دانشگاه مازندران

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه دوره دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

موضوع:

شبیه سازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها در میکروکانال

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر رنجبر

استاد مشاور:

زنده یاد دکتر سید فرید حسینی‌زاده

نام دانشجو:

عباس رامیار

تیر ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

سپاسگزاری:

بر خود لازم می دانم از زحمات بی شائبه استاد ارجمندم

آقای دکتر علی اکبر رنجبر تشکر کنم. همچنین یاد و خاطره

مرحوم دکتر سید فرید حسینی زاده را که راهنمایی های او

همواره راه گشای من بوده است را زنده می دارم.

به یاد دکتر فرید...

زمانی‌که برای اولین بار او را در دانشگاه دیدم و از او خواستم تا مشاوره پایان‌نامه مرا بعهده بگیرد، فکر نمی‌کردم که بعد از چند هفته ما به دوستان خیلی صمیمی تبدیل شویم. البته این جزئی از شخصیت او بود که خیلی زود با دیگران انس می‌گرفت.

در زمینه کسب علم، او دنیایی از انرژی مثبت بود. امکان نداشت تا به اتاقش بروم و سرشار از انرژی برای ادامه کار بازنگردم. من در این مدت کوتاه حضور دکتر فرید در دانشگاه بابل، زمان زیادی را با او گذراندم و چیزهای زیادی از او یاد گرفتم. اخلاق او، اعتماد به نفسش، جدیت در کارش همه و همه سرمشقی برای هر کسی بود که او را می‌شناخت. اما افسوس که بیش از این از او بهره نبردم.

چه زود بود رفتنش بعد از تنها چند سال آشنایی.

چه زود بود رفتن، برای او که تازه می‌خواست حاصل سال‌ها تلاش و زحمتش در عرصه علم را برداشت کند.

چه سخت است فراموش کردن قهقهه‌های شادمانه‌اش و شوخی‌های دوستانه‌اش.

چه سخت است باور این‌که دیگر نمی‌توان صدایش را شنید.

یادش را گرامی می‌دارم و برای روحش از خدای منان طلب مغفرت و آرامش می‌کنم.

تقدیم به:

همسرم

خانم دکتر حاجی نوری

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌های مختلف در رژیم جریان آرام درون میکروکانال است. ترکیب‌های مختلف نانوسیال از جمله نانوسیال آب- اکسید آلومینیم، آب-اکسید مس و مخلوط اتیلن گلیکول/آب-اکسیدآلومینیم مورد استفاده قرار گرفتند. از مدل تک‌فازی برای حل معادلات استفاده شده است اما در کنار این مدل مدل‌های پراکندگی و پخش نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج مدل‌ها مقایسه شده است. برای حل معادلات با سه مدل فوق، یک کد عددی سه بعدی به زبان فرترن نوشته شده است. برای گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. برای تولید شبکه، از آرایش شبکه هم‌جا استفاده شده و معادلات کوپل فشار و سرعت نیز با استفاده از الگوریتم سیمپل تغییر یافته حل شده‌اند. صحت نتایج از لحاظ هیدرودینامیکی و حرارتی با مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی و عددی موجود تأیید شده و در نهایت تأثیر برخی پارامترها که در جریان سیال در کانال‌هایی با ابعاد معمول اهمیت چندانی ندارند و در میکروکانال‌ها حائز اهمیت می‌شوند مورد مطالعه قرار گرفته‌است. از جمله این پارامترها می‌توان به هدایت حرارتی توأمان، اتلاف لزجی و تغییر خواص با دما اشاره کرد. باوجود سادگی مدل تک فاز نسبت به دیگر مدل‌ها، مقایسه نتایج این مدل با نتایج تجربی نشان می‌دهد که از کارآیی لازم جهت مدل‌سازی نانوسیال در میکروکانال برخوردار است. همچنین از لحاظ زمان مورد نیاز برای همگرایی نیز مدل پخش به زمان بیشتری نسبت به مدل تک فاز نیاز دارد. برای اطمینان از مدل‌های خواص نانوسیال، مجموعه‌ای از مدل‌های خواص برای لزجت و ضریب هدایت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بعلاوه با توجه به این‌که برخی از مقالات به وجود لغزش در دیواره میکروکانال در جریان آب اشاره کرده‌اند، اثر جمله لغزش در کارآیی نانوسیال بررسی شده‌است.

کلمات کلیدی: نانوسیال، میکروکانال، انتقال حرارت جابجایی، شبکه همجا.

فهرست مطالب

فصل اول: معرفی ۱

مقدمه ۲

۱-۱ روش‌های بهبود انتقال حرارت ۲

۱-۱-۱ روش‌های فعال ۲

۱-۱-۲ روش‌های غیرفعال ۴

۱-۲ نانوسیال در میکروکانال ۵

۱-۳ روند عملکرد در پایان‌نامه ۶

فصل دوم: نانوسیال و تعیین خواص آن ۷

مقدمه ۸

۲-۱ روند رو به رشد تحقیقات در زمینه نانوسیال ۹

۲-۲ تولید نانوسیال ۱۱

۲-۳ کاربردهای نانوسیال ۱۲

۲-۳-۱ صنعت حمل و نقل ۱۲

۲-۳-۲ خنک کاری صنعتی ۱۵

۲-۳-۳ رآکتورهای اتمی ۱۶

۲-۳-۴ استخراج انرژی زمین گرمایی و دیگر منابع انرژی ۱۶

۲-۳-۵ خنک‌کاری قطعات الکترونیکی ۱۷

۲-۳-۶ زمینه‌های نظامی ۱۸

۲-۳-۷ کاربردهای فضایی ۱۸

۲-۳-۸ پزشکی ۱۸

۲-۴ پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب هدایت حرارتی ۲۰

۲-۴-۱ کسر حجمی ۲۰

۲-۴-۲ جنس نانوذرات ۲۱

۲-۴-۳ نوع سیال ۲۲
۲-۴-۴ اندازه نانوذرات ۲۳
۲-۴-۵ شکل نانوذرات ۲۳
۲-۴-۶ دما ۲۴
۲-۴-۷ مقدار PH ۲۵
۲-۴-۸ حرکت براونی ۲۶
۲-۴-۹ خوشه‌ای شدن ۲۷
۲-۴-۱۰ لایه‌ای شدن در اطراف نانوذره ۲۸
۲-۵ دیگر مکانیزم‌های مؤثر بر انتقال حرارت ۲۹
۲-۵-۱ ترموفورسیس ۲۹
۲-۵-۲ دیفیوژنوفرسیس ۲۹
۲-۶ تعیین خواص نانوسیال ۲۹
۲-۶-۱ دانسیته ۳۰
۲-۶-۲ ظرفیت گرمایی ویژه ۳۰
۲-۶-۳ ضریب انبساط حرارتی ۳۱
۲-۶-۴ ضریب هدایت حرارتی ۳۱
۲-۶-۵ لزجت دینامیکی ۴۳

فصل سوم: میکروکانال ۴۹

مقدمه ۵۰
۳-۱ دلایل گرایش به ابعاد میکرو ۵۰
۳-۲ دسته‌بندی کانال‌ها از لحاظ ابعاد ۵۲
۳-۳ اثرات ابعادی در میکروکانال ۵۳
۳-۳-۱ اثر ورودی ۵۳
۳-۳-۲ خواص وابسته به دما ۵۵
۳-۳-۳ اثر رقیق‌شدگی ۵۵

۳-۳-۴ اثر زبری سطح ۵۸
۳-۳-۵ انتقال حرارت محوری ۶۰
۳-۳-۶ اتلاف لزجی ۶۲

فصل چهارم: بررسی کارهای انجام شده ۶۶

مقدمه ۶۷
۴-۱ جریان در میکروکانال ۶۷
۴-۲ نانوسیال ۸۴
۴-۳ نانوسیال در میکروکانال ۹۲
۴-۴ جمع‌بندی ۹۷

فصل پنجم: معادلات حاکم ۹۹

مقدمه ۱۰۰
۵-۱ معادلات حاکم ۱۰۰
۵-۲ مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال ۱۰۱
۵-۲-۱ مدل تک فازی ۱۰۲
۵-۲-۲ مدل پراکندگی ۱۰۳
۵-۲-۳ مدل پخش ۱۰۵
۵-۳ آنالیز معادلات حاکم ۱۱۰
۵-۳-۱ بررسی احتمال اثر جمله شناوری ۱۱۳
۵-۴ تعریف مسئله ۱۱۵
۵-۵ گسسته سازی معادلات ۱۲۰
۵-۶ حل معادله فشار ۱۲۳
۵-۷ الگوریتم حل ۱۲۲

فصل ششم: نتایج ۱۲۹

مقدمه ۱۳۰

۶-۱ هندسه دوبعدی ۱۳۰
۶-۱-۱ درستی آزمایی کد ۱۳۱
۶-۱-۲ حل مستقل از شبکه ۱۳۴
۶-۱-۳ نتایج ۱۳۴
۶-۲ کد سه بعدی ۱۶۲
۶-۲-۱ حل مستقل از شبکه ۱۶۲
۶-۲-۲ درستی‌آزمایی کد ۱۶۲
۶-۲-۳ نتایج ۱۶۶
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۹۰
مراجع ۱۹۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **شماره صفحه**

شکل ۲-۱ تعداد مقالات یافت شده با جستجوی کلمات "Nanofluids" یا "Nanofluid" در Engineering Village در سال ۲۰۰۸ ۹

شکل ۲-۲ تصاویر SEM از نانوسیال $\alpha - Al_2O_3$ (سمت چپ) و نیکل (سمت راست) [7] ۱۱

شکل ۲-۳ اثر انباشتگی بر بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال [47]. ۲۷

شکل ۲-۴ وجود یک مقدار بهینه برای انباشتگی نانوذرات [7]. ۲۸

شکل ۳-۱ شکل ناحیه ورودی برای سیالی با Pr>1 [91] ۵۴

شکل ۳-۲ رژیم‌های مختلف جریان از دیدگاه عدد نادسن [94] ۵۷

شکل ۳-۳ نسبت ارتفاع بحرانی نانوسیال آب- اکسید آلومینیم در اعداد رینولدز مختلف [108] ۶۲

شکل ۳-۴ مقایسه معیار مورینی [107] و ژو و همکاران [109] برای در نظر گرفتن جمله اتلاف لزجی [110] ۶۴

شکل ۴-۱ قاعده مور و تبعیت اینتل از آن [112] ۶۸

شکل ۴-۲ شماتیکی از یک سینک گرمایی [113] ۶۹

شکل ۴-۳ شکل مقایسه نتایج تجربی [120] و نتایج تئوری تغییر یافته (معادله (۳-۱)) ۷۳

شکل ۴-۴ ناحیه تأثیر اثرات ابعادی مختلف برای سیال الف) آب ب) پروپانول در میکروکانال [92] ۸۱

شکل ۴-۵ شماتیک در نظر گرفته شده توسط جنگ و چوی [177] برای حل معادلات انتقال حرارت در میکروکانال ۹۳

شکل ۴-۶ هندسه‌ی در نظر گرفته شده توسط کو و کلینستروئر [178] برای حل معادلات انتقال حرارت در میکروکانال ۹۴

شکل ۵-۱ حجم کنترل نانوسیال برای معادله‌ی پیوستگی [199] ۱۰۸

شکل ۵-۲ حجم کنترل نانوسیال برای معادله‌ی بقاء انرژی [199]. ۱۱۰

شکل ۵-۳ یک میکروکانال سینک گرمایی ۱۱۵

شکل ۵-۴ مقطع یک میکروکانال از سینک گرمایی. ۱۱۶

شکل ۵-۵ هندسه کانال سه بعدی ۱۱۷

شکل ۵-۶ المان سه‌بعدی برای گسسته‌سازی معادلات ۱۲۱

شکل ۵-۷ مقایسه شبکه الف) همجا و ب) غیرهمجا ۱۲۳

شکل ۵-۸ توزیع فشار غیر یکنواخت در یک شبکه همجا ۱۲۴

شکل ۵-۹ یک المان در شبکه همجا ۱۲۴

شکل ۵-۱۰ الگوریتم حل معادلات حاکم به روش تک‌فازی ۱۲۷

شکل ۵-۱۱ الگوریتم حل معادلات به روش پخش ۱۲۸

شکل ۶-۱ هندسه کانال دوبعدی با یک ناحیه جامد و شار ثابت گرمایی از پایین ۱۳۰

شکل ۵-۸ هندسه کانال ساده دوبعدی با شار ثابت گرمایی از بالا و پایین ۱۳۱

شکل ۶-۳ درستی آزمایی حرارتی کد دوبعدی ۱۳۲

شکل ۶-۴ درستی آزمایی هیدرودینامیکی کد دوبعدی ۱۳۳

شکل ۶-۵ حل مستقل از شبکه ۱۳۴

شکل ۶-۶ کانتورهای دما برای آب خالص در Re_f=۴۰۰ ۱۳۵

شکل ۶-۷ کانتورهای دما برای نانوسیال آب-اکسیدآلومینیم با φ = ۰/۰۲۵ در Re_f =۴۰۰ ۱۳۵

شکل ۶-۸ تغییرات عدد ناسلت در دیواره پایینی ناحیه سیال در کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال آب- اکسید آلومینیم ۱۳۶

شکل ۶-۹ تغییرات دما در دیواره پایینی ناحیه سیال در کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال آب- اکسید آلومینیم ۱۳۷

شکل ۶-۱۰ توزیع تنش برشی در دیواره پایینی ناحیه سیال در کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال آب- اکسید آلومینیم ۱۳۸

شکل ۶-۱۱ توزیع عدد ناسلت در دیواره پایین ناحیه سیال در کسر حجمی φ = ۰/۰۲۵ نانوسیال آب- اکسید الومینیم به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز ۱۳۹

شکل ۶-۱۲ توزیع دمای دیواره پایین ناحیه سیال در کسر حجمی φ = ۰/۰۲۵ نانوسیال آب- اکسید آلومینیم به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز ۱۳۹

شکل ۶-۱۳ تأثیر قطر نانوذرات بر توزیع عدد ناسلت در مجاورت دیواره سیال برای نانوذرات اکسید آلومینیم ۱۴۰

شکل ۶-۱۴ نسبت ارتفاع بحرانی نانوسیال آب- اکسید آلومینیم در اعداد رینولدز مختلف ۱۴۱

شکل ۶-۱۵ توزیع دمای دیواره پایین ناحیه سیال در کسر حجمی ۱/۵ درصد و Re_f=۱۰۰ ۱۴۲

شکل ۶-۱۶ تأثیر نسبت ارتفاع بر توزیع عدد ناسلت برای حالت Ref= ۵۰ ۱۴۳

شکل ۶-۱۷ تأثیر نسبت ارتفاع بر توزیع عدد ناسلت برای حالت Re_f= ۵۰ ۱۴۴

شکل ۶-۱۸ مقایسه توزیع عدد ناسلت در دیواره پایین برای نانوسیال آب-اکسیدآلومینیم و آب-اکسیدمس ۱۴۴

شکل ۶-۱۹ مقایسه توزیع دمای دیواره پایین برای نانوسیال آب-اکسیدآلومینیم و آب-اکسیدمس ۱۴۵

شکل ۶-۲۰ توزیع تنش برشی در دیواره پایین برای نانوسیال آب-اکسیدآلومینیم و آب-اکسیدمس ۱۴۶

شکل ۶-۲۱ توزیع عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف برای نانوسیال آب-اکسیدمس ۱۴۶

شکل ۶-۲۲ هندسه کانال دوبعدی با دو ناحیه جامد و شار ثابت گرمایی از پایین ۱۴۷

شکل ۶-۲۳ کانتورهای دما برای آب خالص در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و ارتفاع کانال ۵۰μm ۱۴۹

شکل ۶-۲۴ کانتورهای دما برای نانوسیال آب-اکسیدآلومینیم در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و ارتفاع کانال ۵۰μm ۱۴۹

شکل ۶-۲۵ بررسی اثر جمله اتلاف لزجی بر توزیع عدد ناسلت با تغییر ارتفاع کانال ۱۵۱

شکل ۶-۲۶ بررسی اثر ارتفاع کانال بر افزایش دمای دیواره ناشی از اتلاف لزجی ۱۵۲

شکل ۶-۲۷ بررسی اثر ارتفاع کانال بر افزایش دمای توده سیال ناشی از اتلاف لزجی ۱۵۳

شکل ۶-۲۸ میزان افزایش دما در میکروکانال بر اثر جمله اتلاف لزجی ۱۵۴

شکل ۶-۲۹ اثر جمله اتلاف لزجی بر کانتورهای دما در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و کسر حجمی ۴٪ ۱۵۵

شکل ۶-۳۰ اثر نانوذرات بر کانتورهای دما در عدد رینولدز ۱۰۰۰ ۱۵۵

شکل ۶-۳۱ اثر پارامترهای مختلف بر توزیع مقاومت حرارتی در طورل کانال ۱۵۶

شکل ۶-۳۲ اثر وابستگی به دما و اتلاف لزجی بر عدد ناسلت متوسط ۱۵۷

شکل ۶-۳۳ کانتورهای تولید انتروپی در میکروکانالی به ارتفاع ۱۰۰μm برای آب خالص و نانوسیال با کسر حجمی ۳٪ در عدد رینولدز ۱۰۰ ۱۵۹

شکل ۶-۳۴ کانتورهای تولید انتروپی در میکروکانالی به ارتفاع ۵۰μm برای آب خالص و نانوسیال با کسر حجمی ۳٪ در عدد رینولدز ۱۰۰ ۱۵۹

شکل ۶-۳۵ تغییرات تولید انتروپی در میکروکانالی به ارتفاع ۵۰μm با عدد رینولدز برای آب خالص و نانوسیال با کسر حجمی ۳٪ ۱۶۰

شکل ۶-۳۶ تغییرات عدد بیژن با عدد رینولدز برای دو ارتفاع کانال ۵۰μm و ۱۰۰μmو سیال آب خالص و نانوسیال با کسر حجمی ۳٪ ۱۶۱

شکل ۶-۳۷ درستی‌آزمایی هیدرودینامیکی کد با نتایج تجربی ۱۶۳

شکل ۶-۳۸ درستی‌آزمایی هیدرودینامیکی کد با نتایج تحلیلی شاه و لندن [206] ۱۶۳

شکل ۶-۳۹ درستی‌آزمایی گرمایی کد با نتایج تحلیلی شاه و لندن [206] ۱۶۴

شکل ۶-۴۰ هندسه و ابعاد میکروکانال برای درستی آزمایی کد از دیدگاه نانوسیال [206] ۱۶۵

شکل ۶-۴۱ ناحیه مورد بررسی از کانال برای درستی آزمایی کد از دیدگاه نانوسیال ۱۶۵

شکل ۶-۴۲ مقایسه نتایج بدست آمده از کد با نتایج تجربی [206] ۱۶۶

شکل ۶-۴۳ کانتورهای دما در ناحیه جامد و سیال ۱۶۷

شکل ۶-۴۴ کانتورهای دما برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیم با کسر حجمی ۰/۰۲ و عدد رینولدز ۵۰ ۱۶۸

شکل ۶-۴۵ کانتورهای دما برای سیال آب خالص و نانوسیال آب- اکسید آلومینیم با کسر حجمی ۵٪ ۱۶۸

شکل ۶-۴۶ پروفیل سرعت در صفحه تقارن در نقاط مختلف محور x ۱۶۹

شکل ۶-۴۷ پروفیل سرعت در صفحه میانی ارتفاع کانال ($z=H_b+H_c/2$) در نقاط مختلف محور x ۱۷۰

شکل ۶-۴۸ پروفیل دما در صفحه تقارن در نقاط مختلف محور x ۱۷۰

شکل ۶-۴۹ پروفیل دما در صفحه میانی ارتفاع کانال ($z=H_b+H_c/2$) در نقاط مختلف محور x ۱۷۱

شکل ۶-۵۰ نسبت عدد ناسلت متوسط نانوسیال به مقدار متناظر آب خالص در عدد رینولدز ۵۰۰ ۱۷۲

شکل ۶-۵۱ نسبت افت فشار در میکرو کانال برای نانوسیال به مقدار متناظر برای آب خالص در عدد رینولدز ۵۰۰ ۱۷۳

شکل ۶-۵۲ عدد ناسلت دیواره پایینی میکروکانال در عدد رینولدز ۵۰۰ ۱۷۳

شکل ۶-۵۳ عدد ناسلت دیواره پایینی میکروکانال در عدد رینولدز ۵۰۰ ۱۷۴

شکل ۶-۵۴ اثر جمله اتلاف لزجی و وابستگی خواص به دما بر توزیع مقاومت حرارتی ۱۷۵

شکل ۶-۵۵ اثر جمله اتلاف لزجی و وابستگی خواص به دما بر توزیع مقاومت حرارتی برای نانوسیال با کسر حجمی ۳٪ ۱۷۶

شکل ۶-۵۶ اثر جمله اتلاف لزجی و وابستگی خواص به دما بر توزیع عدد ناسلت برای نانوسیال با کسر حجمی ۳٪ ۱۷۷

شکل ۶-۵۷ اثر جمله اتلاف لزجی و وابستگی خواص به دما بر توزیع افت فشار برای نانوسیال با کسر حجمی ۳٪ ۱۷۸

شکل ۶-۵۸ اثر جمله اتلاف لزجی در قطرهای هیدرولیکی مختلف ۱۷۹

شکل ۶-۵۹ اثر شار حرارتی بر توزیع دما در دیواره پایینی کانال سیال ۱۸۰

شکل ۶-۶۰ اثر افزودن نانوذرات بر توزیع عدد ناسلت متوسط در اعداد رینولدز مختلف ۱۸۱

شکل ۶-۶۱ اثر جنس نانوذرات بر توزیع عدد ناسلت متوسط ۱۸۲

شکل ۶-۶۲ اثر جنس نانوذرات بر توزیع عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال با سیال عامل مخلوط اتیلن گلیکول/آب ۱۸۲

شکل ۶-۶۳ مقایسه توزیع ناسلت برای مدل‌های مختلف خواص نانوسیال ۱۸۳

شکل ۶-۶۴ مقایسه عدد ناسلت برای چند مدل مختلف شبیه‌سازی نانوسیال ۱۸۴

شکل ۶-۶۵ مقایسه افت فشار برای چند مدل مختلف شبیه‌سازی نانوسیال ۱۸۵

شکل ۶-۶۶ مقایسه عدد ناسلت در شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی میکروکانال ۱۸۶

شکل ۶-۶۷ مقایسه دمای دیواره در شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی میکروکانال ۱۸۶

شکل ۶-۶۸ مقایسه افت فشار در شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی میکروکانال ۱۸۷

شکل ۶-۶۹ اثر لغزش بر پروفیل سرعت ۱۸۸

شکل ۶-۷۰ اثر لغزش بر توزیع عدد ناسلت ۱۸۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **شماره صفحه**

جدول ۲-۱ مقایسه اجمالی میکروذرات و نانوذرات [7] ۹

جدول ۲-۲ روند روبه‌رشد تحقیقات در زمینه نانوسیال با بررسی بانک اطلاعاتی SCOPUS ۱۰

جدول ۲-۳ خواص برخی سیال‌ها و نانوذرات ۳۰

جدول ۲-۴ جدول ضرایب ثابت برای مدل کو و کلینستروئر [46] ۳۶

جدول ۲-۵ ضریب ثابت β برای مدل ضریب هدایت حرارتی واجها و داس [63] ۳۷

جدول ۲-۶ ضرایب ثابت مدل ضریب هدایت حرارتی دوانگدونسوک و وونگویس [75] ۴۳

جدول ۲-۷ ضرایب ثابت در ناحیه دمایی مدل لزجت نامبورو و همکاران [84] ۴۵

جدول ۲-۸ ضرایب ثابت در دو ناحیه دمایی مدل لزجت نامبورو و همکاران [84] ۴۶

جدول ۲-۹ جدول ثابت‌های رابطه لزجت دینامیکی دوانگدونسوک و وونگویس [75] ۴۸

جدول ۳-۱ دسته‌بندی انواع کانال از لحاظ قطر هیدرولیکی ۵۲

جدول ۳-۲ رژیم‌های جریان با در نظر گرفتن رقیق شدگی سیال ۵۶

جدول ۵- ۱ ابعاد میکروکانال مورد بررسی ۱۱۶

جدول ۵- ۲ ضرایب معادله کلی انتقال ۱۲۰

جدول ۶-۱دست‌یابی به حل مستقل از شبکه ۱۶۲

جدول ۶-۲ ابعاد مختلف کانال بررسی شده و اختلاف دمای ناشی از اتلاف لزجی ۱۷۹

جدول ۶-۳ معادلات انتخاب شده خواص برای مقایسه ۱۸۳

لیست علائم و اختصارات

عدد بیژن	Be
عدد برینکمن	Br
ظرفیت گرمایی ویژه	c_p (J/kgK)
قطر	d (m)
ضریب نفوذ نانوذرات	D_0
قطر هیدرولیکی	Dh
ضریب نفوذ براونی	D_B
ضریب نفوذ ترموفورسیس	D_r
ارتفاع زبری	e
ضریب اصطکاک دارسی موضعی	f
اختلاف دما	ΔT (K)
ضریب هدایت حرارتی	k (W/mK)
عدد نادسن	Kn_p
جرم ملکولی	M
عدد آووگادرو	$N(\approx ۶/۰۲۳\times۱۰^{۲۳})$
عدد ناسلت	Nu
ضریب شکل نانوذره	n
شتاب گرانشی زمین	g (m/s^2)
عدد پرنتل	Pr
عدد پوازی	Po
مقاومت حرارتی (سطح مشترک بین نانوذره و سیال)	R_f

عدد رینولدز	Re
عدد ناسلت	Nu
دما	T (K)
دمای انجماد سیال پایه	T_{fr} (K)
فشار	P (pa)
شار حرارتی	Q (W/m^2)
سطح	S (m^2)
مولفه سرعت در راستای محور x	u
مولفه سرعت در راستای محور y	v
مولفه سرعت در راستای محور z	w
سرعت اصطکاکی	u^*
حجم	$\overline{V}$
اندازه بردار سرعت	V
مولفه طول افقی	x
شار جرمی	j
ضریب حساسیت لزجت	$s_{\mu 0}$
ضریب هدایت	s_{k0}
دمای توده سیال	T_b
عدد گراتز	Gz
ارتفاع کانال	H (m)
ضخامت لایه اطراف ذره	h
طول کانال	L (m)
طول ورودی هیدرودینامیکی	L_h (m)
طول ورودی دما	L_t (m)

انتروپی	s
ضخامت نانولایه	t

علائم یونانی

نسبت منظر	α
نسبت حجمی ذرات نانو به سیال	φ
اتلاف لزجی	ϕ
ثابت زمانی هدایت در نانوذره	$\tau_{P,T}$
ثابت زمانی هدایت در سیال	$\tau_{f,T}$
ضریب انبساط حجمی	$\beta\ (K^{-1})$
نسبت ضخامت لایه به قطر ذره	β'
ویسکوزیته دینامیکی مولکولی	$\mu\ (kg/ms)$
ویسکوزیته سینماتیکی	$\nu\ (m^2/s)$
چگالی	$\rho\ (kg/m^3)$
مقاومت حرارتی میکروکانال	θ_{th}
نسبت مساحت سطح کره‌ای با حجم معادل نانوذره به مساحت سطح ذره	ψ
فاصله آزاد میانگین ملکول‌های	λ
فاصله بین مراکز نانوذرات	δ
نسبت گرماهای ویژه	γ
تنش برشی	σ

زیرنویس‌ها

سیال	f
جامد	s
متوسط	avg
نانوسیال	nf
نانوذرات	p
دیواره	w
موثر	eff
خوشه نانوذرات	cl
لایه نانوسیال	la
محیط	∞
تولید	gen
تولید در اثر حرارت	gen,t
تولید در اثر اصطکاک	gen,f
متوسط	m
ماکزیمم	max
ورودی	in