



## مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت اسلاری حاوی نانوکپسول‌های مواد تغییر فاز دهنده درون میکروکانال با حفره‌های سینوسی و دندان‌های مستطیلی

هادی نعمتی مقدم، علی احمدپور\*، محمدرضا حاج محمدی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۵  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۸

### کلمات کلیدی:

مطالعه عددی  
خنک کاری قطعات الکترونیکی  
میکروکانال سینوسی دندان‌دار  
نانوکپسول‌های تغییر فاز دهنده  
ضریب عملکرد

**خلاصه:** در مطالعه‌ی عددی حاضر، عملکرد حرارتی-هیدرودینامیکی اسلاری حاوی نانو کپسول‌های مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان سیال عامل در یک جاذب حرارتی میکروکانالی مورد بررسی قرار گرفته‌است. به این منظور، یک جاذب گرمایی با حفره‌های سینوسی شکل و دندان‌های مستطیلی موجود در میانه‌ی کانال به‌عنوان هندسه‌ی مورد بررسی انتخاب و جریان آرام و پایایی مخلوط همگن حامل نانوذرات تغییر فاز دهنده در این هندسه‌ی پیچیده مطالعه شده است. برای مدل‌سازی جریان مخلوط از یک مدل تک‌فاز همگن استفاده گردید و معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت با کمک روش حجم محدود گسسته سازی شدند. از نرم افزار انسیس فلونت برای حل معادلات حاکم و شبیه‌سازی جریان استفاده شده‌است. برای سنجش عملکرد حرارتی-هیدرودینامیکی مخلوط‌های مورد مطالعه از عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد استفاده گردید و شبیه‌سازی‌ها برای محدوده‌ی اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ و غلظت حجمی ۰ تا ۳۰٪ برای نانوذرات انجام شدند. با توجه به ویژگی گرمای نهان بالای مواد تغییر فاز دهنده، به‌کارگیری آن‌ها در سیال پایه منجر به ارتقای ظرفیت گرمایی سیال کاری می‌شود و این امر می‌تواند به بهبود عملکرد حرارتی جاذب گرمایی برای خنک کاری قطعات الکترونیکی ریز مقیاس منجر شود. نتایج حاصل نشان داد که افزودن نانو کپسول‌های مواد تغییر فاز دهنده به یک سیال پایه‌ی متداول مانند آب می‌تواند عملکرد حرارتی-هیدرودینامیکی آن را به‌ویژه در اعداد رینولدز پایین تقویت کند. در مطالعه‌ی حاضر افزایش ۶ تا ۴۸ درصدی عدد ناسلت برای مخلوط حاوی مواد تغییر فاز دهنده گزارش شده‌است.

### ۱- مقدمه

[۱] در سال ۱۹۸۱ میلادی ارائه شد و کارایی آن به اثبات رسید. در این طرح اولیه از میکروکانال‌های مستطیلی ساده برای دفع حرارت با کمک سیال عامل آب استفاده شد. پس از این معرفی اولیه، انبوهی از تحقیقات علمی و فنی برای بهبود عملکردی دمایی این جاذب‌های گرمایی صورت پذیرفتند. این تحقیقات را می‌توان به سه دسته‌ی کلی به شکل زیر تقسیم نمود:

الف) طراحی نوین هندسی: در این بخش سعی بر آن است تا با اصلاح ساختار و طراحی هندسی میکروکانال‌ها میزان انتقال حرارت از بستر جاذب به سیال عامل جریان یافته درون این مجراها افزایش یابد. استفاده از دیواره‌های موج دار، استفاده از دندان‌های با هندسه‌های متنوع و یا استفاده از بهبود دهنده‌های اختلاط از جمله طرح‌های پیشنهاد شده در این بخش می‌باشند.

ب) استفاده از سیال عامل با خواص گرمایی تقویت شده: در این مطالعات سعی بر آن است که به‌جای سیالات متداولی مثل آب، سیالات عامل جدیدی معرفی و مورد بررسی قرار گیرند که از خواص گرمایی تقویت شده برخوردار باشند. نانوسیال‌ها، فروسیال‌ها و سوسپانسون‌های حاوی مواد کپسوله شده

در سه دهه‌ی اخیر، ابزارهای الکترونیکی ریزمقیاس برای رفع نیاز روز افزون به توان محاسباتی بالا در کاربردهای متنوع، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که به صورت پیوسته شار گرمایی بیشتری را تولید می‌کنند. با توجه به آنکه عمر مفید قطعات الکترونیکی به شدت به دمای کارکردی آن وابسته است، توسعه‌ی فناوری‌های جدید و مؤثر برای دفع حرارت تولیدی این قطعات از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مؤثرترین راه برای دفع حرارت تولیدی توسط قطعات الکترونیکی ریزمقیاس، استفاده از جاذب‌های گرمایی میکروکانالی است. در یک جاذب گرمایی میکروکانالی حرارت تولیدی توسط قطعه‌ی الکترونیکی ابتدا به بستر جامد جاذب منتقل شده و سپس سیال عبوری از درون میکروکانال‌ها این حرارت را به شکل مؤثر از بستر جامد جاذب که در تماس با آن قرار دارد، دفع می‌نماید.

طرح یک جاذب گرمایی میکروکانالی نخستین بار توسط تاگرمن و پیز

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.ahmadpour@aut.ac.ir



تغییر فاز دهنده از جمله مهمترین این سیالات عامل تقویت شده هستند. (ج) سایر مطالعات: از جمله استفاده از میدان‌های مغناطیسی خارجی یا دیواره‌های متخلخل برای میکروکانال‌ها.

در طراحی نوین هندسی جاذب حرارتی میکروکانالی، همواره سعی بر آن است که با استفاده از طرح‌های هندسی جدید، میزان اختلاط سیال را در دامنه‌ی جریان افزایش داده و یا با تحت تأثیر قرار دادن لایه‌های مرزی حرارتی ضریب انتقال حرارت موضعی را افزایش دهند. هی و همکاران [۲] در مطالعه‌ی مروری مفصل خود، انواع طرح‌های هندسی پیشنهاد شده برای جاذب‌های حرارتی میکروکانالی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که استفاده همزمان از حفره‌های مقعر با شکل مناسب در دیواره‌ی مجرا و دندان‌های مستطیلی می‌تواند به هم افزایی بهتر میدان سرعت و دما منجر شود.

به منظور مطالعه‌ی این اثر، ژیا و همکاران [۳] در یک مطالعه‌ی عددی، اثر حضور همزمان حفره‌های مقعر دایروی و دندان‌های دایروی را در طراحی میکروکانال‌های یک جاذب حرارتی ریزمقیاس به صورت عددی مطالعه کردند. مطالعه‌ی فوق در محدوده‌ی عدد رینولدز ۱۵۰ تا ۶۰۰ صورت پذیرفت و نتایج حاصل نشان دادند که، اغتشاش ایجاد شده توسط طرح پیچیده‌ی حاضر بر روی میدان جریان سیال باعث افزایش ۱۶۷ درصدی عدد نوسلت متوسط در مجرا نسبت به هندسه‌ی ساده مستطیلی می‌شود. همچنین روابط مناسبی برای تخمین ضریب اصطکاک متوسط و عدد رینولدز متوسط در میکروکانال با حفره و دندان‌های دایروی پیشنهاد گردید.

ژای و همکاران [۴] هندسه‌های متنوعی را برای یک میکروکانال دارای حفره‌های مقعر دایروی به همراه دندان‌های دوزنقه‌ای، مستطیلی، مثلثی و دایروی که در فاصله بین دو حفره و بر روی دیواره‌ی مجرا تعبیه شده بودند، در نظر گرفتند و جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی را در این مجرا را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. مطالعه‌ی ضریب انتقال حرارت متوسط، افت فشار و تولید آنتروپی درون تمامی این مجرای ریزمقیاس نشان دادند که عملکرد حرارتی تمامی میکروکانال‌های با هندسه‌ی پیچیده از میکروکانال‌های صاف بهتر می‌باشد. از سوی دیگر، برای اعداد رینولدز کمتر از ۳۰۰ حضور دندان‌های دوزنقه‌ای بر روی دیواره‌ی مجرا به بهترین عملکرد حرارتی منجر می‌شود. در حالی که برای اعداد رینولدز بزرگتر از ۳۰۰ استفاده از دندان‌های دایروی توصیه شده است.

در مطالعه‌ی دیگر، ژای و همکاران [۵] اثر حضور حفره‌های مثلثی و دوزنقه‌ای را بر روی دیواره‌ی میکروکانال به همراه دندان‌های دایروی،

دوزنقه‌ای و مثلثی بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک و تولید آنتروپی مورد بررسی دقیق و گسترده قرار دادند. نتایج حاصله بیانگر این مطلب بود که با استفاده از طرح‌های پیچیده برای میکروکانال‌ها و افزایش میزان انتقال حرارت، خالص گرادیان دما در دامنه‌ی محاسباتی کاهش یافته و این امر به کاهش اثر برگشت‌ناپذیری‌ها منجر می‌شود. همچنین اثر دندان‌ها بر روی تولید آنتروپی کل بیشتر از حفره‌ها می‌باشد. نهایتاً در محدوده‌ی عدد رینولدز بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ استفاده همزمان از حفره‌های مقعر مثلثی و دندان‌های مثلثی به بهترین عملکرد حرارتی میکروکانال منجر می‌شود.

غنی و همکاران [۶] در یک شبیه‌سازی سه بعدی، طرح هندسی جدیدی را برای یک جاذب حرارتی میکروکانالی ارزیابی کردند. در این طرح از دیواره‌های با حفره‌های سینوسی شکل به همراه دندان‌های مستطیلی در میانه‌ی کانال برای ایجاد اغتشاش و اختلاط در مسیر جریان سیال استفاده شد. ضریب عملکرد این طرح هندسی جدید در عدد رینولدز ۸۰۰ برابر ۱/۸ گزارش شده‌است که از طرح هندسی دیواره‌ی سینوسی در غیاب دندان و طرح هندسی دیواره‌ی صاف در حضور دندان‌های مستطیلی عملکرد حرارتی به مراتب بهتری دارد. همچنین با یک مطالعه‌ی پارامتری گسترده، غنی و همکاران [۶] ابعاد بهینه‌ی هندسی طرح را برای دستیابی به بیشینه‌ی ضریب عملکرد در اعداد رینولدز مختلف ارائه دادند. در مطالعه‌ی مشابه، سیدکار و همکاران [۷] میکروکانال‌هایی با حفره‌های مثلث شکل که در میانه‌ی آن دندان‌های مثلثی با آرایش‌های مختلف قرار داده شده‌است را از نظر عملکرد حرارتی و تولید آنتروپی مطالعه کردند. در این تحقیق فاکتور عملکردی به بزرگی ۱/۷۸ در عدد رینولدز ۴۰۰ به ثبت رسیده‌است که خود نشانگر کارایی مناسب این طرح برای خنک کاری قطعات الکترونیکی است.

در طراحی‌های اولیه جاذب‌های حرارتی میکروکانالی، از آب به عنوان سیال عامل استفاده شده‌است. به تدریج و به منظور افزایش کارایی حرارتی این جاذب‌ها، استفاده از سیالات جدید با خواص فیزیکی تقویت شده مورد بررسی قرار گرفت. دسته‌ی عمده‌ای از این سیالات تقویت شده از افزودن ذرات جامد ریزمقیاس به یک سیال پایه‌ی متداول بدست آمدند. این ذرات جامد می‌توانند از نوع فلز، اکسید فلز، مواد کربن پایه باشند و عمدتاً مخلوط بدست آمده تحت عنوان نانوسیال شناخته می‌شود که استفاده از آن‌ها درون جاذب‌های حرارتی میکروکانالی به شکل گسترده‌ای مطالعه شده‌است [۸]. در سالیان اخیر مواد تغییر فاز دهنده به دلیل فراهم کردن امکان کاهش حجم و وزن جاذب‌های حرارتی میکروکانالی برای استفاده در کاربرد سرمایش

نانوکپسوله را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشانگر دستیابی به سطوح دمایی پایین‌تر در جاذب حرارتی و یک توزیع دمایی یکنواخت‌تر نسبت به آب خالص بود. در غلظت ۲۰ درصد حجمی ذرات تغییر فاز دهنده، یک بهبود عملکرد حرارتی ۳۰ درصدی گزارش شده‌است. با افزایش سرعت ورودی مخلوط دماهای پایین‌تری نیز در یک شار حرارتی معین درون جاذب قابل دستیابی می‌باشد. رجیبی فر [۱۶] در مطالعه‌ی عددی خود اثر استفاده همزمان از نانوسیالات و مخلوط‌های نانوکپسوله مواد تغییر فاز دهنده را در یک جاذب حرارتی دو طبقه با هندسه‌ی ساده مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه تاکید شد که برای دستیابی به عملکرد بهینه‌ی جاذب حرارتی لازم است یک تعادل مناسب بین افزایش انتقال حرارت و افزایش توان پمپاژ مورد نیاز در اثر استفاده از سیالات با خواص حرارتی بهبود یافته در یک جاذب حرارتی برقرار گردد. به این منظور باید غلظت ذرات پخش شده و سرعت‌های ورودی به کانال‌ها و ابعاد کانال‌ها به دقت مورد بررسی قرار گرفت و طرح بهینه‌ی شناسایی گردد. در یک مطالعه‌ی جدید، رحمان و همکاران [۱۷] اثر همزمان استفاده از مخلوط حامل ذرات نانوکپسوله تغییر فاز دهنده را با طراحی دندانه‌های هیدروفویل شکل بر روی دیواره‌های جاذب حرارتی میکروکانالی با یک تحلیل عددی سه بعدی بررسی نمودند و بهبود انتقال حرارت قابل توجهی را (تا ۲/۶۸ برابر نسبت به حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده) گزارش کردند.

دای و همکاران [۱۸] در یک مطالعه عددی سه بعدی به بررسی انتقال حرارت جاذب حرارتی با مینی کانال دو لایه با سیال عامل مخلوط آبی میکرو کپسول‌های تغییر فاز دهنده پرداختند. جریان و انتقال حرارت در سیال با شرایط شار حرارتی ثابت در کف کانال بررسی شدند. در این مطالعه در مقایسه با مینی کانال تک لایه همراه با سیال عامل آب، مقاومت حرارتی کمتر و افت فشار بیشتری در غلظت‌های مختلف میکرو کپسول گزارش شدند. افزایش ۱۳/۸ درصدی ضرب عملکرد در حضور مواد تغییر فاز دهنده نسبت به سیال پایه گزارش شده است. در تحقیقی دیگر از دای و همکاران [۱۹] اثر استفاده ترکیبی از مخلوط میکرو کپسول‌های تغییر فاز دهنده و لایه‌های متخلخل بر روی دیواره‌های جاذب حرارتی میکروکانال مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه اثر مواد، ضخامت و ارتفاع لایه متخلخل و همچنین تعداد کانال‌ها تحت سرعت‌های ورودی مختلف و کسرهای جرمی مختلف مخلوط میکرو کپسول بر عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی سیستم با استفاده از ضریب عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصله نشانگر افزایش ۳۲/۳ درصدی ضریب عملکرد نسبت به حالت غیرمتخلخل همراه با

قطعات الکترونیکی بشدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. در یک تعریف عمومی یک ماده‌ی تغییر فاز دهنده، ماده‌ای است که می‌تواند با تغییر فاز از حالت جامد به مایع یا بالعکس در یک محدوده‌ی دمایی دلخواه مقداری مفیدی سرمایش/گرمایش را در یک ابزار کنترل حرارت ایجاد کند. مواد تغییر فاز دهنده عمدتاً به دو دسته‌ی مواد آلی و غیر آلی تقسیم می‌شوند [۹].

عمده‌ی مواد تغییر فاز دهنده تجاری از نوع آلی بوده و دارای چگالی انرژی حرارتی بالایی هستند و در طول فرآیند تغییر فاز عملکرد دمایی پایداری را از خود نشان می‌دهند. اما بخش عمده‌ای از این مواد از خود ضریب هدایت حرارتی نسبتاً پایینی را به نمایش می‌گذارند که عملکرد حرارتی آن‌ها را به شکل نامطلوبی تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۰]. برای رفع این نقیصه، استفاده از مخلوط حاوی مواد تغییر فاز دهنده‌ی کپسوله شده پیشنهاد شده‌است. در این راهکار، مواد تغییر فاز دهنده با کمک مواد محافظ کننده‌ی مناسب که عمدتاً از نوع مواد پلیمری هستند، در ابعاد میکرو یا نانو و به شکل کپسول‌های با شکل دلخواه فرآوری شده و به صورت همگن در بستر یک سیال پایه که عمدتاً آب می‌باشد توزیع می‌شوند تا قابلیت جذب/دفع حرارتی آن‌ها به شدت افزایش یافته و عملکرد حرارتی سیال عامل بدست آمده را بهبود یابد [۱۱] و [۱۲]. اگر اندازه ذرات بدست آمده در محدوده‌ی ۱ تا ۱۰۰۰ نانومتر باشد به آن ذرات تغییر فاز دهنده نانوکپسوله گویند. بدلیل آنکه نانوکپسوله‌های مواد تغییر فاز دهنده این قابلیت را دارند که به صورت پایدار در یک سیال پایه پخش شوند، استفاده از این مواد در کاربردهای متنوع ذخیره سازی انرژی یا مدیریت دمایی در سالیان اخیر به شدت گسترش یافته‌است [۱۳].

صباح و همکاران [۱۴] در یک مطالعه‌ی عددی سه بعدی، اثر استفاده از مخلوط حاوی ذرات میکروکپسوله‌ی تغییر فاز دهنده را به عنوان سیال عامل درون یک جاذب حرارتی میکروکانالی به دقت مورد بررسی قرار دادند. هندسه‌ی کانال‌های مورد استفاده از نوع مستطیلی بوده و جریان آرام و تکفاز در محدوده‌ی شار حرارتی ۱۰۰ تا ۵۰۰ وات بر سانتی متر مربع شبیه‌سازی گردید. نتایج حاصله به روشنی نشان داد که استفاده از ریز کپسول‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده درون آب، سرمایش بهتری را در مقایسه با آب خالص در اختیار می‌گذارد. همچنین پیشنهاد گردید که برای یک شار حرارتی معین، هندسه‌ی میکروکانال و شرایط مرزی ورودی آن باید به گونه‌ای تنظیم گردند که مواد تغییر فاز دهنده در نزدیکی ورودی مجرا شروع به ذوب شدن کنند و در خروجی مجرا بخش عمده‌ای از این مواد در فاز مایع قرار داده باشد.

در مطالعه‌ای دیگر، صباغی و مهرور [۱۵] در یک جاذب حرارتی با میکروکانال‌های دایروی شکل استفاده از مخلوط مواد تغییر فاز دهنده‌ی

سیال عامل آب خالص می‌باشد.

قرار گیرند.

در یک مطالعه‌ی متأخر، رستمی [۲۰] ویژگی‌های انتقال حرارت میکرو کپسول‌های تغییر فاز دهنده را در یک مینی کانال با استفاده از یک مدل دو فازی در چارچوب دیدگاه اولیری-لاگرانژی بررسی نمود. در این روش، فاز پیوسته‌ی مایع با استفاده از روش حجم کنترل، و ذرات تغییر فاز دهنده با استفاده از دیدگاه لاگرانژی مورد مطالعه قرار گرفتند. مطالعه عددی در طیف وسیعی از عدد رینولدز (محدوده ۲۵۰ تا ۱۰۰۰) و محدوده ۰ تا ۱۰ درصد غلظت حجمی ذرات انجام شده‌است. نتایج حاصله نشان دادند که بیشترین نرخ افزایش انتقال حرارت در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و غلظت حجمی ذرات ۱۰ درصد رخ داده‌است. در این حالت عدد ناسلت با افزایش ۱۳ درصدی همراه است. این افزایش اندک به دلیل عدم وجود ذرات تغییر فاز دهنده در نزدیک دیواره می‌باشد. در یک مطالعه‌ی تجربی جامع، هو و همکاران [۲۱] از اسلاری نانو کپسول‌های تغییر فاز دهنده ایکوزان در یک جاذب گرمایی از نوع میکروکانال مستطیلی برای دفع حرارت استفاده نمودند. در این مطالعه، تأثیر غلظت نانو ذرات تغییر فاز دهنده بر روی پارامترهایی همچون دمای دیواره کانال، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی، نرخ جریان و ضریب عملکرد بررسی شده‌است. نتایج بدست آمده نشان دادند که وجود نانو کپسول‌های تغییر فاز دهنده در سیال عامل، انتقال حرارت و ضریب عملکرد را به ترتیب ۷۰ و ۴۵ درصد بهبود بخشیده‌اند.

توجه به مطالعات صورت گرفته تا کنون نشان می‌دهد که ترکیب استفاده از طرح‌های نوین هندسی و مخلوط‌های حاوی ذرات تغییر فاز دهنده به عنوان سیال عامل خنک‌کاری، یک رهیافت قابل اتکا برای بهبود عملکرد حرارتی جاذب‌های حرارتی میکروکانالی است. از این رو در تحقیق حاضر استفاده از مخلوط حامل ذرات نانو کپسوله‌ی تغییر فاز دهنده در یک میکروکانال شامل حفره‌های سینوسی و در حضور دندانه‌های مستطیل شکل در میانه‌ی مجرا به عنوان یک راهکار جدید برای افزایش میزان انتقال حرارت درون جاذب‌های حرارتی میکروکانالی مورد بررسی خواهد گرفت. به این منظور از ابزار قابل اتکای دینامیک سیالات محاسباتی و یک مدل سه بعدی استفاده شده است تا پتانسیل موجود در طرح پیشنهادی برای استفاده در کاربردهای مرتبط با سرمایه‌های قطعات الکترونیکی ریز مقیاس به دقت مورد بررسی و سنجش قرار گیرد. هدف آن است که یک پتانسیل سنجی دقیق در مورد استفاده از اسلاری‌های حامل مواد تغییر فاز دهنده به عنوان سیال عامل در جاذب‌های حرارتی میکروکانالی با هندسه‌های پیچیده صورت پذیرد و عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی این سیالات عامل جدید به صورت توأمان مورد بررسی

## ۲- مدل‌سازی ریاضی

### ۲-۱- هندسه‌ی مسئله

در مطالعه‌ی حاضر، هندسه‌ی حل به صورت مدل یک میکروکانال با حفره‌های سینوسی بر روی دیواره‌ی مجرا و دندانه‌های مستطیلی در میانه‌ی مجرا به صورت نمایش درآمده در شکل ۱ (مشابه هندسه‌ی غنی و همکاران [۶]) در نظر گرفته شده‌است. پارامترهای هندسی مرتبط با طرح فوق در جدول ۱ به صورت تفصیلی معرفی شده‌اند. سیال عامل به صورت یکنواخت و با دمای ورودی برابر ۲۹۶ کلوین وارد مجرا می‌شود. کف کانال با شار حرارتی یکنواخت ( $q_w''$ ) برابر ۱۰۰ وات بر سانتی متر مربع به صورت پیوسته گرم می‌شود و سایر دیواره‌های کانال به صورت عایق در نظر گرفته می‌شوند. در خروجی سیال عامل به اتمسفر اطراف تخلیه می‌شود.

### ۲-۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در مطالعه‌ی حاضر جریان و انتقال حرارت آرام، پایا و تراکم ناپذیر مخلوط همگن حامل نانوذرات کپسوله شده‌ی تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای مدل سازی عددی جریان‌های مذکور از یک مدل تکفاز استفاده شده‌است و از اثرات گرمایش لزجی و لغزش در سطح تماس جامد-مایع صرف نظر شده‌است. از این رو معادلات حاکم در قالب معادلات بقای جرم، تکانه‌ی خطی و انرژی به شکل زیر قابل نمایش هستند [۱۷-۱۴]:

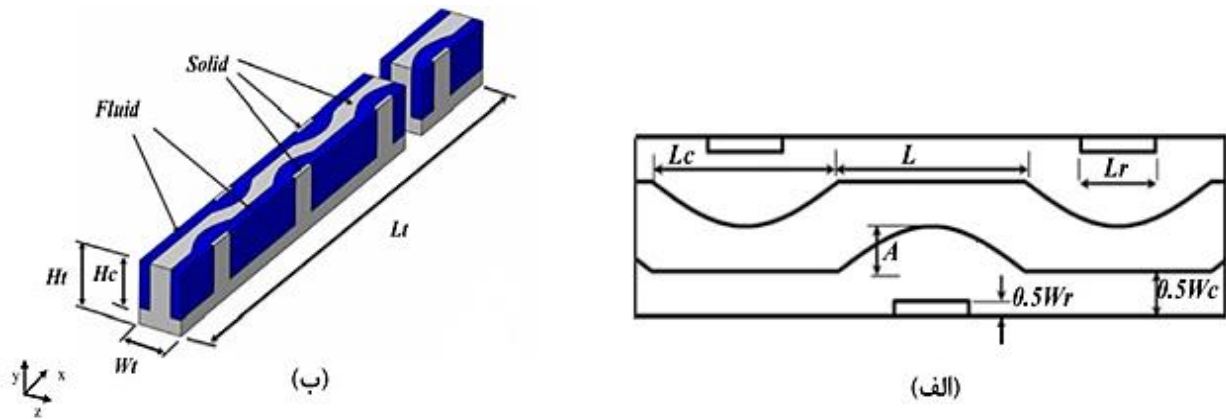
$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{eff} [\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T]) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\vec{V} (\rho_{eff} C_{p,eff} T)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (3)$$

در معادلات فوق ( $\vec{V}$ ) سرعت سیال، ( $P$ ) فشار سیال، ( $T$ ) دمای سیال می‌باشد. چگالی، لزجت، گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی مخلوط نیز با کمک نمادهای ( $\rho_{eff}$ )، ( $\mu_{eff}$ )، ( $C_{p,eff}$ ) و ( $k_{eff}$ ) به نمایش درآمده‌اند. در بدنه‌ی جامد جاذب گرمایی میکروکانالی نیز، معادله‌ی هدایت حرارتی به شرح ذیل برقرار است.

$$\nabla \cdot (k_s \nabla T_s) = 0 \quad (4)$$



شکل ۱. هندسه دامنهی حل

Fig. 1. The geometry of the microchannel heat sink

جدول ۱. پارامترهای هندسی مرتبط با میکروکانال با حفره‌های سینوسی و دندانه‌های مستطیلی

Table 1. Geometric parameters related to microchannels with sinusoidal cavities and rectangular ribs

مقدار (μm)	نماد	مؤلفه
۷۵	$A$	دامنه میکروکانال
۳۰۰	$H_c$	ارتفاع میکروکانال
۴۰۰	$H_t$	ارتفاع کل کانال
۱۰۰۰۰	$L_t$	طول کانال
۵۰۰	$L_c$	طول حفره
۲۵۰	$L_r$	طول دنده
۱۵۰	$W_c$	عرض کانال
۴۵	$W_r$	عرض دنده
۳۰۰	$W_t$	عرض کل یک کانال

۲-۳- خواص مواد

می‌باشد)

مخلوط مورد نظر در مطالعه‌ی حاضر شامل دو جز آب به‌عنوان سیال پایه و ذرات تغییر فاز دهنده از جنس اوکتادکان می‌باشند. خواص آب، به صورت توابع چند جمله‌ای از دما و براساس دیتاهای موجود در مرجع [۲۲] محاسبه شده‌اند. خواص ماده آلی اوکتادکان در جدول ۲ به نمایش درآمده‌است:

$$\rho_{eff} = \varphi_m \rho_{pcm} + (1 - \varphi_m) \rho_w \quad (۵)$$

برای تخمین لزجت مخلوط مورد نظر از رابطه‌ی توماس به شکل زیر استفاده می‌شود [۲۳]:  $(\varphi)$  کسر حجمی نانو ذرات می‌باشد.

$$\rho_{eff} = \varphi_m \rho_{pcm} + (1 - \varphi_m) \rho_w \quad (۶)$$

برای محاسبه‌ی خواص این مخلوط از روابط قابل اطمینان موجود در منابع علمی معتبر استفاده شده‌است. به‌صورت متداول چگالی مخلوط به‌صورت ترکیب خطی چگالی فاز مایع و جامد محاسبه شده‌است:  $(\varphi_m)$  کسر جرمی نانو ذرات، زیرنویس  $(p)$  مربوط به نانو ذرات و زیر نویس  $(w)$  مربوطه به آب

جدول ۲. خواص ترموفیزیکی اکتادکان [۱۶]

Table 2. Thermophysical properties of octadecane

قطر ذرات (nm)	ظرفیت گرمایی ( $\frac{J}{kg}$ )	هدایت حرارتی ( $\frac{W}{m.K}$ )	گرمای نهان ( $\frac{kJ}{kg}$ )	چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )
۱۰۰	۲۰۰۰	۰/۱۸	۲۴۴	۸۱۵

جدول ۳. شرایط مرزی

Table 3. Boundary conditions

میدان دما	میدان سرعت	مرز
$k_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) = 0, T_f = T_{in} = 296K$	$u = u_{inlet}, v = w = 0$	ورودی کانال
$\left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = 0, \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) = 0$	$P = P_{out} = 1atm$	خروجی کانال
$-k_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) = 0$	$u = v = w = 0$	مرز بالایی کانال
$q'' = -k_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) = 100 \frac{W}{cm^2}$	$u = v = w = 0$	دیواره پایینی کانال
$-k_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial n} \right) = -k_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial n} \right); T_s = T_f$	$u = v = w = 0$	سطوح مشترک جامد و سیال

مخلوط حامل نانوذرات کپسوله شده‌ی تغییر فاز دهنده از معادله‌ی (۸) استفاده خواهیم کرد [۲۵]:  $h_{sf}$  گرمای نهان تغییر فاز می‌باشد و  $C_{p,pcm}$  از جدول ۲ جایگذاری می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی مخلوط حامل نانوذرات کپسوله شده‌ی اکتادکان از معادله‌ی (۷) قابل محاسبه است [۲۴]:

$$C_{p,eff} = \varphi C_{p,p} + (1-\varphi)C_{pw} \quad (الف) \quad (۸)$$

$$C_{p,p} = C_{p,pcm} + \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{h_{sf}}{T_{mr} - C_{p,pcm}} \right) \cdot \sin \pi \left[ \frac{T - T_1}{T_{mr}} \right]; T_{mr} = T_2 - T_1$$

برای تکمیل معادلات حاکم، شرایط مرزی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر در قالب جدول ۳، جمع آوری شده‌اند:

$$\frac{k_{eff}}{k_b} = 1 + B\varphi Pe^m \quad (ب) \quad (۷)$$

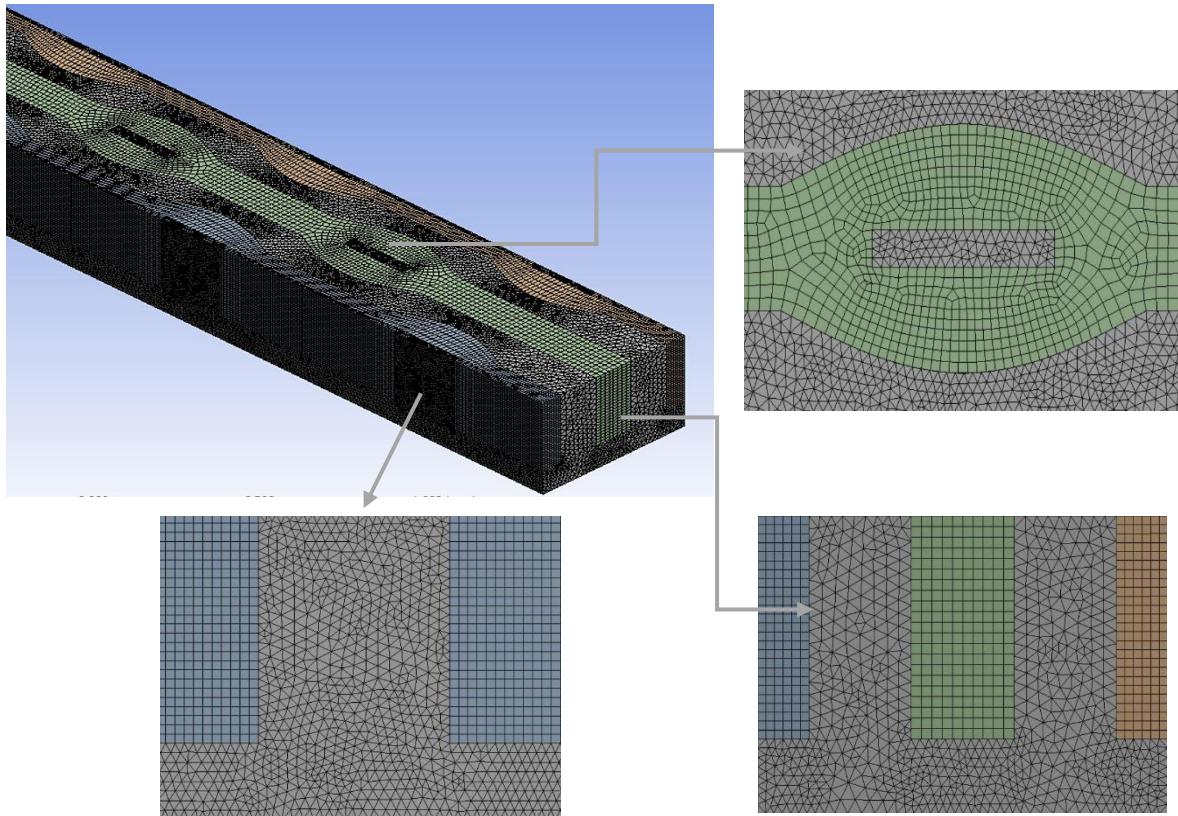
$$k_b = k_w \frac{2 + \frac{k_p}{k_w} + 2\varphi \left( \frac{k_p}{k_w} - 1 \right)}{2 + \frac{k_p}{k_w} + \varphi \left( \frac{k_p}{k_w} - 1 \right)}; \begin{cases} B=3, m=1.5 & Pe \leq 0.67 \\ B=1.8, m=0.18 & 0.67 < Pe < 250 \\ B=3, m=\frac{1}{11} & Pe \geq 250 \end{cases}$$

$$Pe = \frac{ed_p^2}{\alpha_w}; e = \left\| \frac{\nabla \bar{V} + \nabla \bar{V}^T}{2} \right\|; \alpha_w = \frac{k_w}{\rho_w C_{p,w}}$$

### ۳- روش عددی و اثر اندازه‌ی مش

برای شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت مخلوط حامل نانوذرات کپسوله شده‌ی مواد تغییر فاز دهنده از نرم افزار انسیس فلوئنت و روش حجم محدود استفاده شده‌است. در این راهکار، شار جابه‌جایی با روش پادباسوی مرتبه‌ی

برای ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی اکتادکان فرآیند ذوب از دمای اولیه‌ی ۲۹۶/۱۵ کلین ( $T_1$ ) آغاز شده و تا دما نهایی ۳۰۶/۱۵ کلین ( $T_2$ ) ادامه می‌یابد. در این محدوده تغییر فاز ظرفیت حرارتی رشد می‌کند تا به مقدار بیشینه‌ی خود در میانه‌ی بازه‌ی ذوب برسد. برای محاسبه‌ی ظرفیت حرارتی



شکل ۲. مش عددی تولید شده برای میکروکانال با حفره‌های سینوسی و دندانه‌های مستطیلی

Fig. 2. Numerical mesh produced for microchannels with sinusoidal cavities and rectangular ribs

در نظر گرفته شده‌است). همانگونه که مشاهده می‌شود، استفاده از شبکه شماره‌ی ۶ به پاسخ‌های عددی مستقل از اندازه‌ی شبکه عددی منجر می‌شود.

#### ۴- ارائه نتایج و بحث و بررسی

##### ۴-۱- صحت سنجی

برای صحت سنجی مدل عددی به کار برده شده در مطالعه‌ی حاضر دو مورد صحت سنجی به شرح زیر انتخاب شده‌اند:

**الف) مورد صحت سنجی اول.** گوپیل و همکاران [۲۶] در مطالعه‌ی تجربی خود، جریان و انتقال حرارت مخلوط با سیال پایه آب حامل میکروذرات کپسوله شده تغییر فاز دهنده را مورد مطالعه قرار دادند. این بررسی آزمایشگاهی در رژیم جریان آرام و درون یک لوله‌ی دایروی به قطر ۳ میلی‌متر که دیواره‌ی آن با شار حرارت یکنواخت گرم می‌شد صورت پذیرفت. در مطالعه‌ی حاضر، مسئله فوق برای غلظت مواد تغییر فاز دهنده‌ی

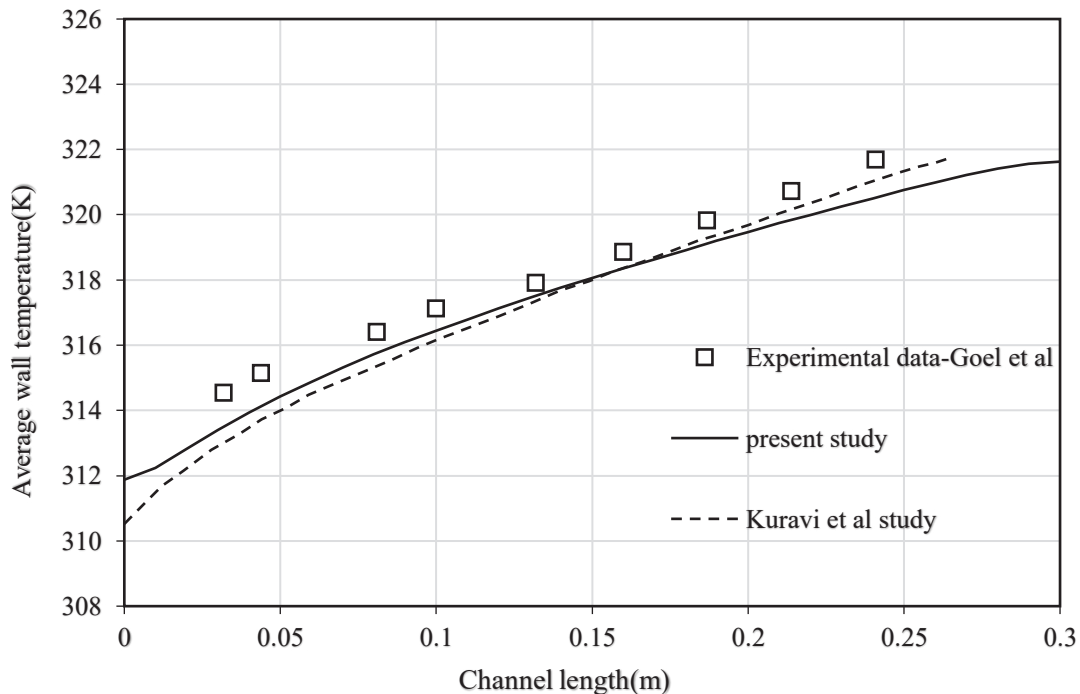
دوم و شار پخشی با استفاده از تفاضل مرکزی مرتبه‌ی دوم تخمین زده شده‌است. برای پیشبرد حل میدان جریان سیال از روش تصحیح فشار سیمپل استفاده شده‌است و معیار همگرایی برای تمامی معادلات در نرم افزار انسیس فلونت برابر  $10^{-6}$  تنظیم شده‌است. برای گسسته سازی دامنه‌ی حل از یک مش عددی چند بلوکه مطابق شکل ۲ استفاده شده‌است. سعی شده‌است که در نزدیکی سطوح جامد، مش عددی به اندازه‌ی کافی ریز شود تا بتوان با دقت مناسب پدیده‌های مرتبط با انتقال حرارت را مورد بررسی قرار داد.

به منظور دستیابی به حل‌های عددی مستقل از اندازه‌ی شبکه‌ی عددی، اثر اندازه‌ی شبکه بر روی پاسخ عددی بدست آمده به صورت تفصیلی مطالعه شده‌است. به عنوان نمونه‌ای از این مطالعه در جدول ۴ اثر اندازه‌ی شبکه بر روی دمای ماکزیمم کف کانال که یک پارامتر بسیار مهم در طراحی جاذب‌های حرارتی میکروکانالی است ارائه شده‌است. (در این مورد مطالعاتی سرعت سیال ورودی برابر ۱ متر بر ثانیه و غلظت نانوذرات برابر ۱۰ درصد

جدول ۴. اثر تعداد سلول‌های محاسباتی بر روی دمای ماکزیمم کف میکروکانال

Table 4. Effect of computational number of cells on the maximum temperature of the microchannel floor

شماره‌ی مش	تعداد سلول محاسباتی	دمای ماکزیمم کف کانال (K)	خطا (%)
۱	۱۰۱۷۵۹۰	۳۲۱/۶۲۸	-
۲	۱۲۵۰۶۱۴	۳۲۱/۶۶۳	۰/۲۹
۳	۱۵۱۶۴۵۲	۳۲۱/۴۹۴	۰/۰۵
۴	۱۷۴۸۶۱۵	۳۲۱/۳۱۶	۰/۰۵
۵	۲۰۲۳۱۰۳	۳۲۱/۶۱۴	۰/۰۹
۶	۲۲۵۰۸۴۹	۳۲۱/۶۱۸	۰/۰۰۱



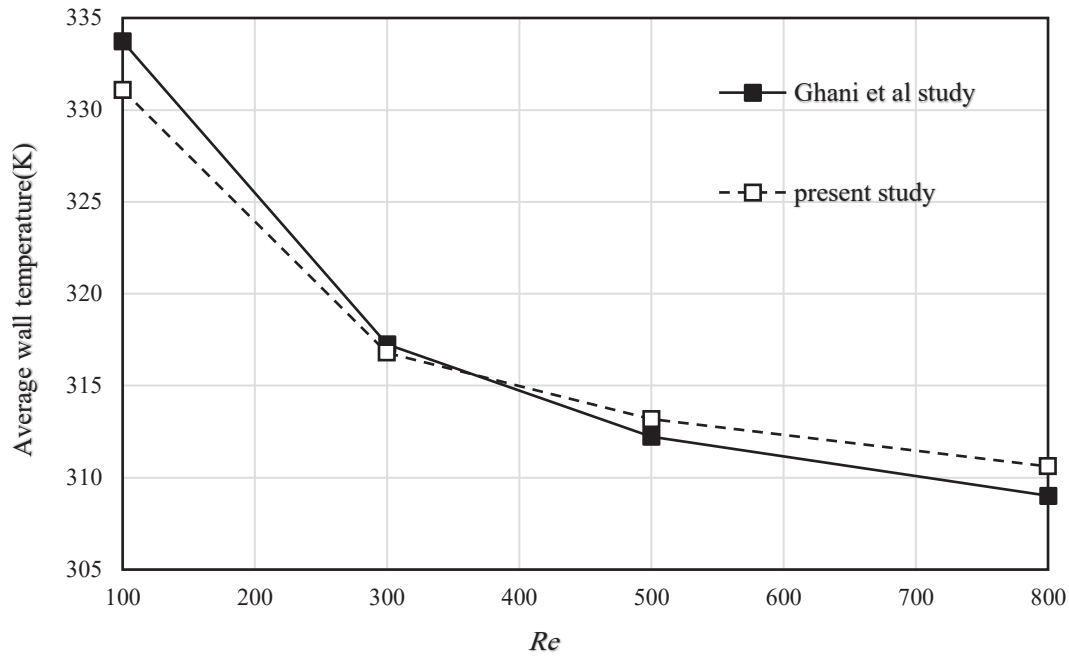
شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج پژوهش عددی حاضر با نتایج گوئل و همکاران [۲۶] و کوراوی و همکاران [۲۷] (مورد صحت‌سنجی اول)

Fig. 3. Comparison of the results of the present numerical research with the results of Goel et al. [26] and Kuravi et al. [27]

نشانگر دقت مناسب حلگر عددی به کار رفته در پژوهش حاضر است.  
**ب) مورد صحت‌سنجی دوم.** غنی و همکاران [۶] در یک مطالعه‌ی عددی جریان و انتقال حرارت آب را درون یک جاذب گرمایی میکروکانالی با حفره‌های سینوسی در حضور/عدم حضور دندان‌های مستطیلی مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش حاضر، مسئله‌ای مشابه مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و

۱۰٪ و در عدد رینولدز ۲۰۰ شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۳ با نتایج تجربی مرجع [۲۵] و نتایج عددی کوراوی و همکاران [۲۷] که مسئله‌ای مشابه‌ای را شبیه‌سازی کردند مقایسه شده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی حاضر تطابق خوبی با نتایج تجربی و عددی پیشین دارد و بیشینه‌ی خطای بدست آمده در حدود ۰/۳ درصد می‌باشد که





شکل ۴. مقایسه نتایج پژوهش عددی حاضر با نتایج عددی غنی و همکاران [۶] (مورد صحت سنجی دوم)

Fig. 4. Comparison of the present numerical research results with the numerical results of Ghani et al [6]

زیر تعریف می‌شود،

$$Nu = \frac{q_w'' D_h}{k_b (T_{wall} - T_{avg})} \quad (10)$$

و-  $(T_{wall})$  دمای متوسط کف کانال و  $(T_{avg})$  دمای متوسط سیال می‌باشد. ضریب اصطکاک متوسط در طول میکروکانال عبارتست از:

$$f = \frac{2D_h \Delta P}{L_t \rho_{eff} U^2} \quad (11)$$

نهایتاً به منظور سنجش کارایی حرارتی-هیدرودینامیکی طرح حاضر ضریب عملکرد به صورت نسبت بهبود انتقال حرارت در طرح حاضر به نسبت رشد افت فشار طرح حاضر نسبت به یک حالت پایه تعریف می‌شود: (زیرنویس صفر مربوط به استفاده از آب خالص به عنوان سیال پایه است که طرح جدید نسبت به آن سنجیده می‌شود)

$$pf = \frac{\frac{Nu}{Nu_0}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (12)$$

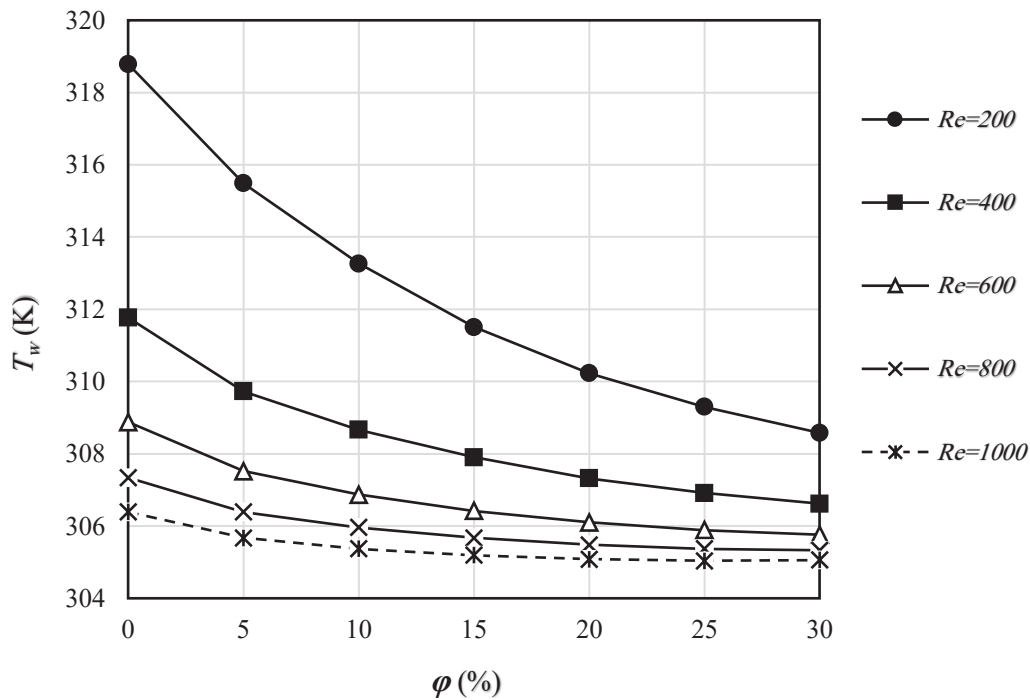
در شکل ۴ مقادیر بدست آمده برای دمای متوسط کف کانال با نتایج گزارش شده توسط غنی و همکاران [۶] مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. بیشینه انحراف دو حل عددی از هم برابر یک درصد بدست آمد که بار دیگر موید قابل اعتماد بودن نتایج عددی ارائه شده در پژوهش حاضر است.

۴-۲- سنجش کارایی حرارتی مخلوط حاوی نانوذرات کپسوله شده تغییر فاز دهنده

در این بخش قصد داریم تا به شبیه‌سازی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری یک مخلوط حاوی نانوذرات کپسوله شده تغییر فاز دهنده پردازیم و کارایی آنها را برای استفاده در یک جاذب حرارتی میکروکانالی به دقت مورد بررسی و تحقیق قرار دهیم. به این منظور عدد بی بعد رینولدز با کمک معادله‌ی (۹) تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho_{eff} U D_h}{\mu_{eff}} \quad (9)$$

در معادله‌ی (۹)،  $(U)$  سرعت متوسط سیال در مجرا و  $(D_h)$  قطر هیدرولیکی معادل مجرا می‌باشد. همچنین عدد بی بعد ناسلت نیز به شکل



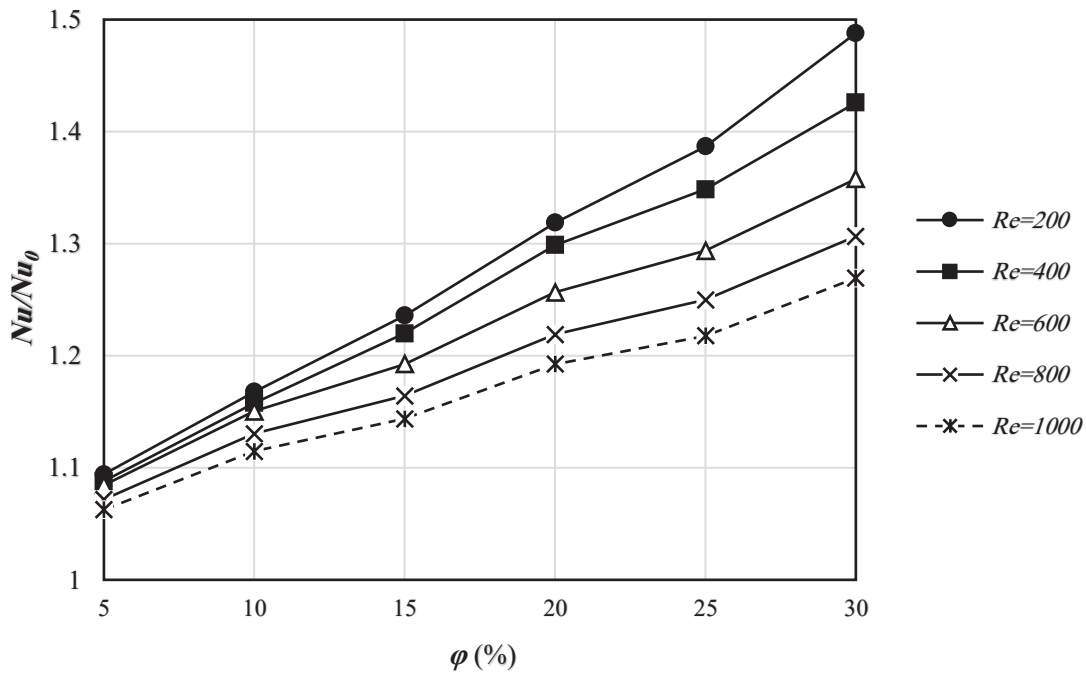
شکل ۵. اثر غلظت حجمی نانوذرات تغییر فاز دهنده بر دمای متوسط کف میکروکانال در اعداد رینولدز مختلف

Fig. 5. Effect of volume concentration of NEPCM on average microchannel bottom temperature in different Reynolds numbers

خنک کننده وجود دارد: الف) افزایش ظرفیت گرمایی ب) کاهش هدایت حرارتی، از آنجا که انتقال حرارت از دیوار به ناحیه هسته جریان با افزایش غلظت ضعیف تر می شود، به منظور استفاده از گرمای نهان نانو کپسوله های تغییر فاز دهنده در منطقه هسته جریان، طول کانال خاصی لازم است، که در مسئله مورد بررسی به علت طول کانال مناسب، افزایش ظرفیت گرمایی غالب است.

به صورت طبیعی با افزایش عدد رینولدز و تقویت جریان سیال انتقال حرارت تقویت شده و دما متوسط کف کانال کاهش می یابد. توجه به این نکته ضروری است که با افزایش عدد رینولدز اثر افزودن نانو ذرات کپسوله شده ی تغییر فاز دهنده به سیال پایه در تقویت عملکرد خنک کاری آن کاهش می یابد. به عنوان نمونه در عدد رینولدز ۲۰۰ و برای کسر حجمی ۳۰ درصد نانوذرات دمای کف کانال نسبت به حالتی که تنها آب خالص به عنوان خنک کن در جاذب حضور یابد ۳/۲ درصد کاهش یافته است در حالی که این کاهش برای عدد رینولدز ۱۰۰۰ چیزی در حدود ۰/۴۳ درصد می باشد. برای تحلیل این روند کافی است به این نکته توجه کنیم که با افزایش عدد رینولدز

به منظور بررسی اثر افزودن نانوذرات تغییر فاز دهنده به یک سیال پایه ی متداول مثل آب، در شکل ۵، تغییرات دمای متوسط کف میکروکانال با غلظت حجمی این نانوذرات در ۵ عدد رینولدز ترسیم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، در تمامی گستره ی اعداد رینولدز مطالعه شده در تحقیق حاضر با افزودن نانوذرات کپسوله شده دمای کف مجرا کاهش یافته و در نتیجه عملکرد حرارتی جاذب حرارتی در اثر افزایش ظرفیت گرمایی سیال کاری تقویت شده است. شیب این بهبود عملکرد برای غلظت های پایین تر نانوذرات بیشتر بوده و نهایتاً در غلظت های بیش از ۲۰٪ تغییرات دمای کف کانال با کسر حجمی نانوذرات کپسوله شده به شدت کاهش می یابد. از لحاظ فیزیکی غلظت جرمی بالاتر نانو ذرات تغییر فاز دهنده منجر به کاهش هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی محسوس می شود. از آنجا که در یک جریان لایه ای (آرام) انتقال حرارت در جهت عمود بر جریان فقط با هدایت صورت می گیرد. این کاهش هدایت حرارتی با افزایش غلظت، باعث ضعیف تر شدن انتقال حرارت به ناحیه اصلی جریان می شود. با افزایش غلظت نانو کپسوله های تغییر فاز دهنده مخلوط، دو اثر متضاد بر عملکرد



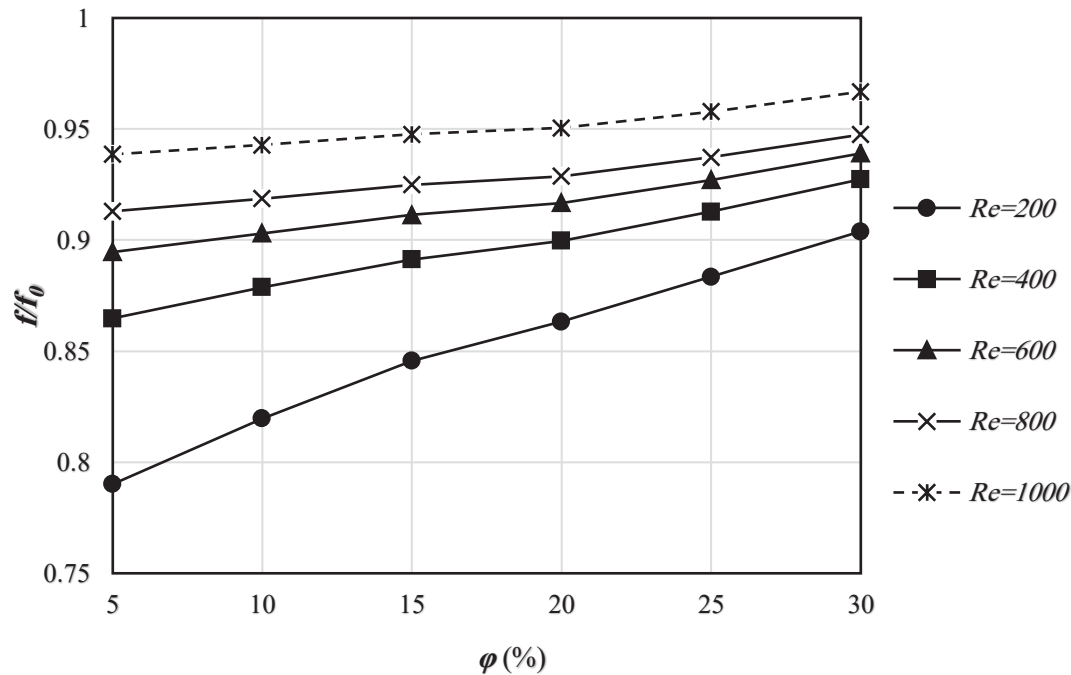
شکل ۶. اثر غلظت حجمی نانوذرات تغییر فاز دهنده بر عدد ناسلت متوسط نسبی میکروکانال در اعداد رینولدز مختلف

Fig. 6. Effect of volume concentration of NEPCM on Relative mean Nusselt number in different Reynolds numbers

بوده و آغاز ذوب نانوکپسول‌ها در دمای ۲۹۶/۱۵ کلوین می‌باشد یعنی فرآیند ذوب نانوذرات از نزدیکی ورودی میکروکانال آغاز می‌شود (فرآیند تغییر فاز در میکروکانال رخ می‌دهد. در حین این فرآیند ذوب انتقال حرارت محسوس بین سطح گرم پایینی جاذب حرارتی و سیال پایه (آب) توسط انرژی حرارتی مورد نیاز برای ذوب ذرات جامد قویت شده و این امر سبب افزایش انتقال حرارت کل و عدد ناسلت متوسط می‌گردد. بنابراین افزودن نانوذرات تغییر فاز دهنده به سیال پایه باعث افزایش انتقال حرارت و بهبود عملکرد حرارتی اسلاری حاصل در مسئله‌ی مورد مطالعه خواهد شد. در محدوده‌ی مورد مطالعه در تحقیق حاضر، استفاده از مخلوط حامل نانوذرات کپسوله شده‌ی تغییر فاز دهنده باعث افزایش ۶ تا ۴۸ درصدی عدد ناسلت نسبت به سیال پایه‌ی آب می‌شود. با افزایش غلظت نانوکپسول‌ها، پتانسیل بیشتری برای دفع مقدار قابل توجهی حرارت از طریق انرژی نهان ذوب وجود خواهد شد و این امر روند صعودی نمودار عدد ناسلت متوسط را در شکل ۶ و در هر عدد رینولدز تبیین می‌کند.

و به طبع آن سرعت سیال، زمان اقامت مواد تغییر فاز دهنده در میکروکانال به شدت کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌شود تا مواد تغییر فاز دهنده فرصت کافی برای جذب حرارت و تغییر فاز را نداشته باشند و اثر حضور آن‌ها در عملکرد حرارتی مخلوط به شدت کاهش می‌یابد. همچنین این روند در اثر کاهش هدایت حرارتی مخلوط نسبت به آب خالص با افزودن مواد تغییر فاز دهنده به آن تشدید می‌شود.

عدد ناسلت متوسط معیار کمی مناسبی برای سنجش عملکرد حرارتی مخلوط‌های مورد مطالعه در یک جاذب حرارتی میکروکانالی است. از این رو در شکل ۶، اثر عدد رینولدز و غلظت نانوذرات کپسوله شده بر روی عدد ناسلت متوسط نسبت به حالت پایه به نمایش درآمده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، عدد ناسلت تابع صعودی از غلظت نانوذرات تغییر فاز دهنده است و رشد عدد ناسلت با غلظت مواد تغییر فاز دهنده دارای روند تقریباً خطی است. برای توجیه فیزیکی این روند کافی است به این نکته توجه کنیم که، وقتی دمای ورودی اسلاری در محدوده‌ی دمای ذوب ذرات تغییر فاز دهنده قرار می‌گیرد (در مسئله‌ی حاضر دمای ورودی برابر ۲۹۶ کلوین



شکل ۷. اثر غلظت حجمی نانوذرات تغییرفاز دهنده بر ضریب اصطکاک نسبی در اعداد رینولدز مختلف

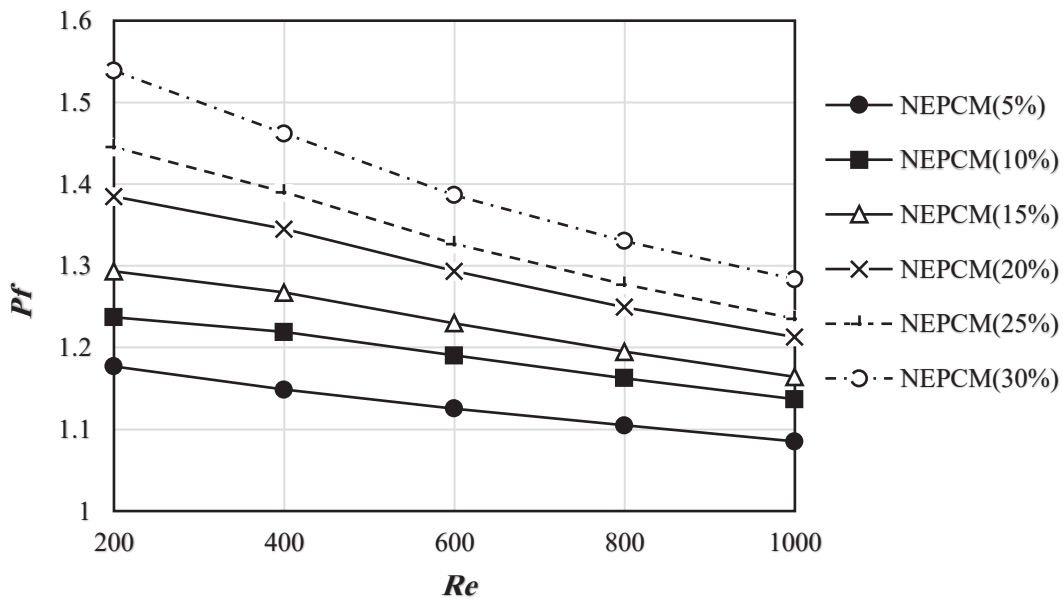
Fig. 7. Effect of Volumetric Concentration of NEPCM on Relative Friction Factor in Different Reynolds Numbers

لزجی بین اسلاری و دیواره مجرا رشد کرده و افت فشار شدیدتری بین دو سر میکروکانال حاکم شود. همچنین در یک عدد رینولدز برابر، چون چگالی مخلوط نسبت به آب خالص کمتر است از این رو سرعت جریان یافتن آن در مجرا بیشتر خواهد بود. این امر سبب می‌شود که بدلیل حضور مجذور سرعت در مخرج تعریف ضریب اصطکاک، ضریب اصطکاک نسبی برای مخلوط حاوی مواد تغییرفاز دهنده عددی کمتری از یک را اتخاذ کند.

با توجه به نتایجی که پیشتر ذکر شد، افزایش غلظت نانوذرات کپسوله شده تغییرفاز دهنده از یک سو مقدار انتقال حرارت را در میکروکانال افزایش می‌دهد و از سوی دیگر افت فشار بین دو سر کانال را نیز افزایش می‌دهد. از این رو برای سنجش کارایی حرارتی-هیدرودینامیکی مخلوط حامل نانوذرات تغییر فاز دهنده لازم است تا از تعریف ضریب عملکرد مطابق معادله‌ی (۱۲)، استفاده نمود. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود برای محدوده‌ی مورد مطالعه در تحقیق حاضر ضریب عملکرد بالاتر از یک برای مخلوط گزارش شده‌است و این امر مؤکد عملکرد مناسب حرارتی این نوع از سیال عامل برای جاذب‌های حرارتی میکروکانالی است. همانطور که

نکته‌ی مهم دیگر این است که اثر حضور نانوذرات تغییرفازدهنده در اعداد رینولدز پایین‌تر بیشتر می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر بیشترین درصد افزایش عدد ناسلت در سیال مورد مطالعه نسبت به آب خالص مربوط به حالت غلظت حجمی ۳۰ درصد با عدد رینولدز ۲۰۰ می‌باشد. علت آن است که در سرعت‌های بالا زمان ماندگاری مواد تغییرفاز دهنده در مجرا بسیار کوتاه است. از این رو این مواد زمان کافی برای جذب حرارت و آغاز فرآیند تغییرفاز را ندارند و به صورت طبیعی این امر سبب کاهش عدد ناسلت نسبی در اعداد رینولدز بالاتر می‌شود.

به منظور بررسی عملکرد هیدرودینامیکی مخلوط‌های حاوی نانوذرات تغییرفاز دهنده در شکل ۷، نسبت ضریب اصطکاک مخلوط به ضریب اصطکاک آب در عدد رینولدز برابر ترسیم شده‌است. همان گونه که مشاهده می‌شود در تمامی محدوده‌ی عدد رینولدز مورد مطالعه در تحقیق حاضر افزودن نانوذرات کپسوله شده سبب افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک خواهد شد. این امر با توجه به افزایش لزجت مخلوط با غلظت حجمی نانوذرات روند طبیعی است. این افزایش لزجت سبب می‌شود تا تنش برشی



شکل ۸. اثر غلظت حجمی نانو ذرات تغییرفاز دهنده بر ضریب عملکرد در اعداد رینولدز مختلف

Fig. 8. Effect of volume concentration of NEPCM on performance factor in different Reynolds numbers

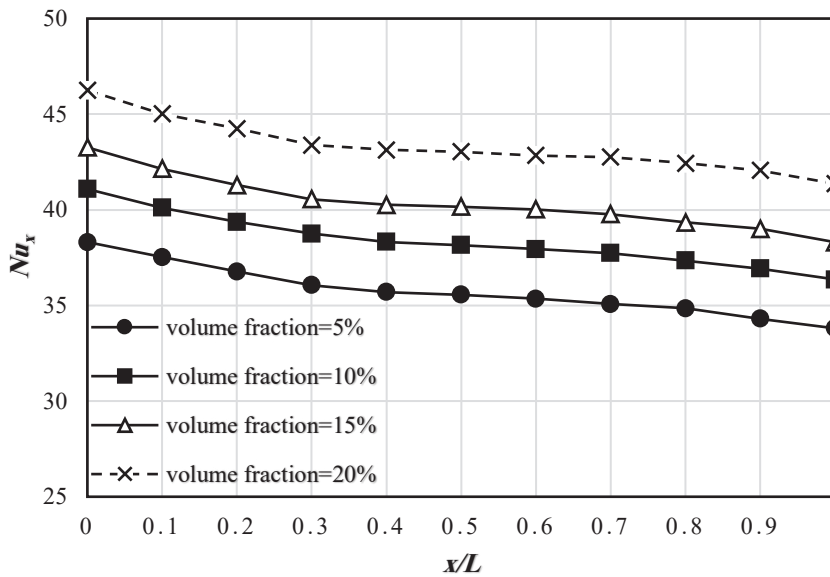
اثر اول رشد لایه مرزی حرارتی که به کاهش گرادیان‌های دما و کاهش عدد نوسلت موضعی منجر می‌شود و دیگری رخدادن فرآیند تغییر فاز که در حین به وقوع پیوستن اثر افزایشی بر میزان انتقال حرارت موضعی خواهد داشت. بر هم نهدی این دو اثر متضاد سبب بدست آمدن نمودارهای شکل ۹ می‌شود. در این نمودارها اگرچه روند کلی تغییرات عدد ناسلت موضعی کاهش می‌یابد اما آهنگ این کاهش در نواحی مختلف جریان متفاوت است. در میانه‌ی مجرا که در آن فرآیند تغییر فاز بشدت در حال وقوع است، روند کاهش عدد نوسلت موضعی بشدت تعدیل می‌شود اما در ابتدا و انتهای مجرا (جایی که فرآیند تغییرفاز قابل توجهی مشاهده نمی‌شود) روند تغییرات نزولی عدد نوسلت شدیدتر گزارش شده‌است.

#### ۴-۳- جزئیات میدان‌های سرعت و دما

در بخش پایانی مطالعه‌ی حاضر، قصد داریم تا به بررسی جزئیات میدان‌های دما و سرعت درون جاذب گرمایی و برای مخلوط حاوی نانوکپسول‌های مواد تغییرفاز دهنده بپردازیم. به این منظور، در شکل ۱۰، کانتورهای سرعت در طول میکروکانال در نظر گرفته شده برای مطالعه حاضر و برای سه درصد حجمی مختلف از نانوکپسول‌ها به نمایش درآمده‌است.

در شکل ۸ نیز واضح است با افزایش غلظت حجمی شاهد افزایش ضریب عملکرد کلی سیال هستیم. با افزایش غلظت ذرات تغییر فاز دهنده، ظرفیت جذب و ذخیره حرارتی سیال مؤثر بیشتر شده و این اسلاری در مدت زمان عبور از میکروکانال، حرارت بیشتری را ذخیره و از سیستم خارج می‌کند، که خود باعث خنک سازی مؤثرتر سیستم می‌شود. همچنین، بیشینه‌ی ضریب عملکرد برابر  $1/54$  و برای کمترین عدد رینولدز و برای بیشترین غلظت ذرات گزارش شده‌است. با افزایش عدد رینولدز و کاهش غلظت ذرات ضریب عملکرد نیز روند کاهشی از خود نشان می‌دهد. از دیدگاه جامع‌تر با توجه به بزرگتر بودن تمامی ضرایب عملکرد از عدد یک، می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از مخلوط حاوی نانو کپسوله‌های تغییر فاز دهنده با غلظت‌های متفاوت در این هندسه عملکرد حرارتی-هیدرودینامیکی مناسب‌تری از آب خالص دارند. اما این بهبود عملکرد برای اعداد رینولدز کوچکتر چشمگیرتر می‌باشد و استفاده از این نانو ذرات تغییرفاز دهنده در سرعت‌های پایین درون جاذب‌های حرارتی میکروکانالی قابل توصیه می‌باشد.

به عنوان آخرین مورد در بخش حاضر، در شکل ۹، تغییرات عدد ناسلت موضعی درون میکروکانال برای غلظت‌های مختلف نانوکپسول‌ها به نمایش درآمده‌است. در تحلیل این نمودارها باید دو اثر توأمان را همواره در نظر داشت:



شکل ۹. اثر غلظت حجمی نانو ذرات تغییرفاز دهنده بر عدد نوسلت محلی در اعداد رینولدز مختلف

Fig. 9. Effect of Volumetric Concentration of NEPCM on Local Nusselt Number in Different Reynolds Numbers

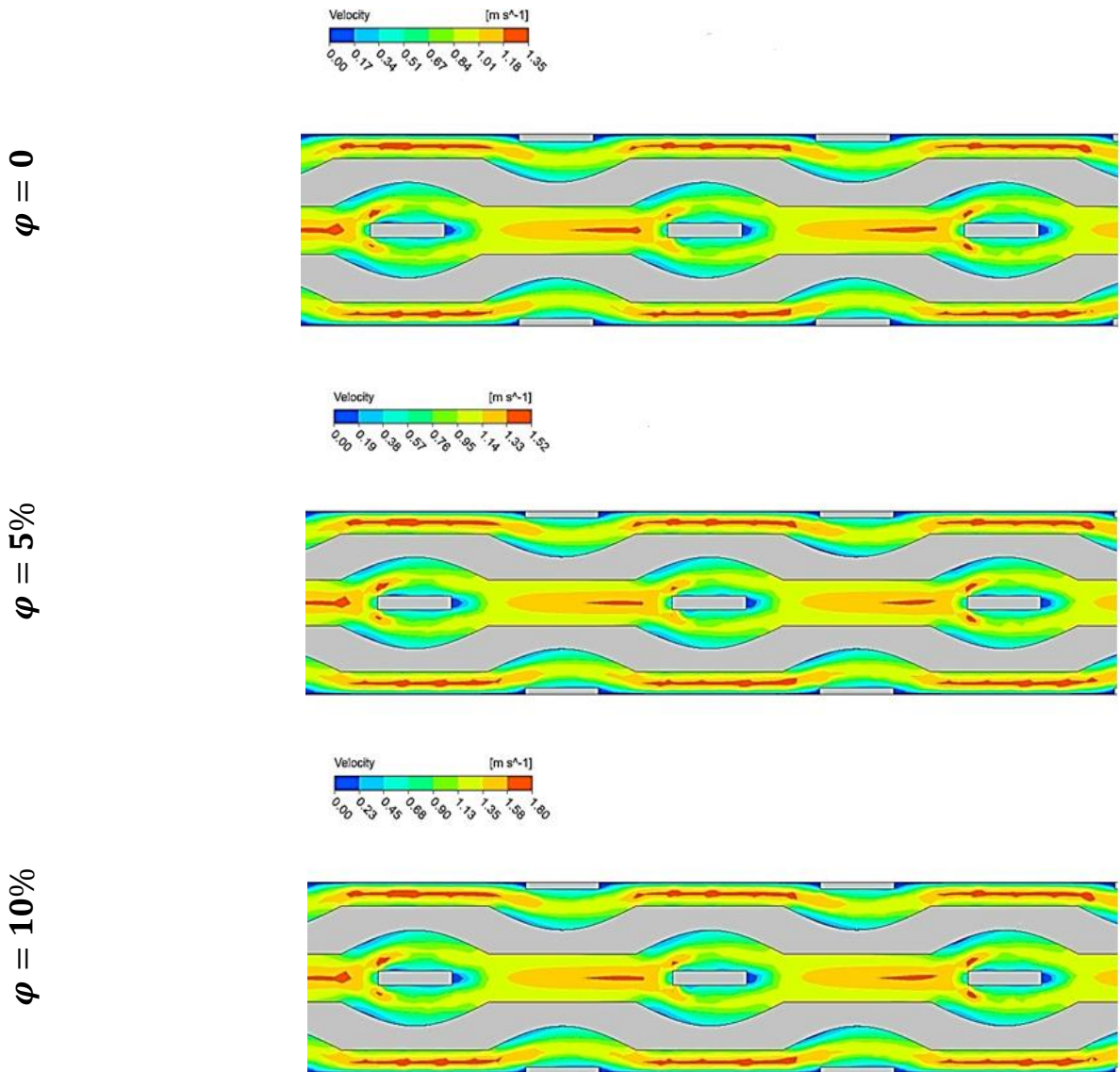
افزودن نانوکپسول‌ها توزیع دمای یکنواخت‌تری در مجرا بدست آمده و این امر گرادین‌های دما در میکروکانال را کاهش می‌دهد و از ایجاد نقاط داغ موضعی بر روی هندسه‌ی جریان جلوگیری می‌کند. این امری بسیار مهم در فرآیند خنک قطعات الکترونیکی است. در واقع دلیل این یکنواختی بیشتر دما درون مجرای ریز مقیاس چیزی جز حضور فرآیند تغییرفاز و جذب حرارت به صورت انرژی نهان ذوب نیست. در واقع نانوذرات در حین فرآیند ذوب مقدار قابل توجهی انرژی گرمایی را به خود جذب می‌کنند و از افزایش دمای سیال پایه به صورت محسوس تا حد قابل توجهی جلوگیری می‌کنند.

#### ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به کمک دانش دینامیک سیالات محاسباتی، استفاده از مخلوط حاوی نانوذرات کپسوله شده‌ی مواد تغییرفاز دهنده در یک جاذب حرارتی میکروکانالی مورد بررسی قرار گرفت. در طراحی هندسی جاذب حرارتی از ترکیب حفره‌های سینوسی و دندان‌های مستطیلی شکل به منظور افزایش اختلاط جریان و بهبود انتقال حرارت جابه جایی اجباری استفاده گردید. جریان آرام و دائم در محدوده‌ی عدد رینولدز ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از خواص مؤثر برای مخلوط مورد نظر شبیه‌سازی عددی صورت پذیرفت. نتایج حاصل نشان دادند که افزودن مواد

همان گونه که مشاهده می‌شود، برای تمامی غلظت‌های نانوکپسول‌ها، بیشینه سرعت در فاصله‌ی بین دو حفره‌ی سینوسی و در جایی که سطح مقطع عبوری سیال در میکروکانال کمینه است مشاهده می‌شود. با ورود سیال به فضای حفره‌ها از شدت سرعت سیال کاسته شده اما به دلیل اختلاط بهتر جریان توزیع یکنواخت‌تری از سرعت مشاهده می‌شود. با رسیدن سیال به دندان‌های میانی جدایش لایه مرزی مشاهده شده و در پشت هر دندان یک ناحیه‌ی کم سرعت تشکیل می‌شود. همچنین مقایسه کانتورهای سرعت در غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد که افزودن نانوکپسول‌ها به سیال پایه تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های عمومی میدان جریان سیال ندارد.

در شکل ۱۱، کانتورهای دما برای چهار غلظت حجمی نانوکپسول‌ها در طول میکروکانال به نمایش درآمده‌اند. به صورت طبیعی با گذر سیال کاری از درون میکروکانال و جذب حرارت از صفحه‌ی گرم پایینی مجرا، دما سیال در طول کانال رشد می‌کند. بیشینه‌ی دما در مجاورت صفحه‌ی گرم و در خروجی کانال رخ می‌دهد و مقدار این دما بیشینه برای آب خالص در عدد رینولدز ۲۰۰ برابر ۳۲۸ کلوین است که استفاده از نانوکپسول‌ها با غلظت نه چندان زیاد ۱۰ درصد می‌تواند دمای بیشینه را تا ۳۱۹ کلوین نیز کاهش دهد. از سوی دیگر مقایسه‌ی کانتورهای دما برای آب خالص و مخلوط حامل مواد تغییرفاز دهنده از این نکته‌ی مهم حکایت دارد که با

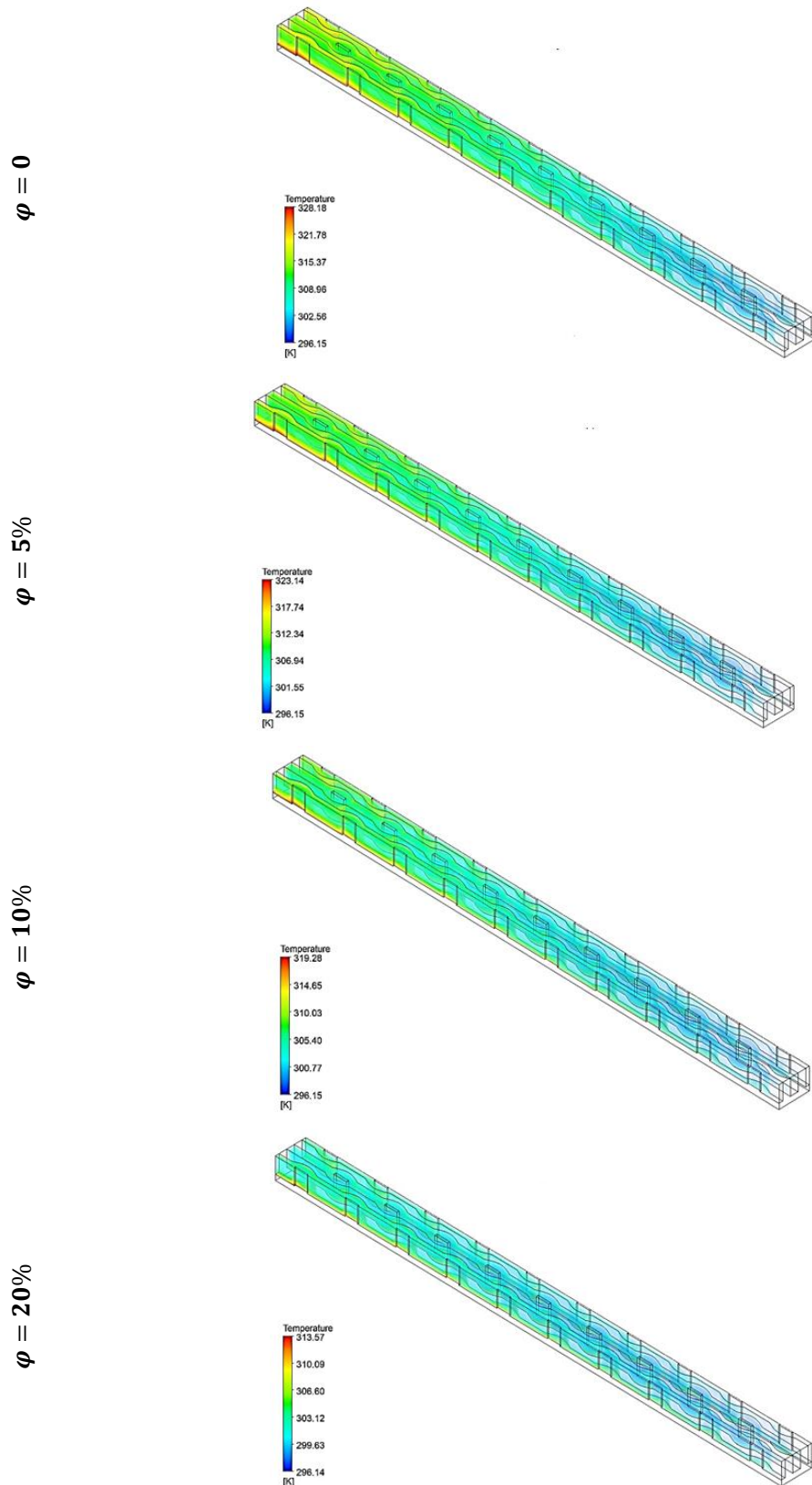


شکل ۱۰. کانتور سرعت سیال در عدد رینولدز  $200+$  و برای سه غلظت حجمی نانوکپسول تغییرفاز دهنده

Fig. 10. Fluid velocity distribution contour at Reynolds number 200 for three volumetric concentrations of NEPCM

حرارت بر اثر افزایش افت فشار غلبه داشته و ضریب عملکردهای در بازه‌ی ۱ تا ۱/۵ برای محدوده‌ی مورد مطالعه در تحقیق حاضر گزارش شده‌است. نهایتاً نتیجه‌گیری شد که استفاده از نانوکپسوله‌های مواد تغییرفاز دهنده در اعداد رینولدز پایین موثرتر بوده و افزایش عدد رینولدز کارایی حرارتی مخلوط حاوی مواد تغییرفاز دهنده را کاهش می‌دهد.

تغییرفاز دهنده به شکل کپسول‌های ریز مقیاس به یک سیال پایه‌ی متداول همچون آب باعث افزایش انتقال حرارت و بهبود عملکرد حرارتی می‌شود. افزایش تا ۴۸ درصدی عدد ناسلت در این مطالعه گواهی بر این مدعاست. از سوی دیگر افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک نیز با افزودن نانوکپسول‌ها مشاهده می‌شود اما مطالعه‌ی ضرب عملکرد نشان داد که اثر افزایش انتقال



شکل ۱۱. کانتور دمای سیال در عدد رینولدز  $200+$  و برای چهار غلظت حجمی نانوکپسول تغییر فاز دهنده

Fig. 11. Fluid temperature distribution contour at Reynolds number 200 for three volumetric concentrations of NEPCM



## ۶- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

سیال	$f$
ماده تغییر فاز دهنده	$pcm$
نانو ذرات	$p$
دنده	$r$
جامد	$s$
کل	$t$
آب	$w$

$A$	دامنه حفره نسبی، $\mu\text{m}$
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، $\text{J/kg.K}$
$D_h$	قطر هیدرولیکی، $\text{m}$
$d_p$	قطر ذرات نانو کپسوله، $\text{m}$
$\vec{e}$	نرخ برش، $1/s$
$H_{ch}$	ارتفاع میکروکانال، $\mu\text{m}$
$H_t$	ارتفاع کل کانال، $\mu\text{m}$
$H_e$	انتالی کل سیال، $\text{J/kg}$
$h_e$	انتالی محسوس سیال، $\text{J/kg}$
$K_{ef}$	ضریب رسانش مؤثر سیال حاوی ذرات تغییر فاز دهنده، $\text{W/m.K}$
$L_t$	طول کل کانال، $\mu\text{m}$
$L_c$	طول حفره سینوسی، $\mu\text{m}$
$L_r$	طول دنده مستطیلی، $\mu\text{m}$
$L$	گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده، $\text{J/kg}$
$Pe$	عدد پکلت
$T_f$	دمای سیال، $\text{K}$
$T_{solidus}$	دمای مخلوط حامل ماده تغییر فاز دهنده در حالت جامد، $\text{K}$
$T_{liquidus}$	دمای مخلوط حامل ماده تغییر فاز دهنده در حالت مایع، $\text{K}$
$\vec{V}$	بردار سرعت، $\text{m/s}$
$W_{ch}$	عرض میکروکانال، $\mu\text{m}$
$W_r$	عرض دنده مستطیلی، $\mu\text{m}$
$W_t$	عرض کل کانال، $\mu\text{m}$

### علائم یونانی

$\alpha$	ضریب پخش حرارتی، $\text{m}^2/\text{s}$
$\beta$	کسر جرمی مایع ذوب شده
$\phi$	کسر حجمی ذرات نانو کپسوله های تغییر فاز دهنده
$\phi_m$	کسر جرمی ذرات نانو کپسوله های تغییر فاز دهنده
$\rho_{eff}$	چگالی مؤثر سیال حاوی ذرات تغییر فاز دهنده، $\text{kg/m}^3$
$\mu_{eff}$	لزجت دینامیکی مؤثر سیال حاوی ذرات تغییر فاز دهنده، $\text{kg/m.s}$
$=$	تانسور تنش، $\text{Pa}$
$\tau$	
زیر نویس ها	
$eff$	مؤثر

### منابع

- [1] D.B. Tuckerman, R.F.W. Pease, III B-8 implications of high performance heat sinking for electron devices, IEEE Transactions on Electron Devices, 28(10) (1981) 1230-1231.
- [2] Z. He, Y. Yan, Z. Zhang, Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review, Energy, 216 (2021) 119223.
- [3] G. Xia, Y. Zhai, Z. Cui, Numerical investigation of thermal enhancement in a micro heat sink with fan-shaped reentrant cavities and internal ribs, Applied Thermal Engineering, 58(1) (2013) 52-60.
- [4] Y.L. Zhai, G.D. Xia, X.F. Liu, Y.F. Li, Heat transfer in the microchannels with fan-shaped reentrant cavities and different ribs based on field synergy principle and entropy generation analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer, 68 (2014) 224-233.
- [5] Y.L. Zhai, G.D. Xia, X.F. Liu, Y.F. Li, Exergy analysis and performance evaluation of flow and heat transfer in different micro heat sinks with complex structure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 84 (2015) 293-303.
- [6] I.A. Ghani, N. Kamaruzaman, N.A.C. Sidik, Heat transfer augmentation in a microchannel heat sink with sinusoidal cavities and rectangular ribs, International Journal of Heat and Mass Transfer, 108 (2017) 1969-1981.
- [7] P. Sikdar, A. Datta, N. Biswas, D. Sanyal, Identifying improved microchannel configuration with triangular cavities and different rib structures through evaluation of thermal performance and entropy generation number,

- change material slurry as coolant, *Applied Thermal Engineering*, 178 (2020) 115514.
- [18] H. Dai, W. Chen, Numerical investigation of heat transfer in the double-layered minichannel with microencapsulated phase change suspension, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 119 (2020) 104918.
- [19] H. Dai, W. Chen, Q. Cheng, Y. Liu, X. Dong, Analysis of thermo-hydraulic characteristics in the porous-wall microchannel with microencapsulated phase change slurry, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 165 (2021) 120634.
- [20] J. Rostami, Convective heat transfer by micro-encapsulated PCM in a mini-duct, *International Journal of Thermal Sciences*, 161 (2021) 106737.
- [21] C. Ho, Y.-C. Liu, M. Ghalambaz, W.-M. Yan, Forced convection heat transfer of Nano-Encapsulated Phase Change Material (NEPCM) suspension in a mini-channel heatsink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 155 (2020) 119858.
- [22] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & sons, 2002.
- [23] D.G. Thomas, Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles, *Journal of Colloid Science*, 20(3) (1965) 267-277.
- [24] Y. Zhang, X. Hu, X. Wang, Theoretical analysis of convective heat transfer enhancement of microencapsulated phase change material slurries, *Heat and Mass Transfer*, 40(1) (2003) 59-66.
- [25] H.R. Seyf, Z. Zhou, H.B. Ma, Y. Zhang, Three dimensional numerical study of heat-transfer enhancement by nano-encapsulated phase change material slurry in microtube heat sinks with tangential impingement, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56(1) (2013) 561-573.
- [26] M. Goel, S.K. Roy, S. Sengupta, Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions, *International journal of heat and mass transfer*, 37(4) (1994) 593-604.
- Physics of Fluids*, 32(3) (2020) 033601.
- [8] R. Chein, G. Huang, Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 25(17) (2005) 3104-3114.
- [9] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, 23(3) (2003) 251-283.
- [10] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2) (2010) 615-628.
- [11] M.N.A. Hawlader, M.S. Uddin, M.M. Khin, Microencapsulated PCM thermal-energy storage system, *Applied Energy*, 74(1) (2003) 195-202.
- [12] C. Liu, Z. Rao, J. Zhao, Y. Huo, Y. Li, Review on nanoencapsulated phase change materials: Preparation, characterization and heat transfer enhancement, *Nano Energy*, 13 (2015) 814-826.
- [13] K. Cho, M. Choi, Experimental study on the application of paraffin slurry to high density electronic package cooling, *Heat and Mass Transfer*, 36(1) (2000) 29-36.
- [14] R. Sabbah, M.M. Farid, S. Al-Hallaj, Micro-channel heat sink with slurry of water with micro-encapsulated phase change material: 3D-numerical study, *Applied Thermal Engineering*, 29(2) (2009) 445-454.
- [15] S. Sabbaghi, S. Mehravar, Effect of Using Nano Encapsulated Phase Change Material on Thermal Performance of Micro Heat Sink, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11(1) (2015) 33-38.
- [16] B. Rajabifar, Enhancement of the performance of a double layered microchannel heatsink using PCM slurry and nanofluid coolants, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88 (2015) 627-635.
- [17] M. Mohib Ur Rehman, T.A. Cheema, M. Khan, A. Abbas, H. Ali, C.W. Park, Parametric evaluation of a hydrofoil-shaped sidewall rib-employed microchannel heat sink with and without nano-encapsulated phase

of nano-encapsulated phase change material slurry in microchannels, Journal of heat transfer, 131(6) (2009).

[27] S. Kuravi, K.M. Kota, J. Du, L.C. Chow, Numerical investigation of flow and heat transfer performance

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Nemati-Moghadam, A. Ahmadpour , M. R. Hajmohammadi, Numerical Simulation of Convective Heat Transfer of Nano-Encapsulated Phase Change Material Slurries in Micro-Channels with Sinusoidal Cavities and Rectangular Ribs, Amirkabir J. Mech Eng., 54(1) (2022) 169-188.

DOI: [10.22060/mej.2021.19791.7113](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19791.7113)



