان تغییرات نرخ انتقال حرارت و افت فشار مورد مطالعه قرار گیرد. از این رو از بررسی تاثیرات شعاع انحنا و طول موج کانال موجی شکل صرف نظر شده است. با توجه به نتایج پژوهش قربانی و همکاران [۴۵] بهترین اندازه برای طول و دامنه موج کانال، مقادیر به ترتیب ۲۵۰۰ میکرومتر و ۲۵۰ میکرومتر معرفی شده است. لذا جهت پیشبرد پژوهش حاضر، از این مقادیر بعنوان حالت پایه ساختار هندسی استفاده شده است. موانع شامل هندسه‌های V شکل می‌باشد که در مسیر کانال قرار گرفته و تا بیشینه ارتفاع، نصف ارتفاع کانال مسیر جریان را مسدود خواهد کرد. از این رو به منظور کنترل حجم محاسبات و افزایش دقت حل و استقلال از طول توسعه یافتگی، در این پژوهش از شرایط مرزی پریودیک^۲ استفاده شده است تا اهداف مد نظر با بهینه‌ترین بار محاسباتی محقق گردد. همچنین دمای پایه برای ورود به کانال ۳۰۰ کلون در نظر گرفته شده است. دبی ورودی متناسب با رینولدزهای ۵۰۰ و ۵۰۰۰ در دو حالت آرام و مغشوش بعنوان دبی پایه بر روی شرایط پریودیک اعمال شده است. دیواره کف کانال، محل قرار گیری موانع می‌باشد و شرط

^۱ Ribs

^۲ Periodic Boundary Condition

مرزی عدم لغزش^۱ و شار حرارتی ثابت به میزان ۲۴۰ وات بر سانتی متر مربع بر آن اعمال می‌شود. سایر دیواره‌ها نیز عایق حرارتی بوده و از شرط عدم لغزش پیروی خواهند نمود. بطور خلاصه در جدول ۳-۱ شرایط مرزی مسئله پیش رو نشان داده شده است.

جدول ۳-۱ شرایط مرزی مفروض در مسئله

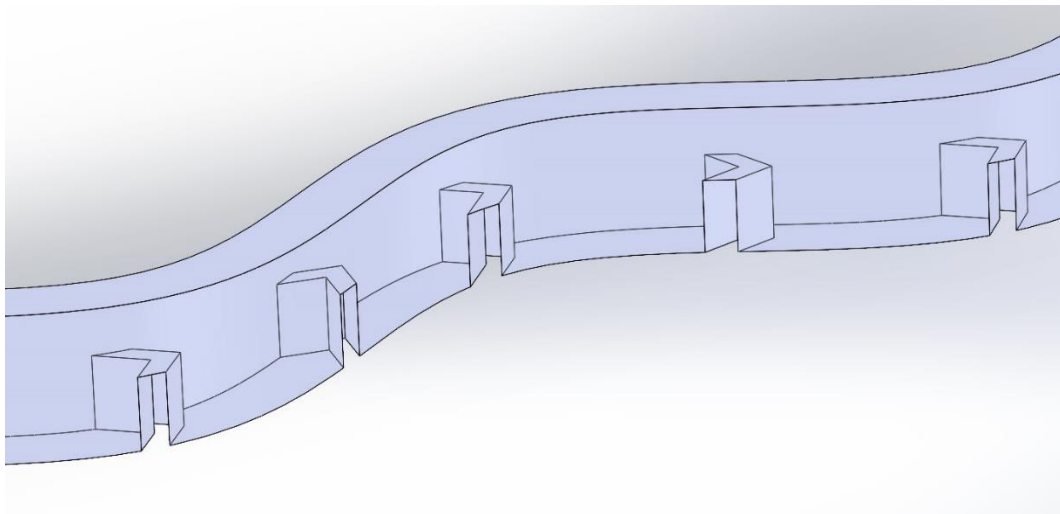
شرایط مرزی سیالاتی	شرط مرزی حرارتی	مرز
شرط مرزی پریودیک	دمای ورودی	ورودی
شرط مرزی پریودیک	دمای ورودی	خروجی
شرط عدم لغزش	شار ثابت	دیواره کف کانال
شرط عدم لغزش	آدیاباتیک	سایر دیواره‌های کانال

۳-۲-۳ موانع

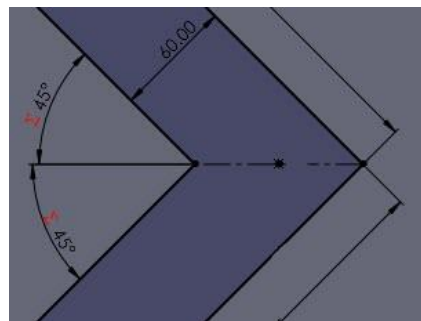
بحث اصلی در این پژوهش بررسی اثر موانع بر میزان انتقال حرارت و افت فشار در کانال می‌باشد. از این رو پیش بینی می‌شود ارتفاع مانع، زاویه دهانه موانع V شکل و همچنین تعداد مانع بر سر جریان، اثر بسزایی بر مولفه‌های مذکور داشته باشند. ضخامت مانع در تمامی حالت‌ها مقدار ثابت ۶۰ میکرومتر فرض شده است. زاویه مذکور، زاویه محور مرکزی کانال است. این مقدار در شکل ۳-۲ و شکل ۳-۳ نشان داده شده است. بطور کلی سه متغیر بی بعد اصلی در این مسئله بررسی شده است:

- تعداد مانع بر حسب یک طول موج ($N = 1, 2, 4$)
- زاویه مانع ($\varphi = 45, 60, 75, 90$)
- ارتفاع نسبی مانع ($\frac{h}{H} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)

¹ No Slip Condition



شکل ۳-۲ نمای سه بعدی موانع قرار گرفته در کانال در زاویه ۴۵ درجه



شکل ۳-۳ نمایش اندازه‌های دقیق مرتبط با موانع

۳-۳ اعداد بی‌بعد

پدیده‌های فیزیکی مختلف در سیستم میکروکانال با یکدیگر همکاری می‌کنند. اعداد بدون بعد نسبت این پدیده‌های رقیب را نشان می‌دهند و مقایسه ساده‌تری را برای سیستم‌های مختلف ارائه می‌دهند [۵۳]. در اینجا ما به اعداد بدون بعد فقط مربوط به این پایان نامه اشاره می‌کنیم. عدد رینولدز (Re)، شرایط جریان را مشخص می‌کند و به عنوان نسبت نیروی اینرسی به ویسکوز در جریان تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (۳-۱۰)$$

که ρ چگالی سیال، v سرعت سیال، و $D_h = (2wh)/(h + w)$ قطر هیدرولیکی است، که در آن h و w به ترتیب ارتفاع و عرض کانال هستند.

پارامترهای بی‌بعد بعدی که در محاسبات مورد توجه قرار خواهند گرفت نسبت منظر^۱ کانال است. این پارامتر نمایانگر نسبت ارتفاع به عرض کانال می‌باشند که در معادله (۱۱-۳) مشهود است.

$$AR = \frac{h}{H} \quad (11-3)$$

برای ارزیابی عملکرد حرارتی، پارامترهای ارزیابی عملکرد مانند عدد ناسلت^۲، ضریب اصطکاک^۳ و معیار ارزیابی عملکرد^۴ مورد بررسی قرار می‌گیرند، که رابطه آن‌ها به شرح زیر ارائه شده است. نخستین شاخص عملکرد، عدد ناسلت میانگین است که به وسیله‌ی معادله (۱۲-۳) داده می‌شود:

$$Nu_{avg} = \frac{1}{L_{ch}} \int_{L_{ch}} Nu_x dx \quad (12-3)$$

که در آن L_{ch} طول کانال و Nu_x مقدار عدد ناسلت متوسط می‌باشد که از رابطه (۱۳-۳) محاسبه می‌گردد.

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k_f} \quad (13-3)$$

جهت محابه و درک میزان افت فشار ناشی از افزودن موانع در مسیر جریان، از ضریب اصطکاک بدین منظور استفاده می‌گردد.

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho_f L_{ch} u_{avg}^2} \quad (14-3)$$

که در آن u_{avg} سرعت متوسط جریان ورودی است و مقدار آن از رابطه (۱۵-۳) محاسبه می‌گردد.

$$u_{avg} = \frac{\int A_c u dA_c}{A_c} \quad (15-3)$$

به منظور بررسی همزمان عملکرد هیدرولیکی و حرارتی یا به عبارت کلی عملکرد کلی کانال معیار ارزیابی عملکرد طبق رابطه (۱۶-۳) معرفی می‌گردد. در این رابطه عملکرد نمونه‌های جدید با نمونه کانال موجی پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد تا دید بهتری نسبت به تغییرات حاصله بوجود آید.

¹ Aspect ratio

² Nusselt Number

³ Friction Factor

⁴ Performance evaluation parameter

$$PEC = \frac{Nu_{wavy} / Nu_{wavy,REF}}{(f_{wavy} / f_{wavy,REF})^{1/3}} \quad (3-16)$$

محدوده اعداد بی بعد بکار رفته در این پایان‌نامه در جدول ۲-۳ به تفصیل بیان شده است.

جدول ۲-۳: محدوده اعداد بی‌بعد بکار رفته در این تحقیق

اعداد بدون بعد	محدوده مورد بررسی
Re	۵۰۰، ۵۰۰۰
AR	۰.۱-۰.۵

فصل ۴

نتایج و بحث‌ها

۴-۱ مقدمه

در این فصل به تحلیل و بررسی نتایج خواهیم پرداخت. نتایج مد نظر شامل تغییرات عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و معیار عملکرد متناسب با تغییر وضعیت موانع در کانال موجی است.

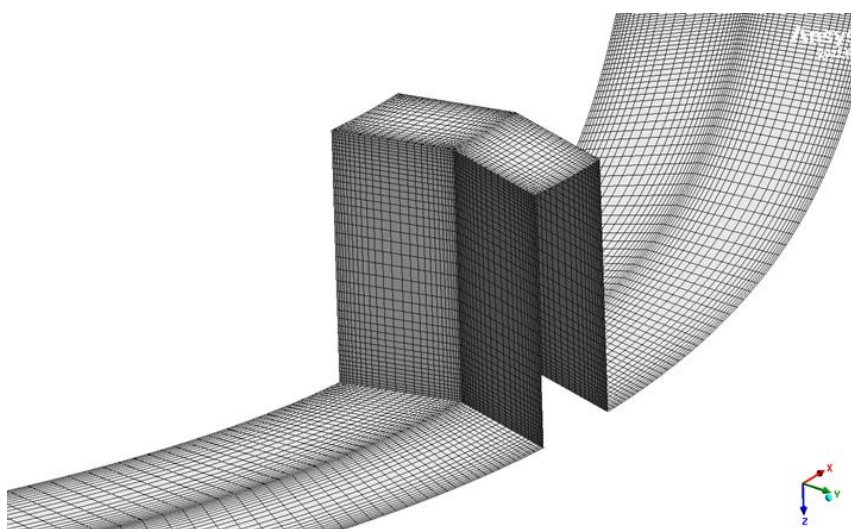
۴-۲ شبیه سازی عددی

در این بخش به تفصیل به بیان روش عددی مورد استفاده، اعتبارسنجی برای کانال‌های صاف با حضور موانع، اعبارسنجی کانال موجدار، بررسی استقلال حل از شبکه و گزارش نتایج و تحلیل آن‌ها خواهیم پرداخت. بطور کلی حل عددی شامل مراحل چندگانه زیر است:

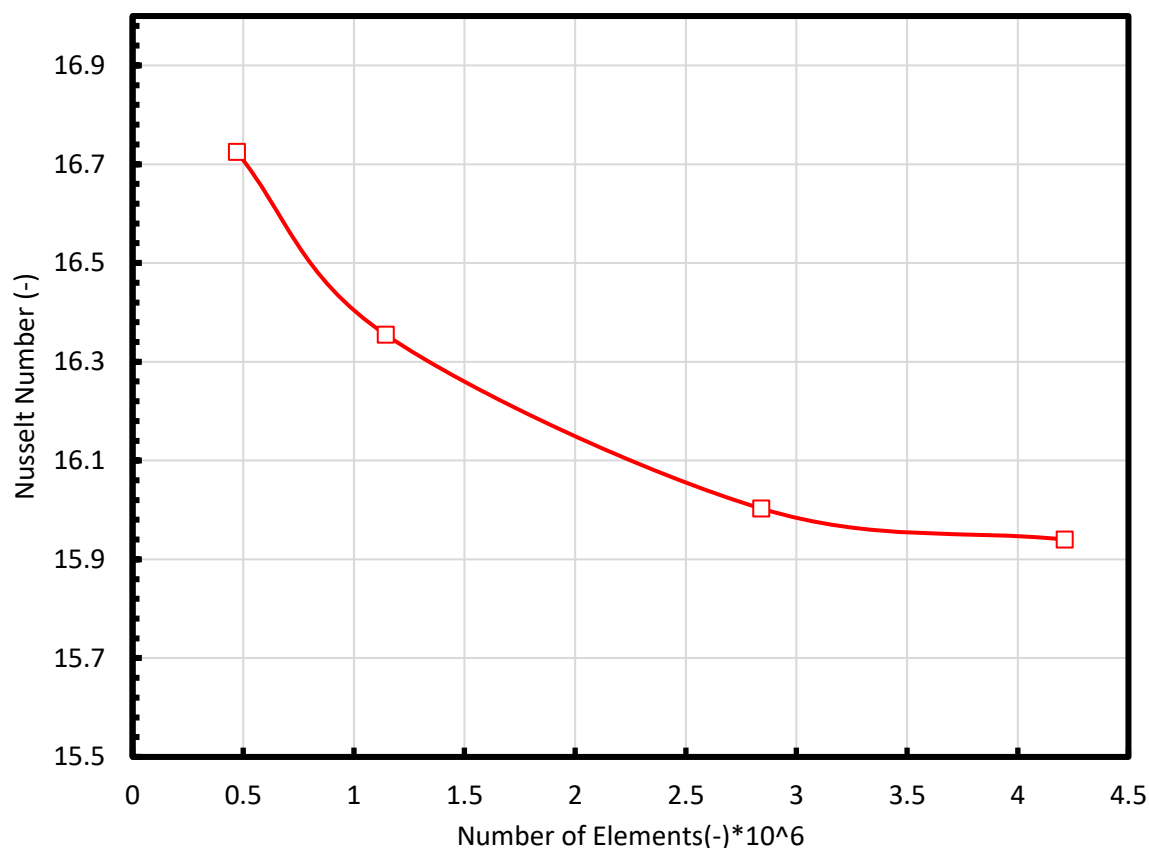
۱. شبیه سازی عددی یک کانال صاف همراه با موانع با زاویه ۹۰ درجه در آن به منظور اعتبارسنجی بر پایه حضور موانع
۲. شبیه سازی عددی مرتبط با کانال موجدار بدون مانع و با در نظر گرفتن شرط مرزی پرئودیک به منظور بررسی این روش جهت کاهش بار محاسباتی.
۳. ترکیب روش اول و دوم، تولید هندسه با موانع ۷ شکل و پیاده سازی مدل عددی مرتبط جهت رفتارشناسی جریان گذار در کانال.
۴. ارائه بهترین حالت بر اساس میزان انتقال حرارت، افت فشار و در نهایت معیار عملکرد کلی سیستم.

۳-۴ استقلال حل از شبکه

برای اطمینان از عدم وابستگی شبکه به حل، سه شبکه محاسباتی با چگالی مش (Y) (عرض کانال) $\times Z$ (ارتفاع کانال) $\times X$ (طول کانال) به ترتیب اندازه‌های $44 \times 52 \times 50$ ، $50 \times 80 \times 71$ و $60 \times 90 \times 78$ در نظر گرفته شده است. عدد ناسلت به عنوان شاخص اصلی عملکرد تبادل حرارتی برای هر یک از شبکه‌های مذکور محاسبه شده و در شکل ۴-۲ ارائه شده است. میانگین تفاوت بین شماره نوسلت میانگین شبکه اول و چهارم ۴.۵۱٪ است که با افزایش بیشتر اندازه شبکه و برای شبکه‌های سوم و چهارم، این تفاوت به ۰.۴٪ کاهش یافته است. با توجه به دقت نتایج و همچنین صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های محاسباتی، از شبکه سوم (با اندازه ۲,۸۴۰,۰۰۰ سلول) در این مطالعه استفاده شده است. شکل ۴-۳ و شکل ۴-۱، مش مورد استفاده برای هندسه‌های تخت و موجدار را نمایش می‌دهد.



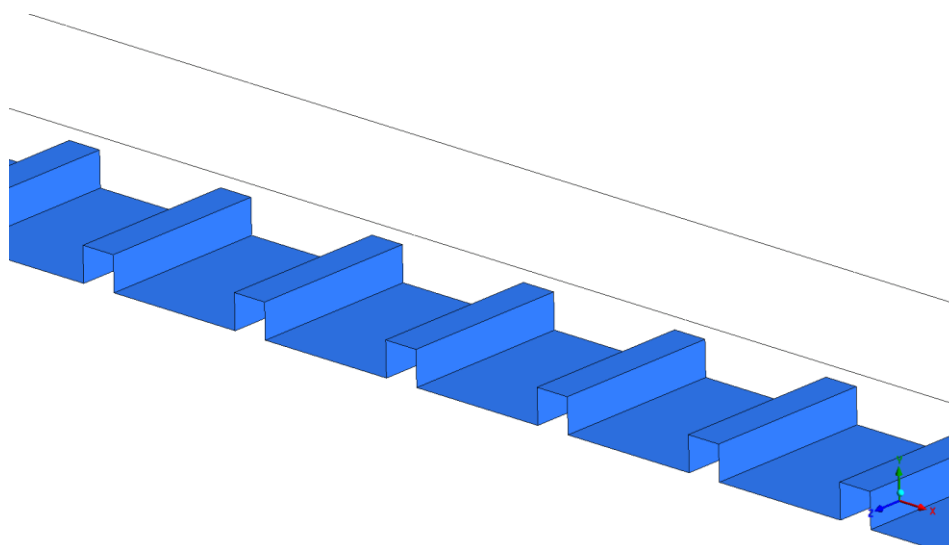
شکل ۴-۱ شبکه سازمان یافته تولید شده جهت گسسته سازی دامنه محاسباتی



شکل ۲-۴ نمودار استقلال حل از شبکه.

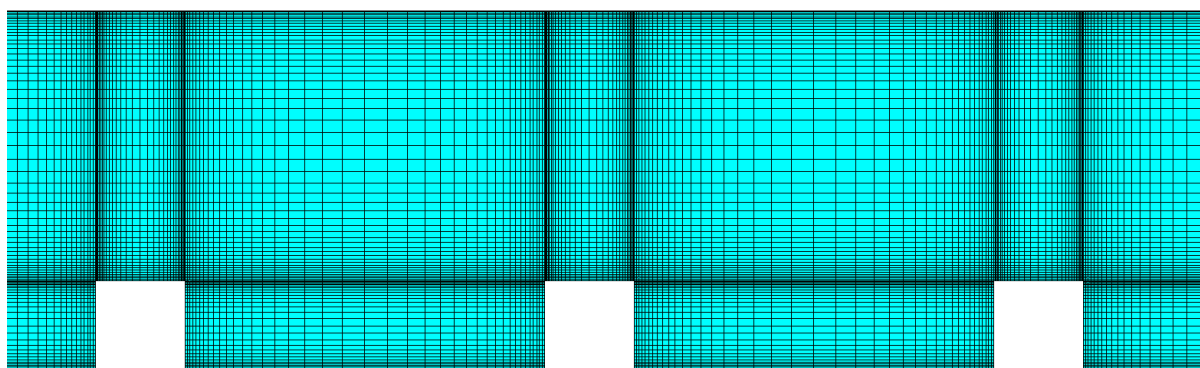
۴-۴ اعتبارسنجی کانال صاف با حضور موانع ۹۰ درجه

جهت اعتبارسنجی روش عددی استفاده شده، نتایج کار حاضر با پژوهش بن لو و همکاران [۵۴] مقایسه شده است. در این مقاله به بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان در کانال با سطح داغ ریب دار، اثر زاویه‌های مختلف ریب نسبت به جریان و مدل‌های آشفتة SST $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ RNG بررسی شده است. همچنین در این مقاله از نظر هندسی دو اندازه کانال $4 \times 39.3 \times 39.3$ میلی‌متر مکعب و $4 \times 10 \times 40$ میلی‌متر مکعب برای مقطع ورودی در نظر گرفته شده است و علاوه بر زاویه ریب نسبت به جریان فواصل مختلف ریب از ۱ تا ۶ میلی‌متر نیز بررسی شده است. اعتبارسنجی حاضر بر اساس هندسه کانال با اندازه $4 \times 10 \times 40$ میلی‌متر مکعب، زاویه ریب ۹۰ درجه و فاصله بین ریب‌ها ۴ میلی‌متر انجام شده است (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ نمایش دامنه محاسباتی و دیواره ریب‌دار طبق پژوهش لو و همکاران [۵۴]

در این مدلسازی از شبکه‌های باسازمان^۱ استفاده شده است تا ضمن کاهش تعداد شبکه‌های مورد نیاز با افزایش کیفیت متغیرهایی نظیر تعامد شبکه دقت نتایج نیز افزایش یابد. همچنین به دلیل استفاده از مدل مغشوش $k-\varepsilon$ RNG، تراکم شبکه به منظور کنترل y^+ در کنار دیواره‌ها افزایش یافته است. در بخش بندی^۲‌های انجام شده در هندسه به سمت دیواره‌ها با نرخ رشد^۳ ۵ شبکه‌ها ریزتر می‌شوند. این نکته در قابل مشاهده است.

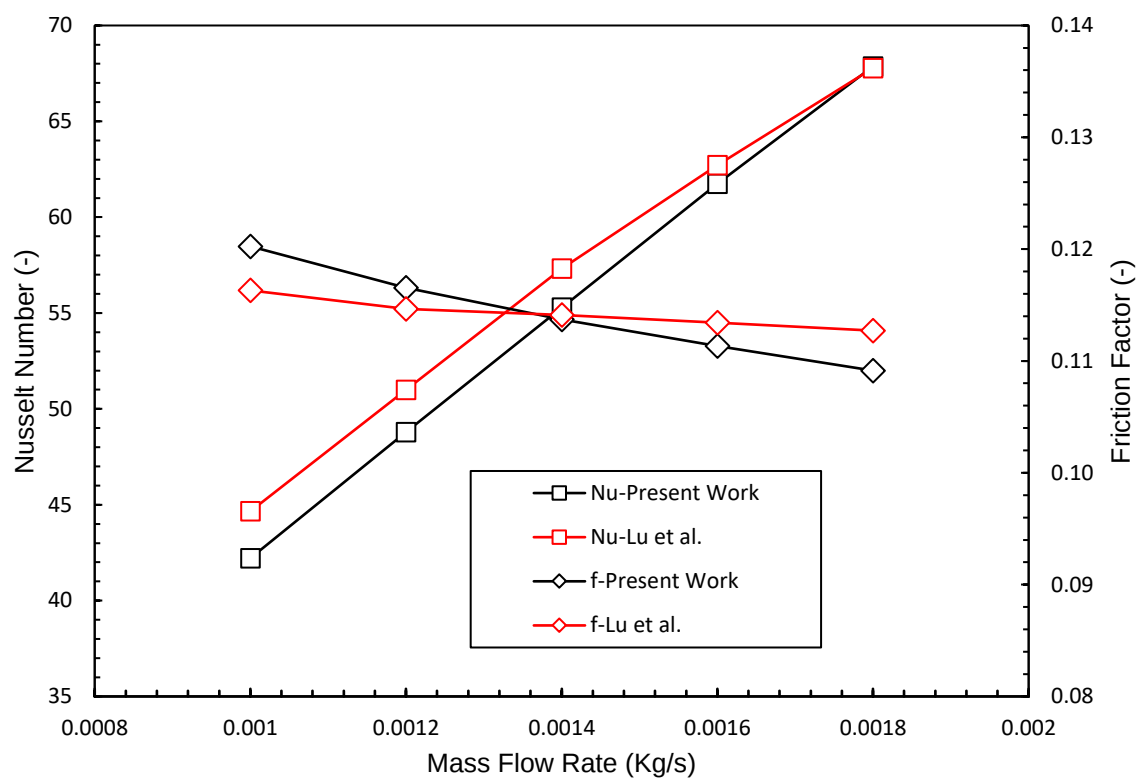


شکل ۴-۴ نمایش شبکه‌های تولید شده جهت اعتبارسنجی کانال صاف ریب‌دار

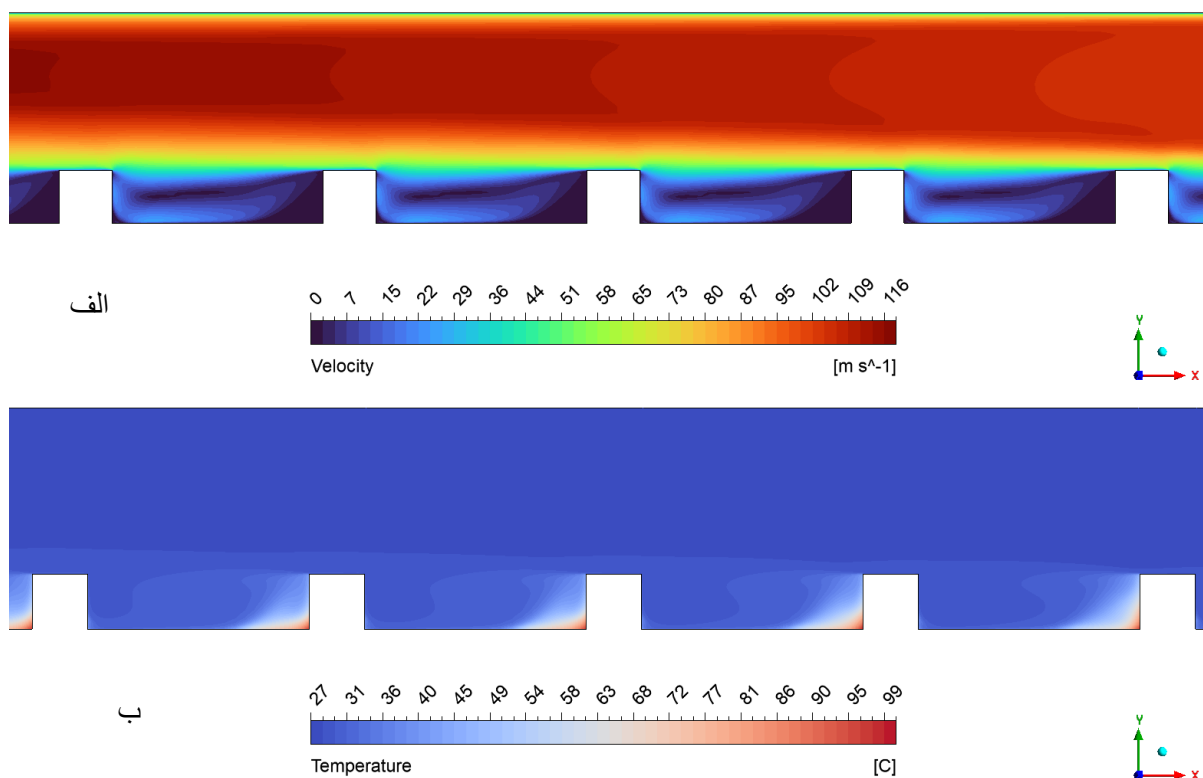
^۱ Structured mesh

^۲ MultiBlock

^۳ Bias Factor



شکل ۴-۵ نمودار مقایسه نتایج عددی حاضر با نتایج پژوهش لو و همکاران [۵۴].



شکل ۴-۶ الف) توزیع سرعت در مقطع طولی در میان کانال ب) توزیع دما در مقطع مذکور برای حالت کانال صاف ریب‌دار

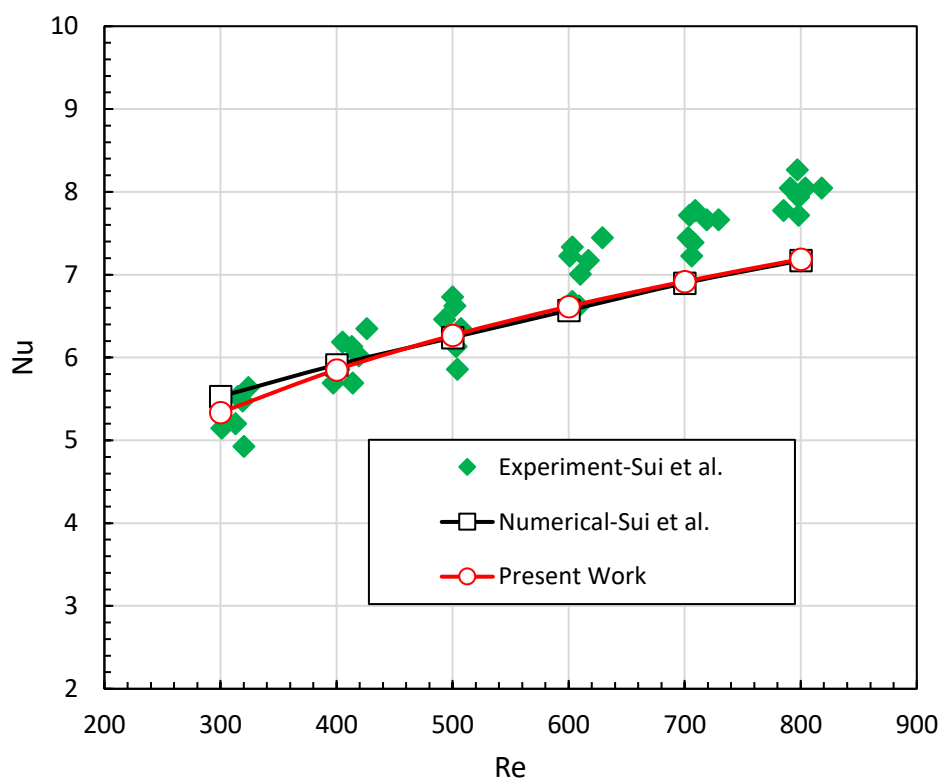
در این مدل عددی جریان ورودی با سرعت و دمای ثابت از مرز ورودی وارد دامنه شده است. شرط مرزی خروجی فشار بعنوان مرز خروجی دامنه در نظر گرفته شده است. همانند مسئله اصلی، دیواره کف کانال ریب دار شده و شار حرارتی ثابت روی آن اعمال گشته است و سایر دیواره‌ها از نظر حرارتی عایق می‌باشند. لازم به ذکر است همه دیواره‌ها از شرط عدم لغزش پیروی می‌کنند. در این مدل‌سازی‌ها از سیال آب استفاده و خواص آن در جدول ۴-۱ گزارش شده است.

جدول ۴-۱: خواص سیال و ذرات استفاده شده در شبیه‌سازی

ماده	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$c_p \left(\frac{J}{kgK} \right)$	$k \left(\frac{W}{mK} \right)$	$\mu (Pa.s)$
آب	۹۹۸.۲	۴۱۸۲	۰.۶	۰.۰۰۱۰۰۳

۴-۵ اعتبارسنجی کانال صاف بدون حضور مانع

در ادامه جهت افزایش اطمینان از جنبه‌های مختلف مدل سازی عددی به مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی خواهیم پرداخت تا اطمینان قطعی از صحت روش عددی حاصل گردد. این اعتبارسنجی براساس نتایج پژوهش کار آقای سوی [۲۵] انجام شده است. این پژوهش مبنای اعتبار سنجی سایر پژوهش‌ها در زمینه کانال‌های موجدار است. در این راستا سایر پژوهش‌های مذکور جهت اعتبارسنجی از کانال موجدار با دامنه موج صفر (کانال صاف) استفاده کرده‌اند به همین جهت در کار حاضر نیز به تبعیت از سایر پژوهش‌های ارائه شده از کانال صاف استفاده شده است. از نظر ابعاد هندسه کانال حاضر با کانال قبلی یکسان است. تنها تفاوتی که این مدل با مدل قبلی دارد در شرایط مرزی آن است. شرط مرزی ورودی برخلاف کار قبلی از مرز پرپودیک استفاده شده است. میزان خطای محاسبه شده کمتر از ۴٪ می‌باشد.



شکل ۴-۷ نمودار مقایسه نتایج جهت اعتبارسنجی

۶-۴ نتایج مدل‌سازی عددی

در این بخش نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در سه بخش اصلی مرتبط با متغیرهای ارتفاع ریب، تعداد ریب و زاویه ریب دسته بندی و ارائه خواهد شد.

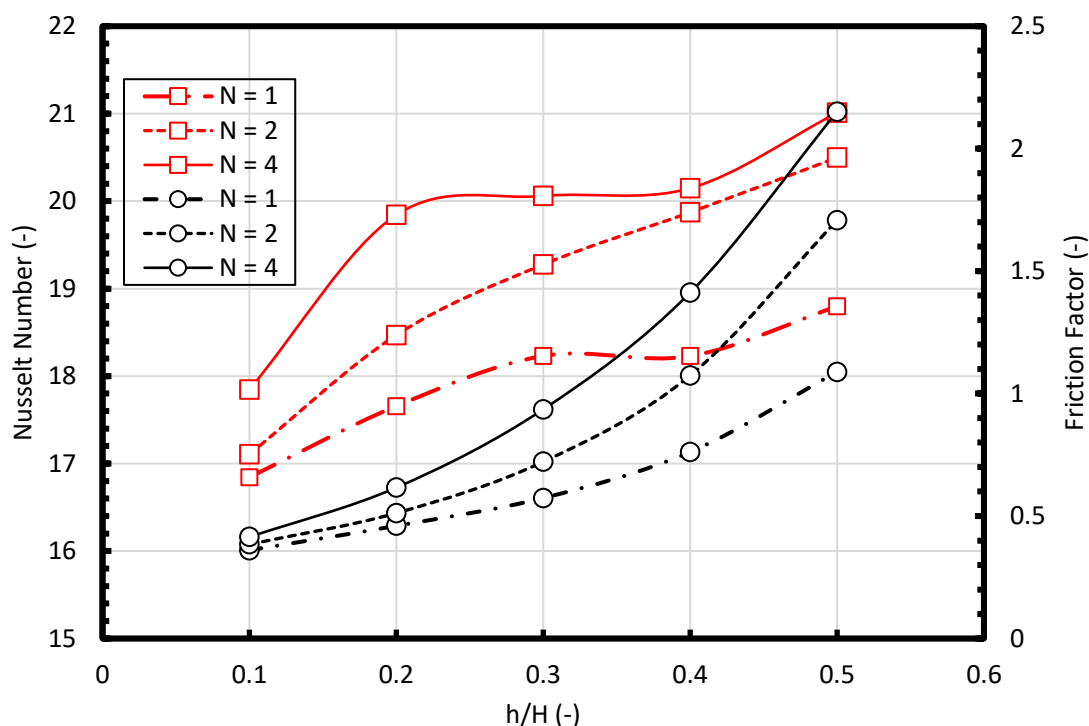
۴-۶-۱ زاویه ۴۵ درجه

محل قرارگیری ریب‌ها در سه حالت می‌باشد:

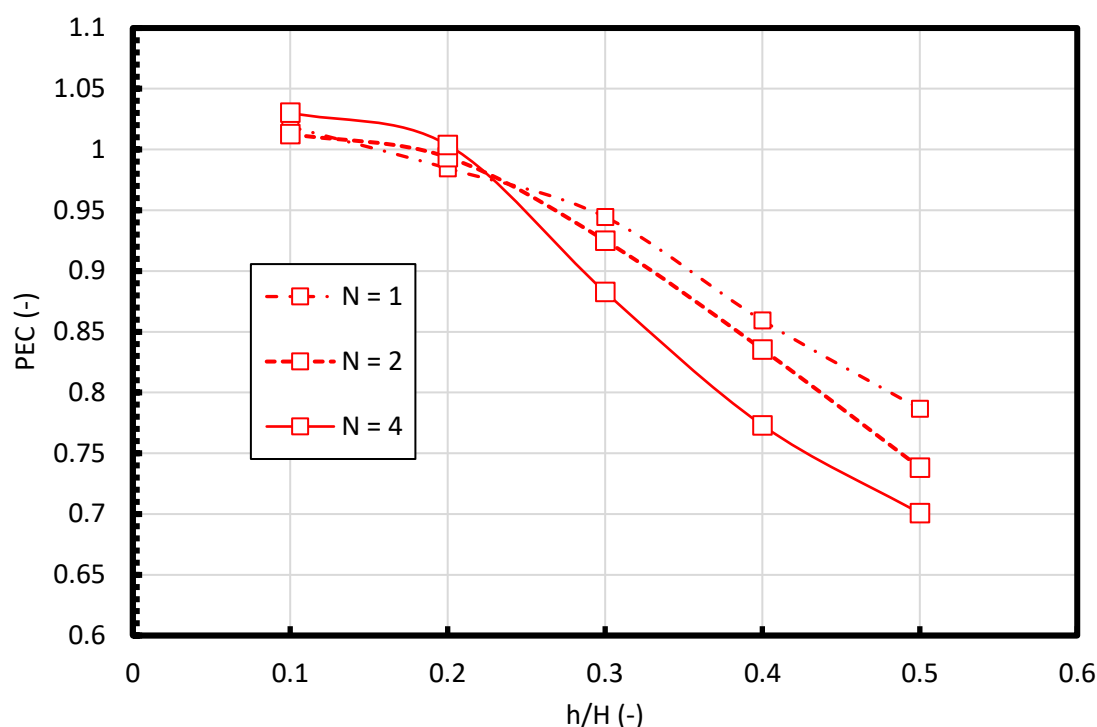
- پادگره‌های بالایی موج (فقط قله)
- تمامی پادگره‌ها (قله و دره)
- پادگره و گره (تمامی نقاط روی موج با اختلاف فاز ۴۵ درجه)

تعداد ریب‌ها در یک طول موج برای سه حالت مذکور به ترتیب برابر است با ۱، ۲ و ۴ ریب. متناسب با افزایش تعداد ریب در مسیر جریان سطح مقطع مفید جهت انتقال حرارت افزایش خواهد یافت. از این رو انتظار می‌رود با افزایش تعداد ریب شاهد افزایش میزان انتقال حرارت و بطور مشخص عدد ناسلت باشیم. از طرفی افزایش تعداد ریب‌ها موجب کاهش سطح مقطع در نواحی مختلف شده و ایجاد موانع بیشتر، افزایش فشار را در پی خواهد داشت. همانطور که در شکل ۸-۴ نشان داده شده است،

افزایش تعداد موانع از ۱ مانع بر طول موج تا ۴ عدد موجب افزایش عدد ناسلت بطور متوسط تا حدود ۲۵٪ نسبت به حالت پایه خواهد شد. از طرفی افت فشار رشد بیشتری بطور متوسط حدود ۴۵٪ را نشان می‌دهد. همین امر موجب می‌شود تا معیار عملکرد با افزایش تعداد کاهش بیشتری را تجربه نماید. این کاهش از نسبت منظر ۰.۲ به بعد کاملاً واضح است (شکل ۹-۴). با افزایش ارتفاع نیز سطح مقطع انتقال حرارت افزایش خواهد داشت. از این رو افزایش عدد ناسلت امیری بدیهی تلقی می‌شود که در نمودار شکل ۸-۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع مانع از ۰.۱ به ۰.۲ در تعداد ۴ مانع رشد عدد ناسلت بسیار زیاد بوده و با شیب بیشتری این تغییرات مشاهده می‌گردد. اما با افزایش مقدار ارتفاع تغییرات در این تعداد تقریباً ثابت بوده و پس از نسبت منظر ۰.۴ دوباره شاهد افزایش نرخ ناسلت خواهیم بود. در تعداد مانع ۲ این روند تقریباً با شیب ثابتی ادامه پیدا خواهد کرد. اما با رسیدن به تعداد ۱ ریب در کانال تا نسبت منظر ۰.۳ روند ناسلت افزایشی خواهد بود و سپس با یک توقف کوتاه در این سیر مواجهه خواهیم شد. بنظر می‌رسد افزایش تعداد مانع وقوع نقطه اکسترمم اولیه ناسلت را تسریع می‌نماید. برخلاف نمودار ناسلت تغییرات ضریب اصطکاک اکیدا صعودی (شکل ۸-۴) بوده و با افزایش ارتفاع مانع رشد نمودار و نرخ تغییرات آن نیز افزایش پیدا خواهد نمود. از همین رو طبق نمودار شکل ۹-۴ در ارتفاع‌های کمتر در زاویه ۴۵ درجه تفاوت چندانی در عملکرد سیستم قبل از نسبت منظر ۰.۲ دیده نمی‌شود اما با افزایش نسبت منظر، تعداد مانع بیشتر موجب افزایش بیشتر افت فشار و در نهایت کاهش عملکرد سیستم خواهد شد.

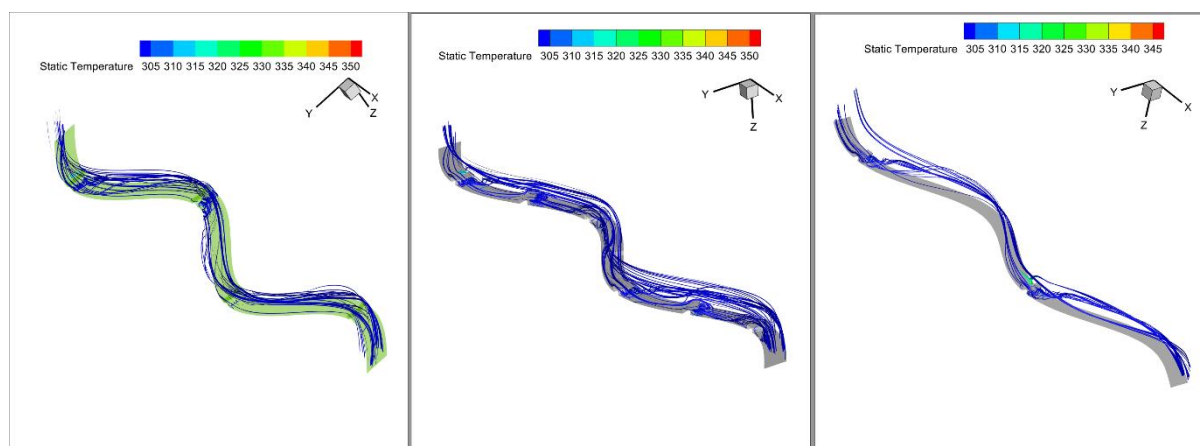


شکل ۸-۴ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۵۰۰



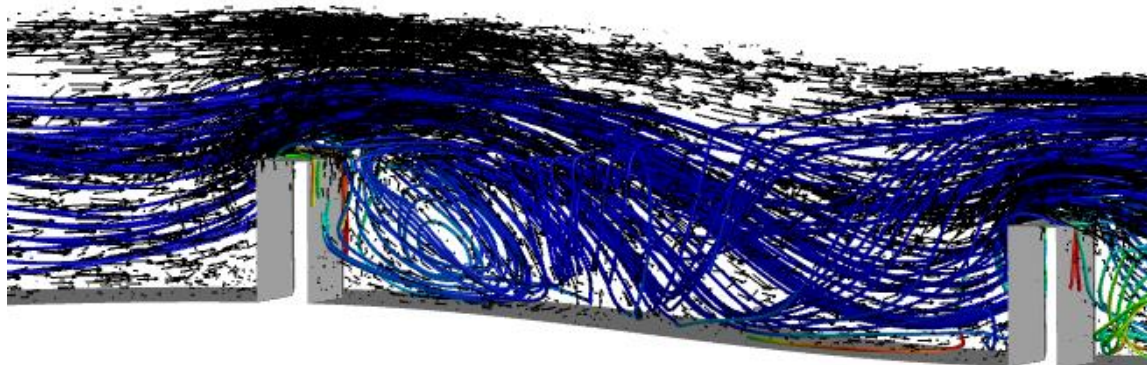
شکل ۹-۴ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۵۰۰

شکل ۱۱-۴ خطوط جریان نشان می‌دهد که گردابه‌های تشکیل شده در پشت موانع عامل مهمی در افزایش انتقال حرارت است با افزایش ارتفاع موانع شکل‌گیری این گردابه‌ها هم تحت تاثیر قرار می‌گیرد. افزایش قد موانع از یک دهم تا دو دهم تاثیر قابل ملاحظه‌ای در شکل‌گیری گردابه پشت موانع نداشته اما با افزایش این مقدار از دو دهم تا نیم سبب می‌گردد تا اندازه گردابه بزرگ شده و تقریباً فاصله بین موانع را تا حدود ۵۰ درصد بپوشاند (شکل ۱۱-۴). این افزایش تاثیر خود را در توزیع عدد ناصر به خوبی نشان می‌دهد. از سوی دیگر بزرگ شدن اندازه گردابه‌ها تاثیر منفی بر روی افت فشار داشته و سبب می‌گردد تا ضریب اصطکاک به شدت افزایش پیدا کند. این امر در اعداد رینولدز پایین تاثیر کمتر و در رینولدز بالا اثر بزرگتری دارد.

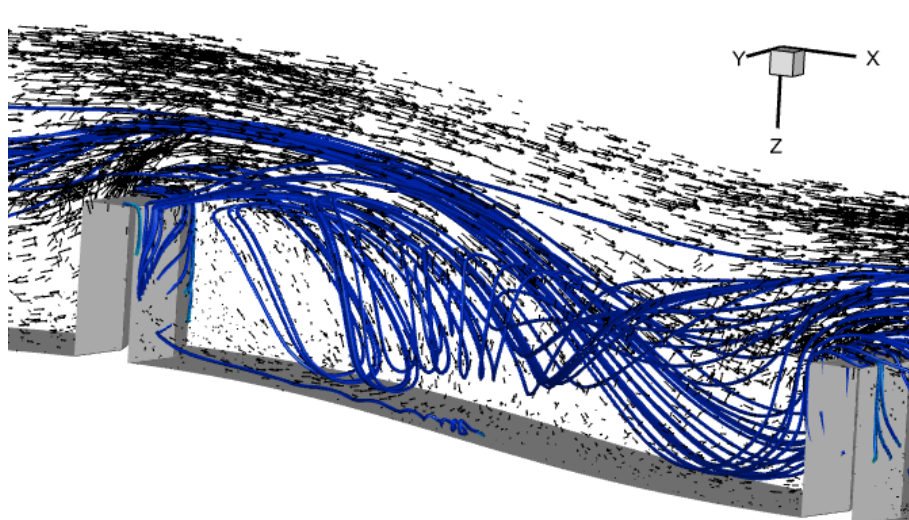


شکل ۱۰-۴ خطوط جریان در رژیم درهم در تعداد موانع مختلف

در مقایسه شکل‌گیری گردابه در جریان آرام و در هم در نسبت منظر بالا می‌توان تاثیر تفاوت شکل‌گیری در دو نوع رژیم جریان را بر روی میزان اندازه گردابه و همچنین تغییرات دمای سیال را مشاهده کرد. بردارهای سرعت نشان داده شده فضای متاثر از گردابه را به خوبی نشان می‌دهد. همانطور که در تصاویر قابل مشاهده است با بزرگ شدن ارتفاع موانع نواحی بیشتری در پایین دست تحت تاثیر گرداب‌ها قرار گرفته و نهایت امر باعث افزایش میزان انتقال حرارت می‌گردد.



الف



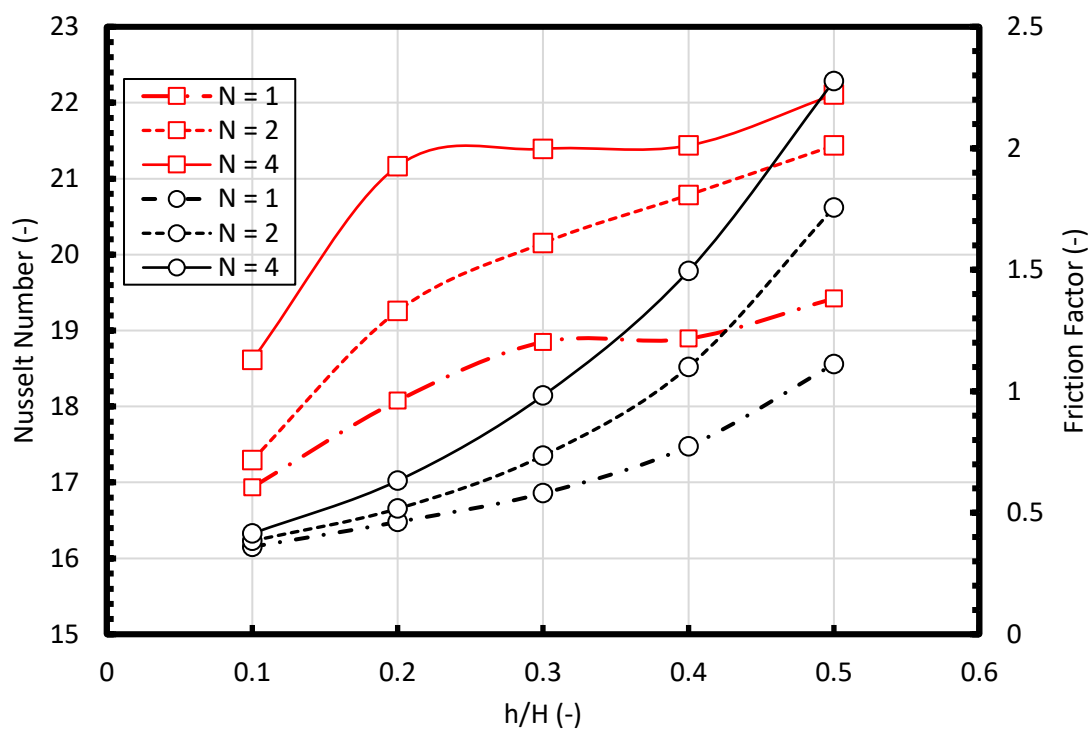
ب

شکل ۴-۱۱ گردابه در پشت مانع در الف- جریان آرام ب- در رژیم جریان درهم

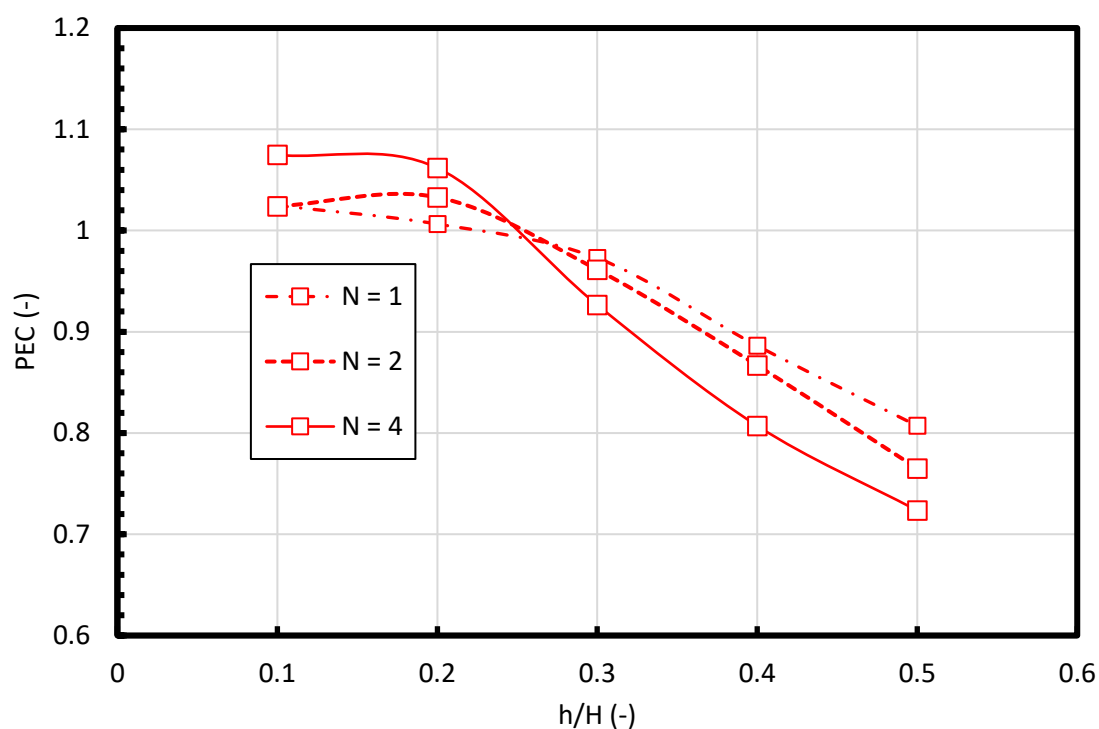
۴-۶-۲ زاویه ۶۰ درجه

با تغییر زاویه از ۴۵ به ۶۰ درجه محسوس ترین تغییر افزایش میزان ناسلت نسبت به قبل است. پیشتر دیده شد با افزایش نسبت منظر نمودار تغییرات ناسلت در این تعداد بصورت تقریباً خطی و صعودی بوده است اما با افزایش زاویه مشاهده می‌گردد (شکل ۴-۱۲) نقطه پیک اولیه بطور کمرنگی تشکیل شده است. علاوه بر آن میزان تغییرات عدد ناسلت در این بازه برای تعداد ۲ ریب بیشتر بوده و همین امر باعث شده تا در نمودار ضریب عملکرد شکل ۴-۱۳ رشد عملکرد را در این بخش مشاهده نماییم.

علاوه بر آن مشاهده می‌گردد که با افزایش زاویه اختلاف عملکرد تا قبل از نسبت منظر ۰.۲ تعداد ریب ۴ بهبود عملکرد ۴٪ را شاهد است و اختلاف آن نسبت به سایر تعداد ریب‌ها بیشتر شده است.



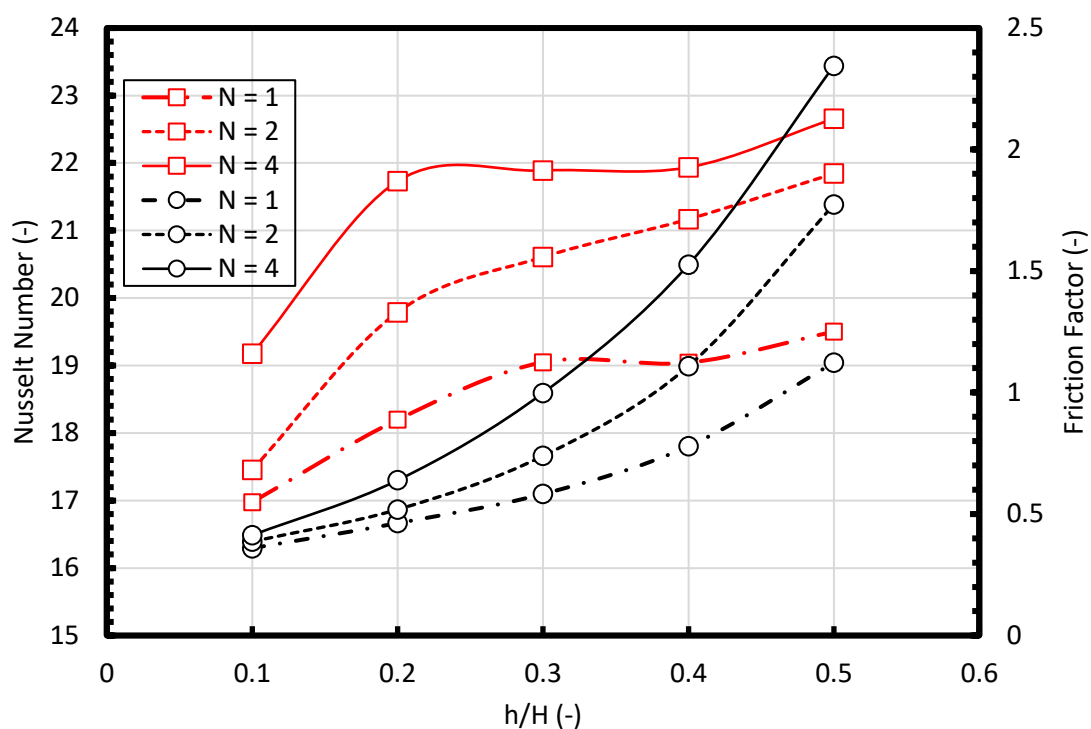
شکل ۱۲-۴ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۶۰ درجه در رینولدز ۵۰۰



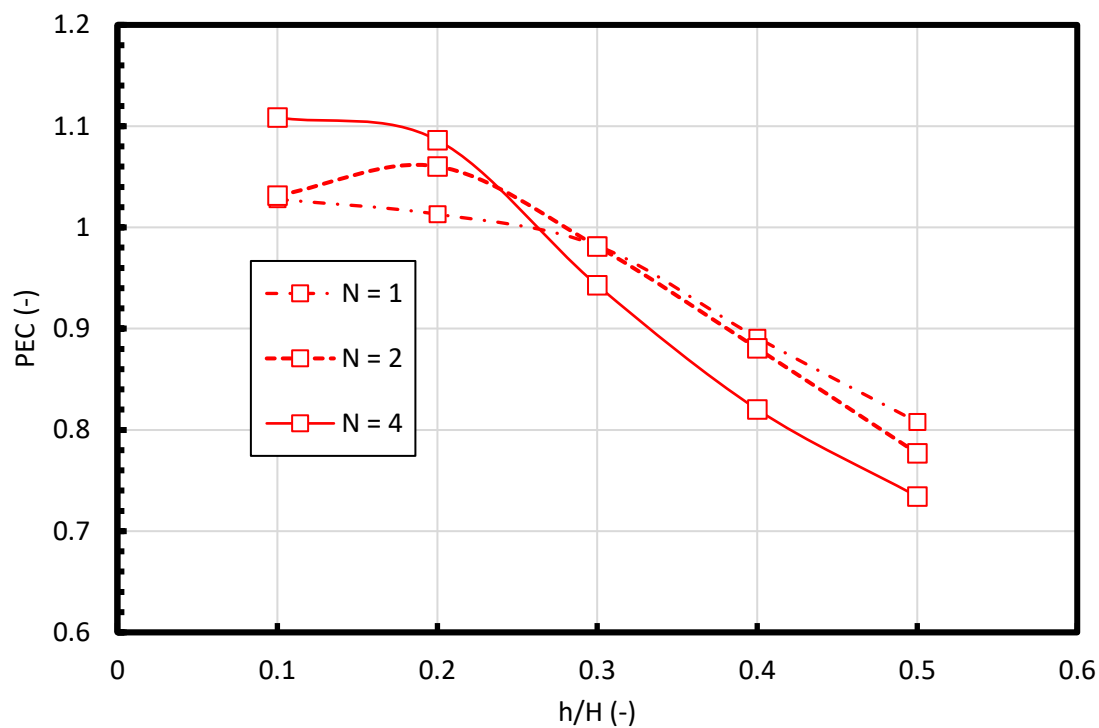
شکل ۱۳-۴ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۶۰ درجه در رینولدز ۵۰۰

۴-۶-۳ زاویه ۷۵ درجه

روی هم رفته با افزایش زاویه ریب‌ها نمودار تعداد ۲ ریب بیشترین تغییر را از خود نشان می‌دهد. در این حالت میزان تغییرات عدد ناسلت در هر دو حالت ۲ و ۴ مانع باهم برابر است. اما مقدار عدد ناسلت در تعداد ۴ ریب ۱۱٪ بیشتر از تعداد ۲ ریب در نسبت منظر ۰.۱ می‌باشد. در این حالت با پایین بودن افت فشار (شکل ۱۵-۴) عملکرد ۴ ریب بطور واضحی بهتر از سایرین می‌باشد. با افزایش نسبت منظر این اختلاف کمتر شده و با افزایش نرخ افت فشار برای تعداد ریب ۴ پس از نسبت منظر ۰.۲۵ این تعداد مانع عملکرد به نسبت بدتری را از خود نشان می‌دهد.



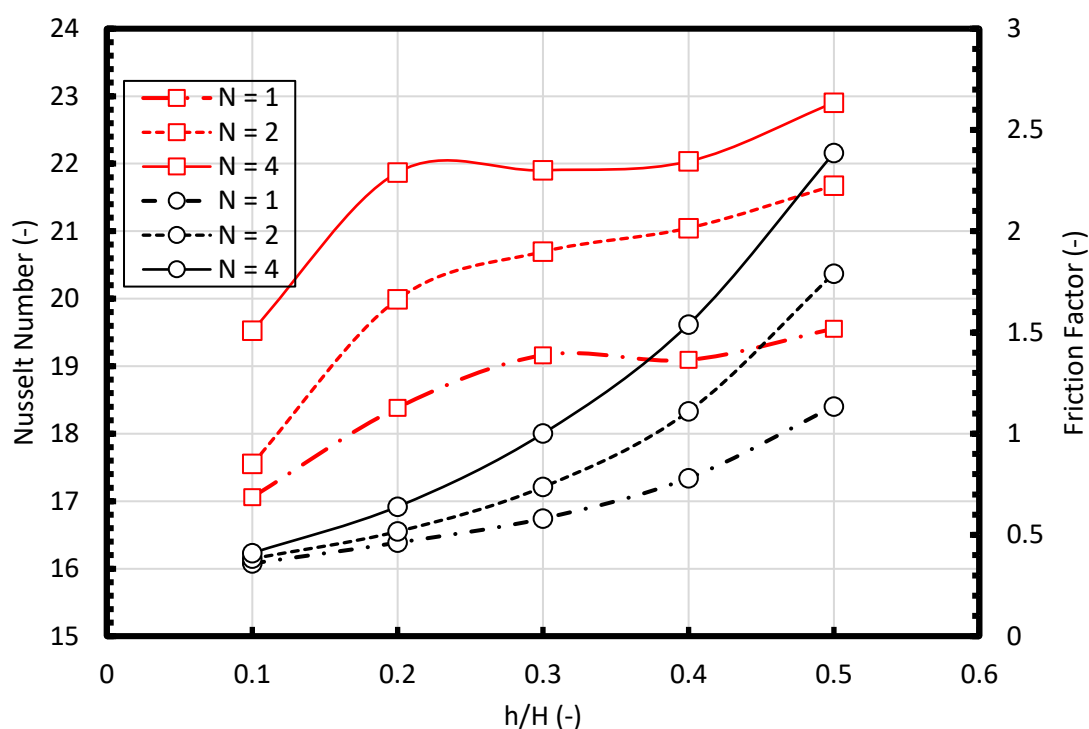
شکل ۱۴-۴ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۷۵ درجه در رینولدز ۵۰۰



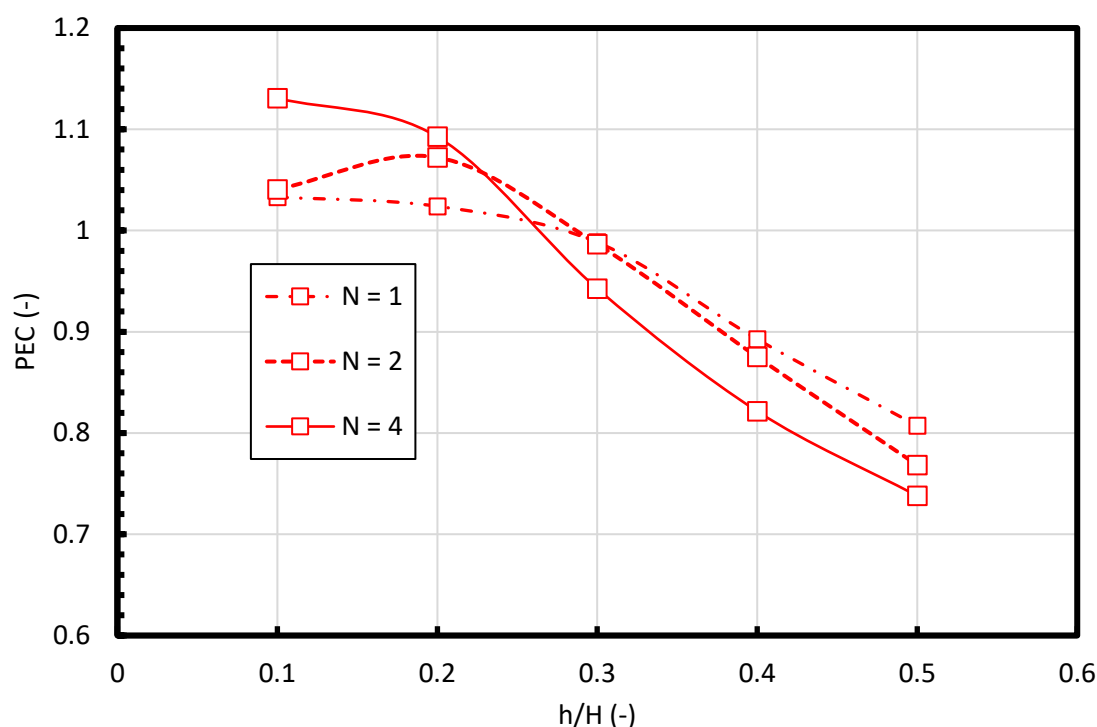
شکل ۱۵-۴ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۷۵ درجه در رینولدز ۵۰۰

۴-۶-۴ زاویه ۹۰ درجه

با تغییر زاویه به ۹۰ درجه مشاهده می‌شود که رفتار سه نمودار بسیار به هم نزدیک می‌شود و بجز مقدار عدد ناسلت و افت فشار، رفتار کلی کاملاً شبیه به هم می‌گردد (شکل ۴-۱۶). اختلاف بین متوسط سه نمودار کمتر شده و هر سه آن‌ها تقریباً در باز اولیه (نسبت منظر ۰.۱) شاهد افزایش ناگهانی ناسلت خواهند بود. ولی پس از آن نمودار تغییرات ناسلت همانند زوایای کمتر پیک مجدد و افزایش نرخ ناسلت را چندان تجربه نمی‌کند. در این حالت طبق نمودار شکل ۴-۱۷ بیشترین ضریب عملکرد برای حالت تعداد ریب ۴ در نسبت منظر ۰.۱ با مقدار ۱.۱۳ حاصل گشته است.



شکل ۴-۱۶ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۹۰ درجه در رینولدز ۵۰۰



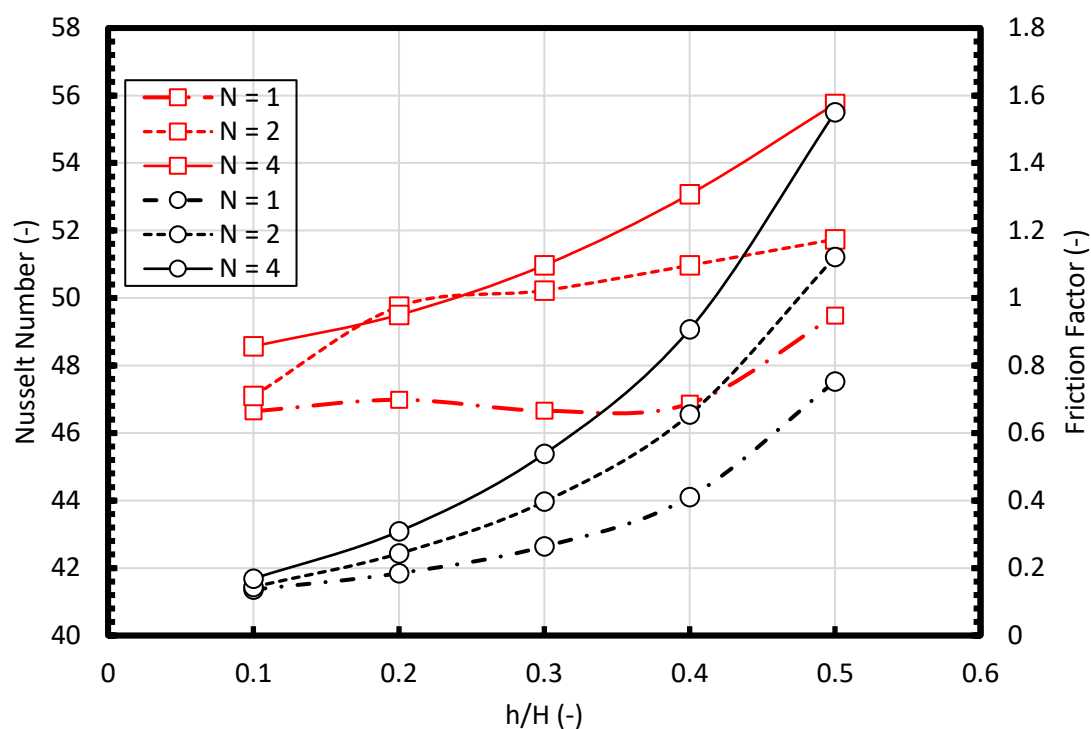
شکل ۴-۱۷ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۹۰ درجه در رینولدز ۵۰۰

۴-۵-۶ افزایش عدد رینولدز

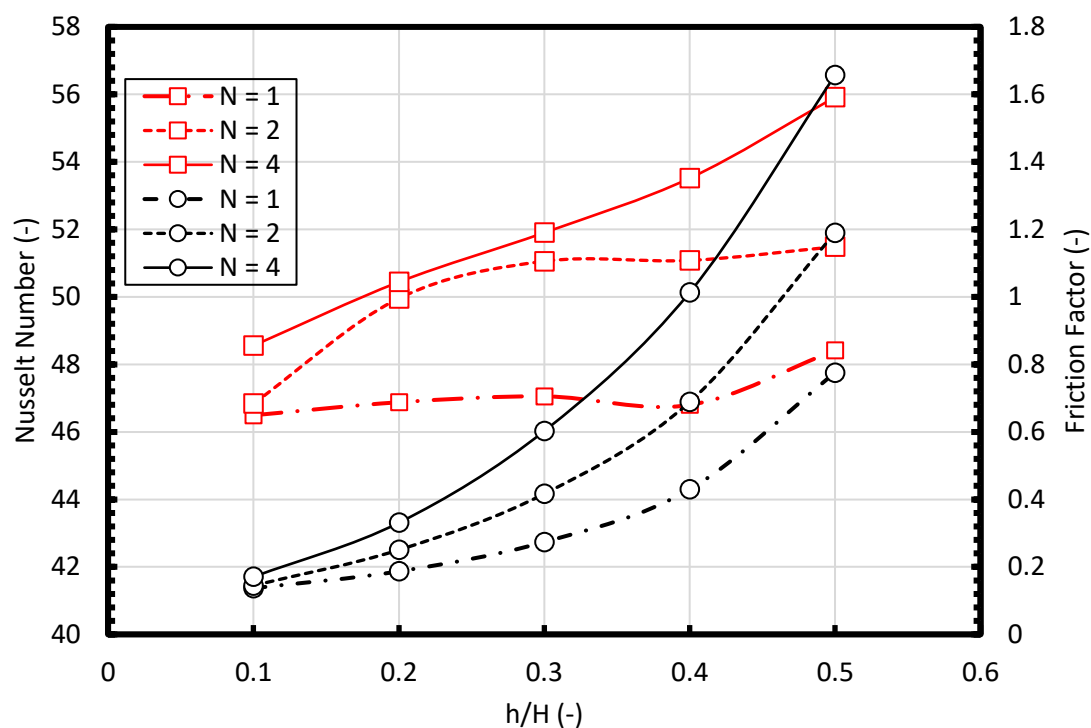
با افزایش عدد رینولدز بنظر می‌رسد از نظر رفتار جای تعداد ریب‌های ۲ و ۴ جابجا شده است. تعداد ریب ۴ در زاویه ۴۵ درجه افزایشی اکیدا صعودی را تجربه می‌کند اما تعداد ریب ۲ ابتدا در بازه منظر ۰.۲ افزایش و سپس شیب ثابتی را از خود به نمایش می‌گذارد (شکل ۴-۱۸). در رابطه با ضریب عملکرد مشاهده می‌گردد (شکل ۴-۲۲) که با افزایش عدد رینولدز و دبی ورودی میزان انتقال حرارت بر میزان افت فشار نمی‌تواند غلبه کند و سیری اکیدا نزولی را در برابر افزایش نسبت منظر از خود در تمامی تعداد موانع نشان می‌دهد.

افزایش زاویه ریب از ۴۵ به ۶۰ تغییرات محسوسی را نشان نمی‌دهد (شکل ۴-۱۹ و شکل ۴-۲۳). در این زاویه، نسبت منظر ۰.۲ در تعداد ۴ ریب بازهم از همتای خود با تعداد ۲ ریب پیشی می‌گیرد و نسبت به نمودار ۴۵ درجه نسبت منظر ۰.۴ در تعداد ۴ افت ناسلتی بسیار کمی را از خود نشان می‌دهد.

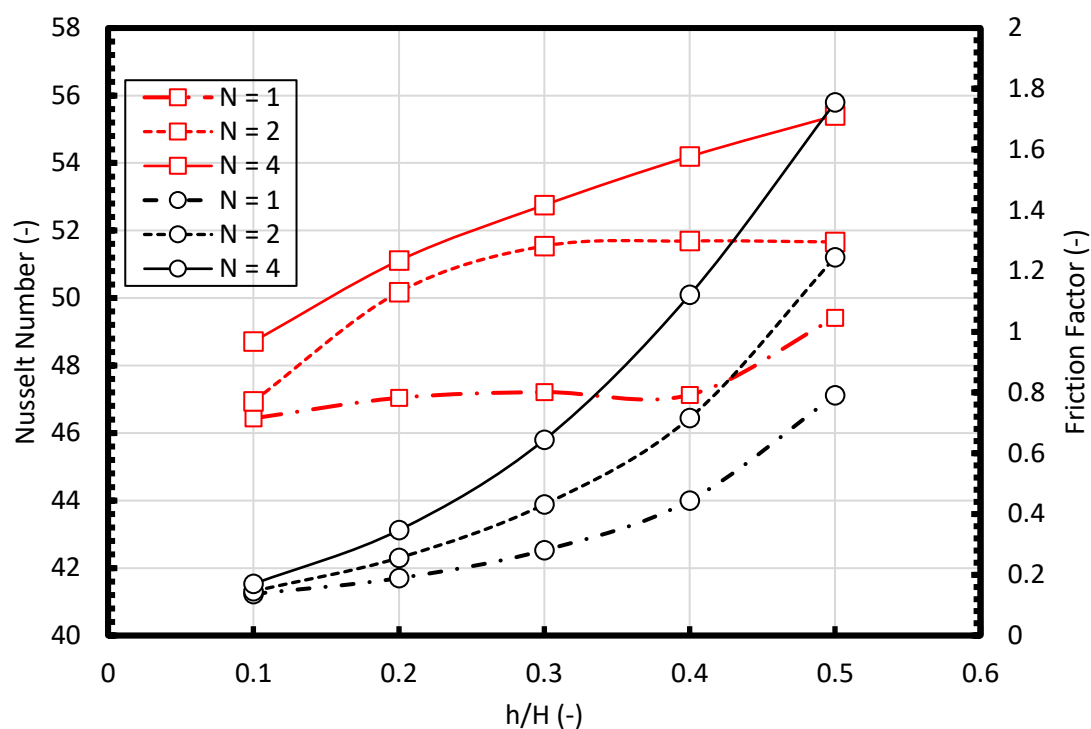
با تغییر زاویه به ۷۵ درجه تقعر نمودار تغییر کرده و این نشان می‌دهد شتاب تغییرات ناسلت دستخوش تغییر شده است (شکل ۴-۲۰). با مقایسه بین نمودار شکل ۴-۱۸ تا شکل ۴-۲۱ می‌توان دریافت که با افزایش زاویه ریب مجدداً نمودار ناسلت رفتار تقریباً یکسانی در هر سه تعداد ریب از خود نشان می‌دهد. اما همچنان تغییرات نمودار عملکرد ثابت بوده و حتی انتخاب نقطه بهینه و ماکزیمم در این حالت‌ها ممکن نیست.



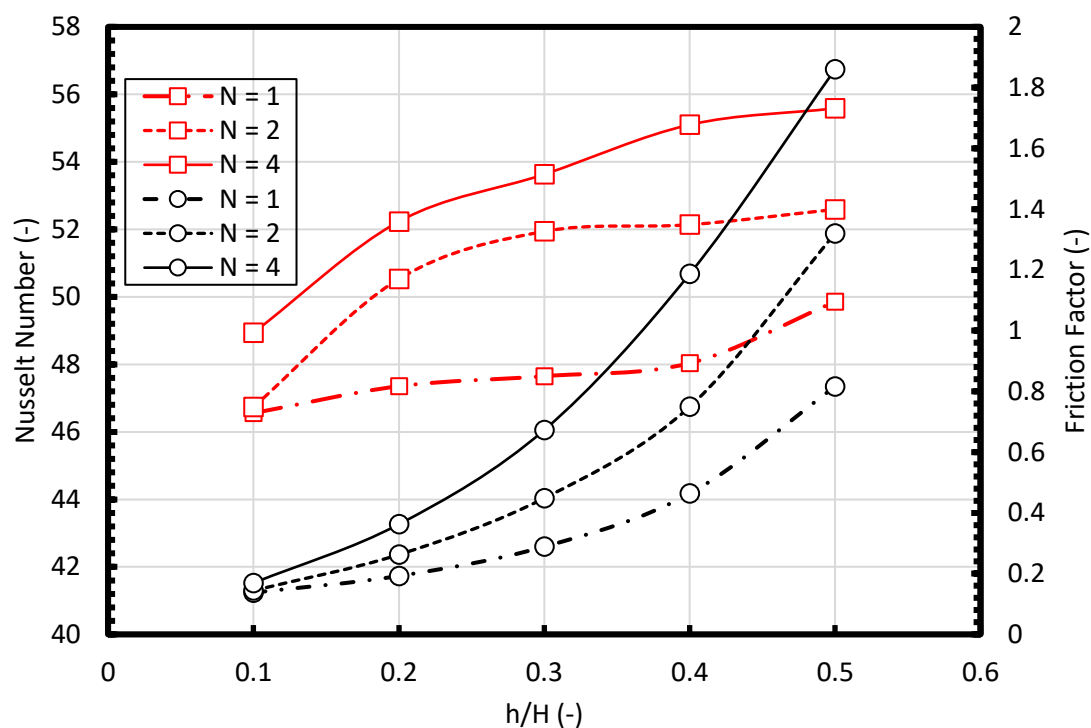
شکل ۴-۱۸ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۵۰۰۰



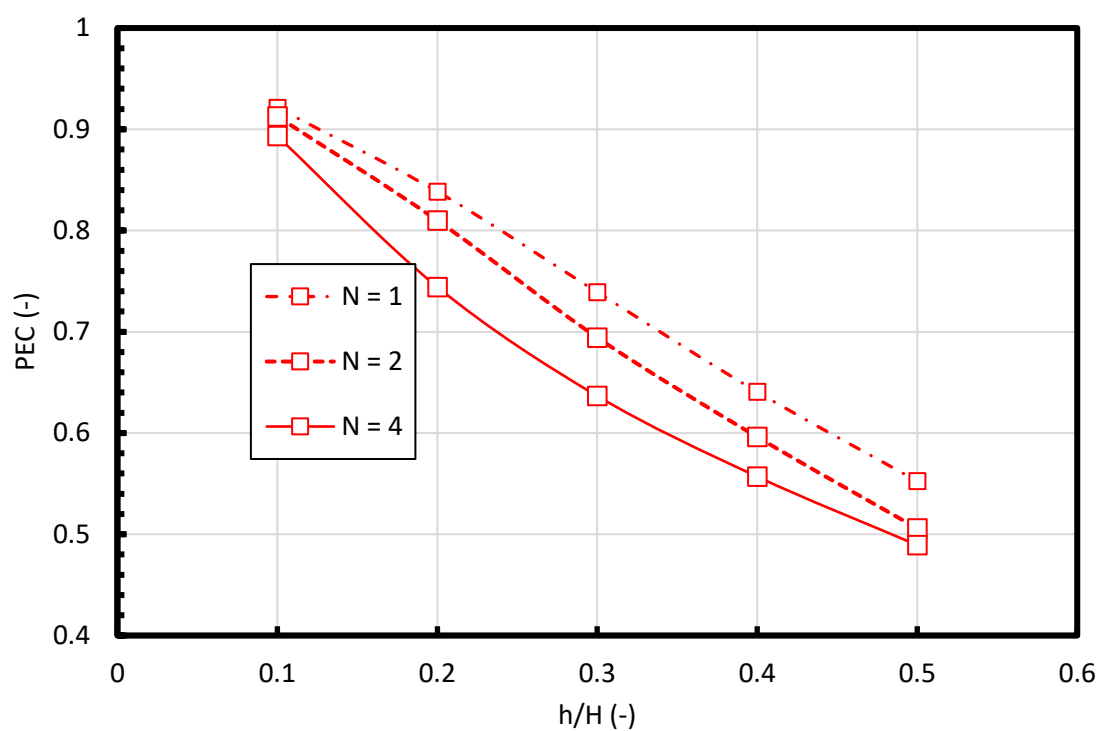
شکل ۴-۱۹ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۶۰ درجه در رینولدز ۵۰۰۰



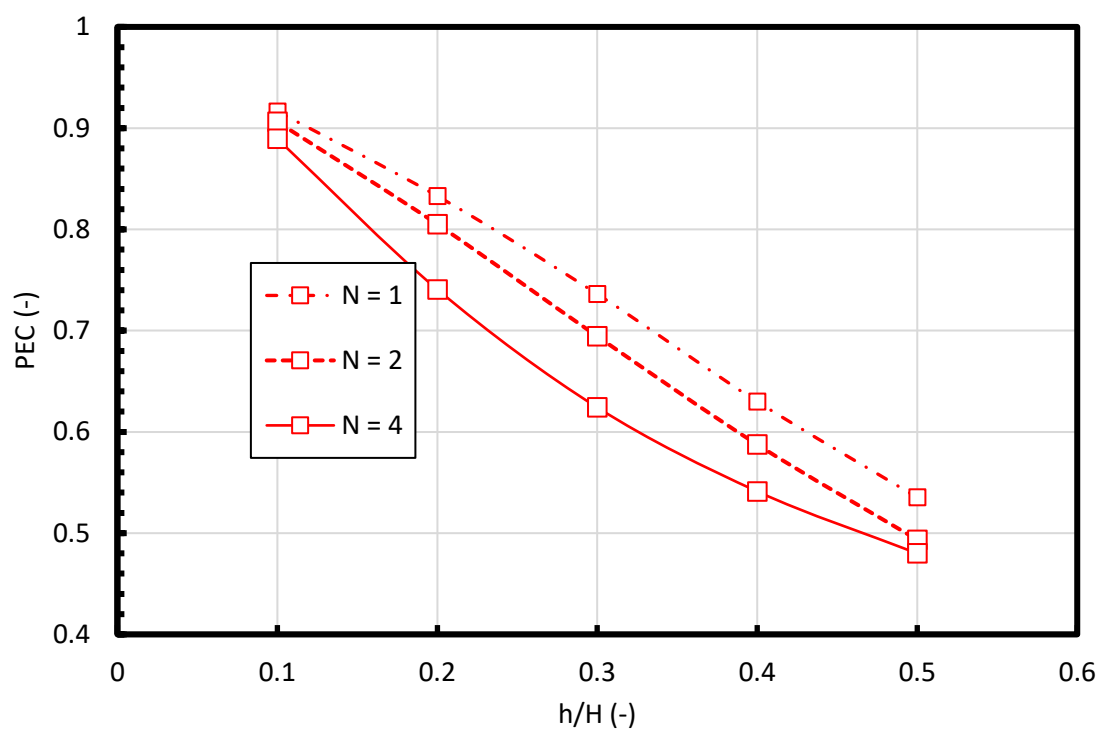
شکل ۲۰-۴ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۷۵ درجه در رینولدز ۵۰۰۰



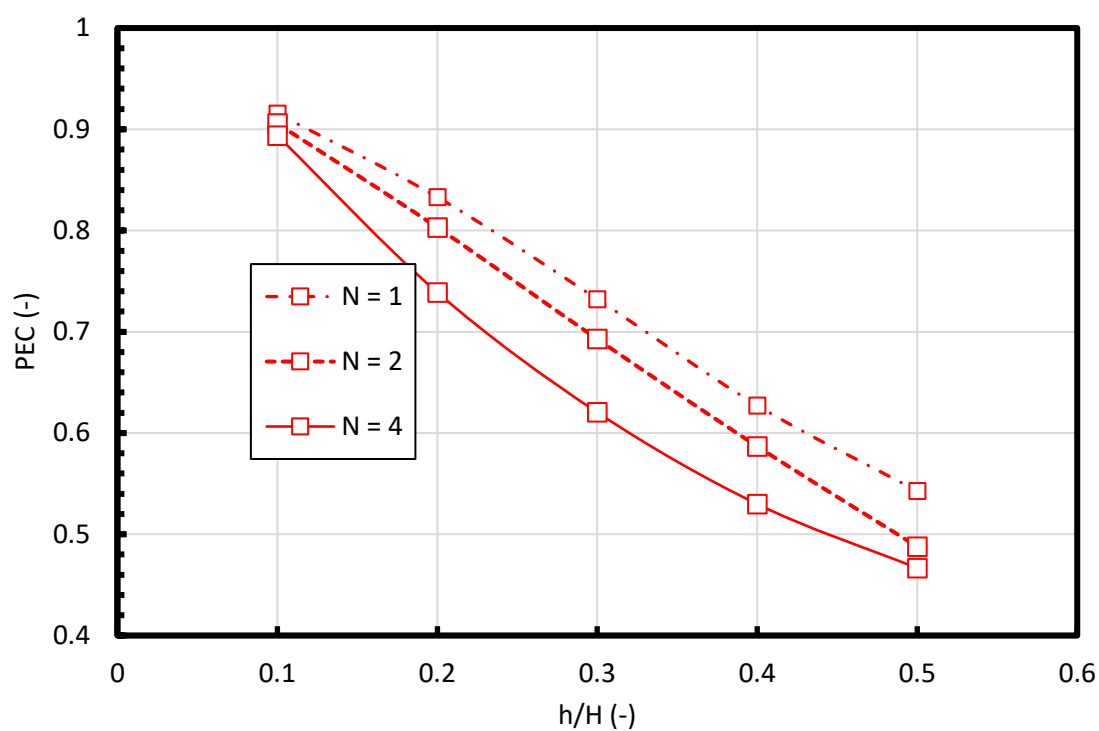
شکل ۲۱-۴ نمودار تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای موانع با زاویه ۹۰ درجه در رینولدز ۵۰۰۰



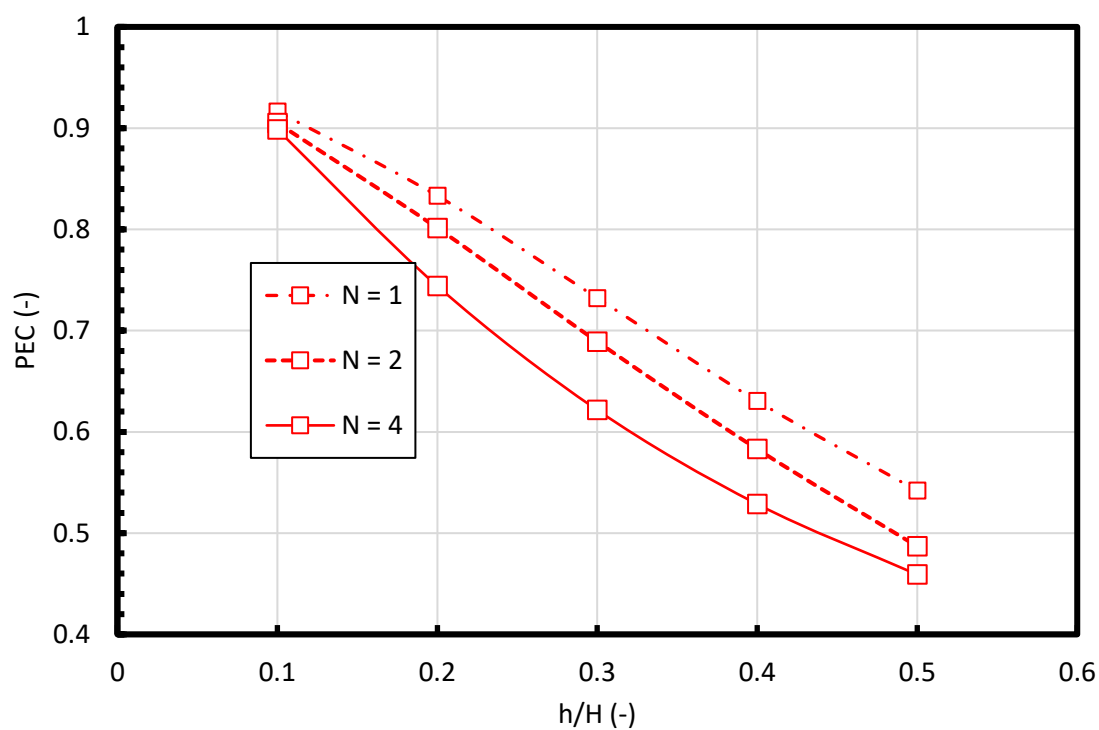
شکل ۴-۲۲ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۵۰۰۰



شکل ۴-۲۳ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۶۰ درجه در رینولدز ۵۰۰۰



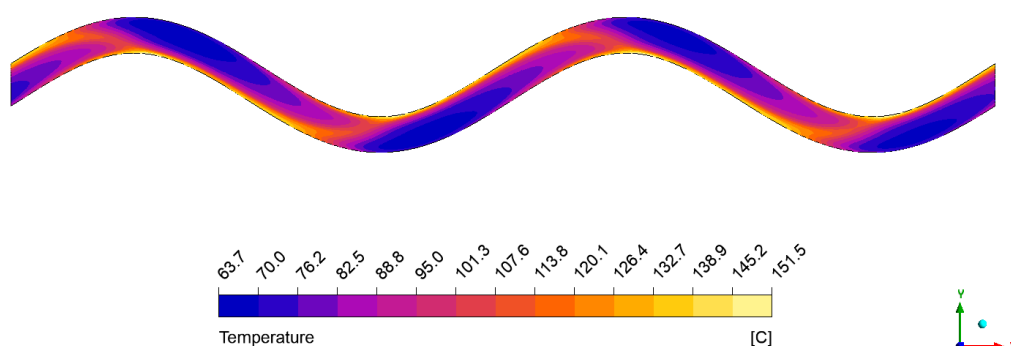
شکل ۴-۲۴ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۷۵ درجه در رینولدز ۵۰۰۰



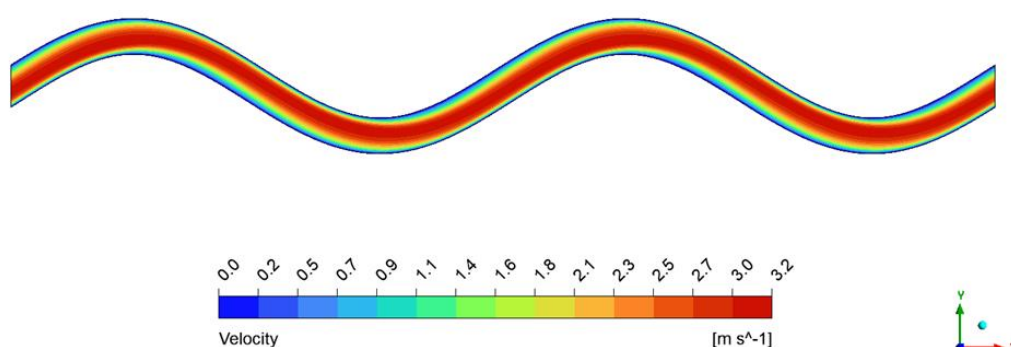
شکل ۴-۲۵ نمودار ضریب عملکرد برای ریب با زاویه ۹۰ درجه در رینولدز ۵۰۰۰

۴-۶-۶ جمع بندی نتایج

با توجه به یافته‌های عددی در مواجهه با سه متغیر اصلی اثر گذار در مسئله می‌توان نتایج را همانند قطعات پازل در کنار هم قرار داد تا برآیندی از یافته‌ها به ارائه نمود. همانطور که مشاهده شد افزایش تعداد ریب در رینولدز ۵۰۰ باعث افزایش عملکرد سیستم در کمتر از نسبت منظر ۰.۲ شده است و با افزایش این متغیر روال بهبود عکس خواهد شد. از طرفی افزایش رینولدز نشان داد که رفتار افزایش ناسلت در تعداد ریب ۴ اکیداً صعودی شده تا جاییکه زاویه ریب به حالت ۹۰ درجه برسد. بنظر می‌رسد با استفاده از کانال موجدار توزیع حرارت در کانال در مقطع از شکل متقارن خود به دلیل وجود جریان دین^۱ به حالتی غیر متقارن تغییر خواهد کرد (شکل ۴-۲۶).



شکل ۴-۲۶ توزیع دما در کانال موجدار بدون مانع

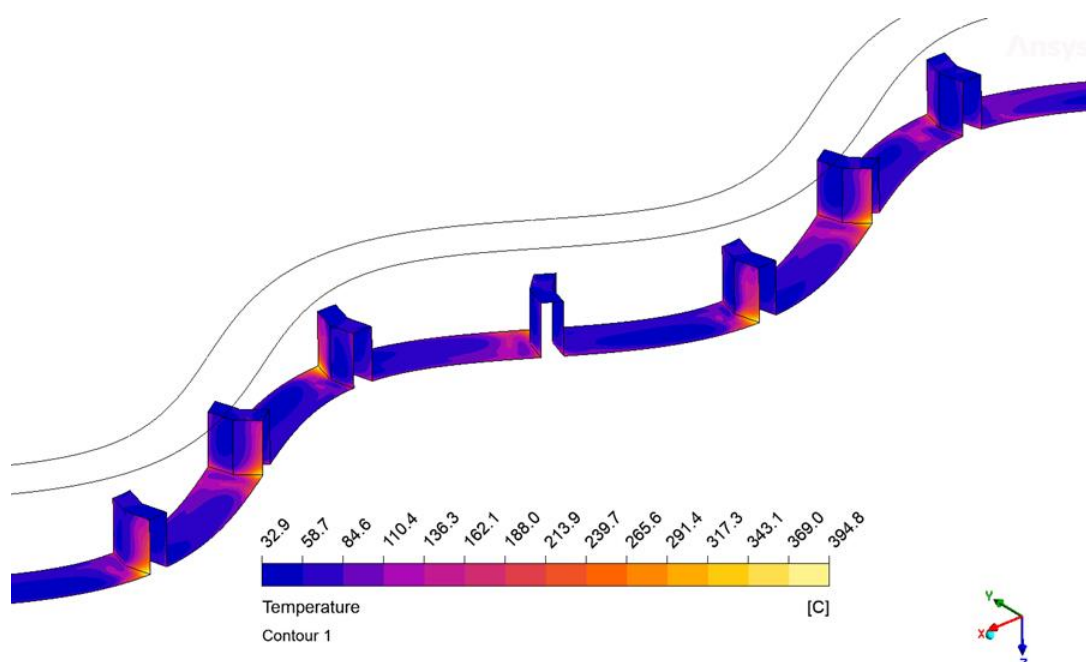


شکل ۴-۲۷ توزیع سرعت در کانال موجدار بدون مانع

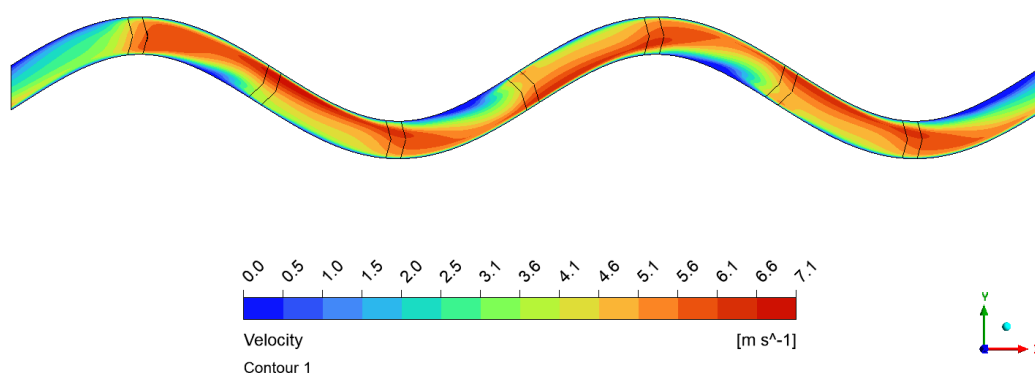
در بررسی توزیع سرعت در شکل ۴-۲۷ می‌توان دید که حین حرکت سیال در کانال با عبور جریان از روی قله یا دره، ناحیه ماند بسیار کوچکی در این نواحی تشکیل شده و از طرفی دمای سیال در این نواحی افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. با افزودن موانع در راستای عمود بر این انحنا و ایجاد جریان ثانویه، بنظر می‌رسد این دو اثر باهم تلفیق شده و روی کارکرد هم اثر می‌گذارند. تا هنگامی که اندام موانع خیلی بزرگ نیست (نسبت منظر ۰.۱) افزایش تعداد موجب رشد سریع عدد ناسلت می‌شود.

¹ Dean Flow

می‌توان اینطور بیان نمود که با ایجاد موانع و ایجاد جریان گردابی پشت مانع انتقال حرارت افزایش چشم‌گیری خواهد داشت، زیرا علاوه بر جریان دین جریان ثانویه تشکیل شده باعث افزایش انتقال حرارت و تماس هرچه بیشتر سیال با سطوح می‌شود. اما با افزایش تعداد ریب در طول کانال ثابت یا با افزایش ارتفاع موانع گردابه‌های تشکیل شده در جریان ثانویه بطور کامل تشکیل نشده (شکل ۴-۳۰ توزیع دما روی سطح مانع‌ها شکل ۴-۳۰) و جریان گردابی پشت مانع تا جبهه پیشانی مانع بعدی کشیده می‌شود. که عملاً می‌توان آن را کاهش سطح مقطع موثر برای انتقال حرارت دانست. در شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ گردابه‌های رشد کرده و تاثیر آن روی توزیع حرارت نشان داده شده است. با توجه به حالت کانال موجدار بدون موانع و مقایسه آن با این اشکال می‌توان دریافت رشد ناحیه ماند و اثر جریان دین در حالت وجود موانع بیشتر شده است. این نکته را می‌توان با افزایش رینولدز نیز مشاهده کرد.

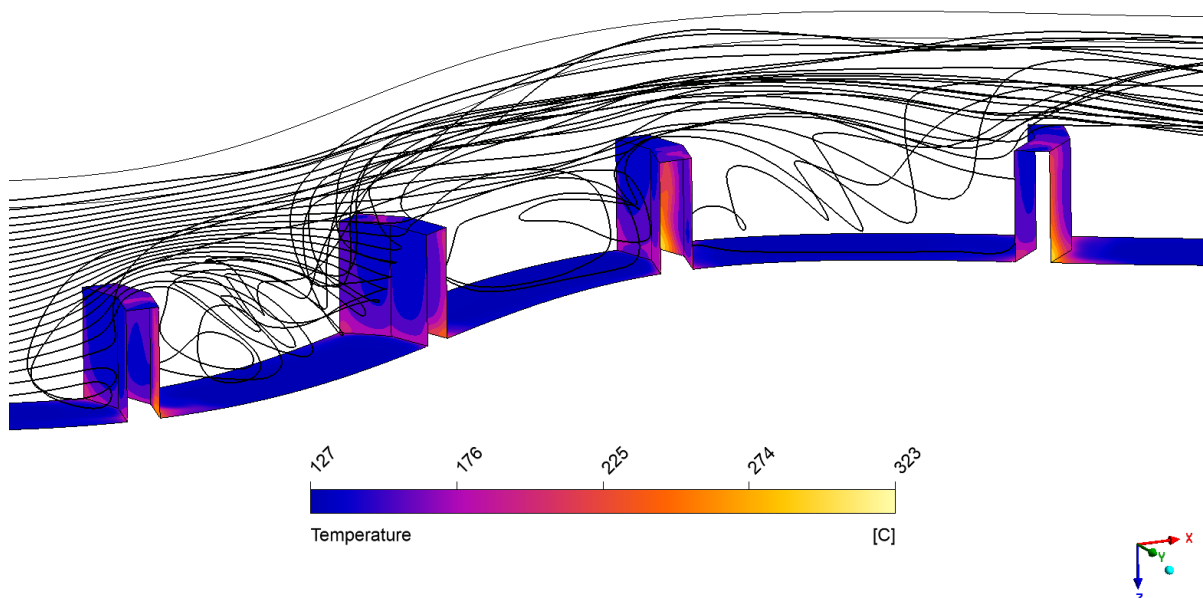


شکل ۴-۲۸ توزیع دما در حالت مانع با زاویه ۷۵ درجه، نسبت منظر ۰.۵ در رینولدز ۵۰۰



شکل ۴-۲۹ توزیع سرعت در مقطع طولی میانی در حالت زاویه ریب ۷۵ درجه، نسبت منظر ۰.۵ و رینولدز ۵۰۰

افزایش رینولدز و کاهش اندازه گردابه‌های تشکیل شده در پشت هر مانع باعث می‌شود در تعداد مانع ثابت و ارتفاع مانع یکسان بهبود نرخ ناسلت را مشاهده کنیم. زیرا اندازه گردابه‌های تشکیل شده به مراتب کوچکتر از قبل است. اما در این وضعیت با افزایش زاویه و نسبت منظر که موجب رشد اندازه گردابه می‌شود بازهم این تغییرات افت محسوسی را از و د نشان می‌دهند. جهت اثبات نهایی این مدعا می‌توان تعداد ریب ۲ را در نظر گرفته، در این تعداد به دلیل وجود فضای کافی بازهم نمودار تغییرات ناسلت تا گسترده زیادی از نسبت منظر اکیداً صعودی باقی می‌ماند اما با رشد ارتفاع مانع این اثر رفته رفته کمرنگ‌تر خواهد شد.



شکل ۳۰-۴ نمایش خطوط جریان و توزیع دما روی سطح مانع‌ها

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

انرژی یک عنصر ضروری برای زندگی انسان در دنیای امروز است و در توسعه پایدار نقشی حیاتی ایفا می‌کند. بدون انرژی، امکان تأمین نیازهای خانه‌ها، کسب‌وکارها و صنایع، و همچنین اجرای سامانه‌های حمل‌ونقل و ارتباطی وجود نخواهد داشت. نیاز به داشتن تأمین انرژی پایدار، نیاز به بررسی منابع انرژی موجود را می‌طلبد و در بین این منابع، منابع تجدیدپذیر در رأس اولویت قرار دارند. اکنون حقیقت است که انرژی تجدیدپذیر به دلیل طبیعت بی‌نهایت و ویژگی‌های سازگار با محیط‌زیست، می‌تواند بخشی جدایی‌ناپذیر از توسعه پایدار مد نظر سازمان ملل متحد باشد. انرژی خورشیدی بعنوان یکی از جذاب‌ترین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر یک منبع انرژی تجدیدپذیر بسیار حیاتی است که دی‌اکسیدکربن را تولید نمی‌کند و آلودگی را ایجاد نمی‌کند. به‌طور کلی، عوامل متعددی مانند کاهش هزینه‌ها، پیشرفت‌های فناوری، تابش خورشید فراوان و استقلال آن، انرژی فتوولتائیک را به یکی از سریع‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان تبدیل کرده است. درحالی‌که سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و آب‌شانه نیز نقش مهمی در انتقال به اقتصاد کم‌کربن دارند، انرژی خورشیدی فتوولتائیک به دلیل قابلیت توسعه و ارزان‌تر شدن روزافزون، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین موجودیت‌ها ظاهر شده است. لذا نکته حائز اهمیت در این راستا دستیابی به سیستم‌های جذب و تولید انرژی با حداکثر راندمان ممکن است. از این رو افزایش عملکرد پنل‌های خورشیدی یکی از مهمترین دغدغه‌های مهندسين می‌باشد. ماژول‌های PV از آرایه‌هایی از سلول‌های خورشیدی تشکیل شده‌اند. عملکرد سلول‌های خورشیدی در اصل به دو پارامتر، تابش خورشیدی و دمای عملیاتی، وابسته است. هنگامی که تابش خورشیدی به سطح سلول خورشیدی برخورد می‌کند، یک مقدار جزئی از آن به برق تبدیل می‌شود درحالی‌که بخش باقی‌مانده به حرارت تبدیل شده و دمای سلول خورشیدی را افزایش می‌دهد. از آنجایی‌که کنترل بر میزان تابش خورشید ممکن نیست کاهش دمای کارکرد این پنل‌ها می‌تواند راهکاری مناسب جهت افزایش ضریب عملکرد سیستم باشد. از این رو در این پایان‌نامه تلاش شده است تا با افزودن کانال‌های خنک کاری به این پنل‌ها دمای کارکرد را کاهش دهیم. در این راستا استفاده ترکیبی از کانال‌های موجدار و موانع V شکل مورد بررسی قرار گرفته است تا حالتی پیشنهاد شود تا هدف مذکور محقق گردد.

نتایج بدست آمده از بخش‌های عددی به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- افزایش تعداد ریب‌ها موجب افزایش عدد ناسلت شده اما این افزایش با نرخ یکسانی رشد نمی‌کند
- در اکثر حالت‌ها اندازه منظر ۰.۲ بهترین افزایش ناسلت حین کنترل افت فشار را در پی داشته است.
- افزایش زاویه ریب‌ها در اندازه مانع کمتر باعث افزایش عدد ناسلت در عین ثابت بودن افت فشار می‌شود، اما با افزایش ارتفاع مانع رشد ضریب اصطکاک بیشتر بوده و ضریب عملکرد سیستم افت خواهد کرد.
- بنظر می‌رسد بهترین حالت زمانی رخ می‌دهد که گردابه‌های تشکیل شده در پشت موانع بطور کامل شکل گیرند و قبل از رسیدن به مانع بعدی ناحیه ماند به اتمام رسد.
- در رینولدز ۵۰۰ (جریان آرام) بهترین حالت از نظر افزایش انتقال حرارت زاویه ۹۰ درجه در نسبت منظر ۰.۵ می‌باشد. در این حالت افزایش ۴۲٪ در میززان انتقال حرارت مشاهده شده است.
- در رینولدز ۵۰۰ (جریان آرام) بهترین حالت از نظر عملکرد کلی سیستم حالت زاویه ۹۰ درجه در نسبت منظر ۰.۱ با اندازه ضریب عملکرد ۱.۱۳. در این حالت افزایش عملکرد ۱۳٪ را شاهد خواهیم بود.
- با افزایش عدد رینولدز به باز ۵۰۰۰ (جریان مغشوش) انگاه افت فشار بسیار بیشتر از میزان انتقال حرارت رشد خواهد کرد. در این حالت بهترین میزان عدد ناسلت را در زاویه ۶۰ درجه در نسبت منظر ۰.۵ رخ خواهد داد. در این حالت افزایش ناسلت ۲۵٪ درصدی مشاهده شده است. اما عملکرد در این حالت افت شدیدی داشته تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

۲-۵ پیشنهادات

کاهش دما برای اکثر سیستم‌ها بخصوص سیستم‌های فتوولتائیک امری حیاتی در راستای افزایش بهره‌وریست. در این پایان نامه تلاش شده است تا با معرفی متغیرهای اساسی و بررسی رفتار آن‌ها در گستره مشخص، رفتار کلی از آنچه که وقوع می‌باید تبیین گردد. از آنجاییکه ترکیب عوامل و پدیده‌های مختلف موجب دشوار شدن پیش بینی رفتارها گردد اما این امر با گسترش پژوهش و بررسی تعداد حالت‌های بیشتر از این متغیرها غیر ممکن نیست. در این راستا مواردی برای تحقیقات آتی پیشنهاد شده است که نیازمند توجه ویژه و تلاش پژوهشگران محترم خواهد بود:

- در تمامی حالت‌ها مشاهده شده است که با افزایش نسبت منظر از ۰.۲ تا ۰.۴ شیب رشد ناسلت تقریباً ثابت باقی می‌ماند اما در تمامی حالت‌ها نسبت منظر ۰.۵ تغییر شیب محسوسی از خود نشان داده است. از این رو بررسی اندازه منظرهای بالاتر از ۰.۵ می‌تواند در فهم بهتر رفتار کمک بسزایی نماید.
- در نتایج مشاهده شد که ارتفاع کمتر مانع در جریان آرام بهترین ضریب عملکرد را ارائه نمود. بر همین اساس استفاده از نانوسیال‌ها می‌تواند این رشد را بیشتر کند.
- در پژوهش حاضر روی یکی از دیواره‌های مانع نصب شده است. پیشنهاد می‌شود که موانع روی سطوح روبرو هم تعبیه گردند
- در اکثر پژوهش‌ها و بخصوص پایان‌نامه حاضر سطوح گرم، سطح صاف کانال است. پیشنهاد می‌شود تا راهکاری جهت انتقال گرما از طریق تماس سطوح گرم به دیواره موجی معرفی گردد. بعلاوه امکان نسب موانع روی این سطوح نیز مورد بررسی قرار گیرد.

- با توجه به گستردگی پارامترهای اثرگذار روی توابع هدف در این مسئله ممکن است استفاده از فناوری‌های نوظهور و پیشرفته مثل یادگیری ماشین^۱ گامی مهم در توسعه این مسیر باشد و در نهایت بتوان افقی روشن جهت تحصیل رابطه‌ای واحد و یکپارچه برای رفتار این سه مهم متصور شد.

¹ Machine learning

مراجع

- [1] U. N. ESCAP, "Sustainable Development Goal 7: ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all," 2016.
- [2] S. K. Jain, G. Das Agrawal, and R. Misra, "A detailed review on various V-shaped ribs roughened solar air heater," *Heat and Mass Transfer*, vol. 55, no. 12, pp. 3369–3412, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00231-019-02656-4.
- [3] F. Bayrak, N. Abu-Hamdeh, K. A. Alnefaie, and H. F. Öztö, "A review on exergy analysis of solar electricity production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 755–770, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.012.
- [4] A. F. Abed, "Experimental and numerical study for enhancement of the performance of hybrid solar PV modules," University of Basra, Basra, 2021.
- [5] M. Javidan and A. J. Moghadam, "Experimental investigation on thermal management of a photovoltaic module using water-jet impingement cooling," *Energy Convers Manag*, vol. 228, p. 113686, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113686.
- [6] D. Li, M. King, M. Dooner, S. Guo, and J. Wang, "Study on the cleaning and cooling of solar photovoltaic panels using compressed airflow," *Solar Energy*, vol. 221, pp. 433–444, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.050.
- [7] S. Diwania, S. Agrawal, A. S. Siddiqui, and S. Singh, "Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 33–54, Mar. 2020, doi: 10.1007/s40095-019-00327-y.
- [8] E. H. Amalu and O. A. Fabunmi, "Thermal control of crystalline silicon photovoltaic (c-Si PV) module using Docosane phase change material (PCM) for improved performance," *Solar Energy*, vol. 234, pp. 203–221, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.02.001.
- [9] A. Jäger-Waldau, "Snapshot of Photovoltaics—February 2020," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 4, p. 930, Feb. 2020, doi: 10.3390/en13040930.
- [10] F. F. Ahmad, C. Ghenai, A. K. Hamid, O. Rejeb, and M. Bettayeb, "Performance enhancement and infra-red (IR) thermography of solar photovoltaic panel using back cooling from the waste air of building centralized air conditioning system," *Case Studies*

- in *Thermal Engineering*, vol. 24, p. 100840, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.100840.
- [11] “Renewables Global Status Report - REN21.” <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (accessed Aug. 22, 2023).
- [12] A. Mahdavi, M. Farhadi, M. Gorji-Bandpy, and A. Mahmoudi, “A review of passive cooling of photovoltaic devices,” *Clean Eng Technol*, vol. 11, p. 100579, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100579.
- [13] D. M. N. Mahmood and I. M. A. Aljubury, “Experimental investigation of a hybrid photovoltaic evaporative cooling (PV/EC) system performance under arid conditions,” *Results in Engineering*, vol. 15, p. 100618, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100618.
- [14] A. El Hammoumi, S. Chtita, S. Motahhir, and A. El Ghzizal, “Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 11992–12010, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.09.054.
- [15] A. K. Hamzat, A. Z. Sahin, M. I. Omisanya, and L. M. Alhems, “Advances in PV and PVT cooling technologies: A review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101360, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101360.
- [16] G. Mostafa, A. Arabhosseini, Z. Gholami, and M. H. Rahmati, “Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance,” *Solar Energy*, vol. 211, pp. 117–146, Nov. 2020.
- [17] T. M. Harms, M. J. Kazmierczak, and F. M. Gerner, “Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels,” *Int J Heat Fluid Flow*, vol. 20, no. 2, pp. 149–157, Apr. 1999, doi: 10.1016/S0142-727X(98)10055-3.
- [18] M. Hajialibabaei and M. Z. Saghir, “A critical review of the straight and wavy microchannel heat sink and the application in lithium-ion battery thermal management,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 14, p. 100153, May 2022, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100153.
- [19] D. M. Tompkins, T. Yoo, P. Hrnjak, T. Newell, and K. Cho, “Flow distribution and pressure drop in micro-channel manifolds,” 2002.
- [20] N. A. C. Sidik, M. N. A. W. Muhamad, W. M. A. A. Japar, and Z. A. Rasid, “An overview of passive techniques for heat transfer augmentation in microchannel heat sink,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 88, pp. 74–83, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.08.009.
- [21] V. P. Gaikwad, “Microchannel heat sink fabrication techniques,” in *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, www.iosrjournals.org, pp. 51–57.
- [22] W. Qu and I. Mudawar, “Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 45, no. 12, pp. 2549–2565, Jun. 2002, doi: 10.1016/S0017-9310(01)00337-4.

- [23] Q. Luo et al., "Experimental investigation on the heat dissipation performance of flared-fin heat sinks for concentration photovoltaic modules," *Appl Therm Eng*, vol. 157, p. 113666, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.076.
- [24] J.-C. Wang et al., "On enhancing energy harvesting performance of the photovoltaic modules using an automatic cooling system and assessing its economic benefits of mitigating greenhouse effects on the environment," *J Power Sources*, vol. 376, pp. 55–65, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.11.051.
- [25] Y. Sui, P. S. Lee, and C. J. Teo, "An experimental study of flow friction and heat transfer in wavy microchannels with rectangular cross section," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, no. 12, pp. 2473–2482, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.06.017.
- [26] J. Zhou, M. Hatami, D. Song, and D. Jing, "Design of microchannel heat sink with wavy channel and its time-efficient optimization with combined RSM and FVM methods," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 103, pp. 715–724, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.100.
- [27] N. Kaewchoothong, K. Maliwan, K. Takeishi, and C. Nuntadusit, "Effect of inclined ribs on heat transfer coefficient in stationary square channel," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 7, no. 6, pp. 344–350, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.taml.2017.09.013.
- [28] L. Lin, J. Zhao, G. Lu, X.-D. Wang, and W.-M. Yan, "Heat transfer enhancement in microchannel heat sink by wavy channel with changing wavelength/amplitude," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 118, pp. 423–434, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.05.013.
- [29] R. Roy and B. Kundu, "Effects of fin shapes on heat transfer in microchannel heat sinks," *Heat Transfer-Asian Research*, vol. 47, no. 4, pp. 646–659, Jun. 2018, doi: 10.1002/htj.21332.
- [30] R. Wang, J. Wang, B. Lijin, and Z. Zhu, "Parameterization investigation on the microchannel heat sink with slant rectangular ribs by numerical simulation," *Appl Therm Eng*, vol. 133, pp. 428–438, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.021.
- [31] L. Chai and L. Wang, "Thermal-hydraulic performance of interrupted microchannel heat sinks with different rib geometries in transverse microchambers," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 127, pp. 201–212, May 2018, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.029.
- [32] M. Bahiraei, M. Jamshidmofid, and M. Goodarzi, "Efficacy of a hybrid nanofluid in a new microchannel heat sink equipped with both secondary channels and ribs," *J Mol Liq*, vol. 273, pp. 88–98, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2018.10.003.
- [33] M. O. Qidwai and M. M. Hasan, "Effect of variation of cylindrical pin fins height on the overall performance of microchannel heat sink," *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, vol. 233, no. 5, pp. 980–990, Oct. 2019, doi: 10.1177/0954408918821777.
- [34] J.-F. Zhu, X.-Y. Li, S.-L. Wang, Y.-R. Yang, and X.-D. Wang, “Performance comparison of wavy microchannel heat sinks with wavy bottom rib and side rib designs,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 146, p. 106068, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106068.
- [35] X.-Y. Li, S.-L. Wang, X.-D. Wang, and T.-H. Wang, “Selected porous-ribs design for performance improvement in double-layered microchannel heat sinks,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 137, pp. 616–626, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.029.
- [36] S.-L. Wang, L.-Y. Chen, B.-X. Zhang, Y.-R. Yang, and X.-D. Wang, “A new design of double-layered microchannel heat sinks with wavy microchannels and porous-ribs,” *J Therm Anal Calorim*, vol. 141, no. 1, pp. 547–558, Jul. 2020, doi: 10.1007/s10973-020-09317-3.
- [37] C.-S. Wang, T.-C. Wei, P.-Y. Shen, and T.-M. Liou, “Lattice Boltzmann study of flow pulsation on heat transfer augmentation in a louvered microchannel heat sink,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 148, p. 119139, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119139.
- [38] J. Gao, Z. Hu, Q. Yang, X. Liang, and H. Wu, “Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sinks: Modelling review and recent progress,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 29, p. 101203, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101203.
- [39] M. Krishna, M. Deepu, and S. R. Shine, “Effect of Relative Waviness on Low Re Wavy Microchannel Flow,” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 101, no. 4, pp. 661–670, Aug. 2020, doi: 10.1007/s40032-020-00575-6.
- [40] E. Z. Ahmad, A. Fazlizan, H. Jarimi, K. Sopian, and A. Ibrahim, “Enhanced heat dissipation of truncated multi-level fin heat sink (MLFHS) in case of natural convection for photovoltaic cooling,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101578, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101578.
- [41] M. N. Khan and M. N. Karimi, “Analysis of heat transfer enhancement in microchannel by varying the height of pin fins at upstream and downstream region,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 235, no. 4, pp. 758–767, Aug. 2021, doi: 10.1177/0954408921992975.
- [42] A. I. Alsabery, A. Hajjar, M. A. Sheremet, M. Ghalambaz, and I. Hashim, “Impact of particles tracking model of nanofluid on forced convection heat transfer within a wavy horizontal channel,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 122, p. 105176, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105176.
- [43] Y.-D. Zhang, M.-R. Chen, J.-H. Wu, K.-S. Hung, and C.-C. Wang, “Performance Improvement of a Double-Layer Microchannel Heat Sink via Novel Fin Geometry—A Numerical Study,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 12, p. 3585, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14123585.

- [44] M. Z. U. Khan et al., "Investigation of heat transfer in wavy and dual wavy micro-channel heat sink using alumina nanoparticles," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101515, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101515.
- [45] N. Ghorbani, M. Z. Targhi, M. M. Heyhat, and Y. Alihosseini, "Investigation of wavy microchannel ability on electronic devices cooling with the case study of choosing the most efficient microchannel pattern," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, p. 5882, Apr. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-09859-6.
- [46] S.-L. Wang et al., "Heat transfer enhancement of symmetric and parallel wavy microchannel heat sinks with secondary branch design," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 171, p. 107229, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107229.
- [47] A. K. Okab, H. M. Hasan, M. Hamzah, K. Egab, A. Al-Manea, and T. Yusaf, "Analysis of heat transfer and fluid flow in a microchannel heat sink with sidewall dimples and fillet profile," *International Journal of Thermofluids*, vol. 15, p. 100192, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100192.
- [48] F. Alnaimat, D. Varghese, and B. Mathew, "Investigation of thermal and hydraulic performance of MEMS heat sinks with zig-zag microchannels," *International Journal of Thermofluids*, vol. 16, p. 100213, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100213.
- [49] S. Halon, Z. Krolicki, R. Revellin, and B. Zajackowski, "Local flow patterns distribution during flow boiling in a micro channel array," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 141, p. 110792, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2022.110792.
- [50] Y. Fu, X. Liu, and J. Wang, "Optimal design of wavy microchannel heat sinks based on prediction and multi-objective optimization algorithm," *Energy and AI*, vol. 14, p. 100260, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.egyai.2023.100260.
- [51] "Introductory FLUENT v6.3 notes." <http://www.fluentusers.com>, 2006.
- [52] O. Acikgoz and O. Kincay, "Numerical Determination of Effects of Wall Temperatures on Nusselt Number and Convective Heat Transfer Coefficient in Real-Size Rooms," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 5, p. 287963, Jan. 2013, doi: 10.1155/2013/287963.
- [53] M. Serhatlıoğlu, "Development of viscoelastic particle migration for microfluidic flow cytometry applications," 2020, Accessed: Jan. 24, 2023. [Online]. Available: <https://search.proquest.com/openview/d11d9429ed83ee944d2360b6d6316bef/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- [54] B. Lu and P.-X. Jiang, "Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 30, no. 6, pp. 513–521, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2005.09.007.

Abstract:

Solar energy, as one of the most appealing types of renewable energy sources, is a crucially vital renewable energy source. In general, various factors such as cost reduction, technological advancements, abundant solar radiation, and its independence have transformed photovoltaic energy into one of the fastest-growing renewable energy sources worldwide. The performance of solar cells primarily depends on two parameters: solar radiation and operational temperature.

When solar radiation hits the surface of a solar cell, a portion of it is converted into electricity while the remaining portion is transformed into heat, increasing the solar cell's temperature. Since controlling the amount of solar radiation is not feasible, reducing the operating temperature of these panels can be a suitable solution to enhance the system's efficiency. Therefore, in this thesis, an effort has been made to reduce the operating temperature by adding cooling channels to these panels. In this regard, a combination of wavy channels and V-shaped obstacles has been investigated. Three parameters, the rib aspect ratio ranging from 0.1 to 0.5, the rib angle ranging from 45 to 90 degrees, and the number of ribs per wavelength at 1, 2, and 4, have been studied at two Reynolds numbers of 500 and 5000. Numerical results show that at lower Reynolds numbers, a rib height-to-channel height ratio of 0.5 at a 90-degree angle exhibits up to 42% enhancement in heat transfer. Furthermore, smaller rib height ratios of 0.1 and 0.2 perform better at larger angles, resulting in an improvement in performance by up to 13%.

Keywords: Photovoltaic; Heat Transfer; Computational Fluid Dynamics; Micro channels; Ribs.



Babol Noshirvani
University of Technology
Department of Mechanical Engineering

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master
of Mechanical Engineering Energy Conversion

**Numerical simulation of micro channel with wavy wall and V shape
ribs on cooling of PV**

Ali Hussein Ghalta ALkseerat

Supervisor
Professor Mousa Farhadi

September 2023