



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

بررسی شاخصه‌های انتقال حرارت نانوسیالات در جریان آشفته داخلی

استاد راهنما:

دکتر علی کشاورز ولیان

نگارنده:

محمد سالمی مجرد

شهریور ۱۳۹۱

الرحمن الرحيم

تقدیم به مهربان فرشتگانی که:

نه می‌توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست‌های پینه بسته‌شان که
ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. کسانی که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن،
جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه‌های یکتا و زیبای زندگی‌ام، مدیون حضور سبز آنهاست.

تقدیم به خانواده عزیزم.



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

تأییدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان :

«بررسی شاخصه‌های انتقال حرارت نانوسیالات در جریان آشفته داخلی»

توسط محمد سالمی مجرد صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در

رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی مورد تایید قرار می‌دهد.

آقای دکتر علی کشاورز ولیان

۱-استاد راهنما:

آقای دکتر مسعود ضیاءبشرحق

۲-استاد ارزیاب:

آقای دکتر مهرزاد شمس

۳-استاد ارزیاب:

اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان نامه: بررسی شاخصه‌های انتقال حرارت نانوسیالات در جریان آشفته داخلی

استاد راهنما: آقای دکتر علی کشاورز ولیان

دانشجو: محمد سالمی مجرد

شماره دانشجویی: ۸۹۱۷۱۶۴

اینجانب محمد سالمی مجرد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه به طور کامل رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۱/۶/۳۰

حق نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع، مجاز نمی باشد.

تقدیر و تشکر

این پایان نامه حاصل تلاش بنده و همچنین کمک جمعی از اساتید و دانشجویان می باشد که بی شک هر یک نقش بسیار مهمی در به سرانجام رساندن این پایان نامه ایفا کرده اند. در ابتدا از جناب آقای دکتر علی کشاورزولیان به خاطر حمایت های بی دریغ علمی و معنوی ایشان کمال تشکر را دارم. در ادامه از جناب آقای دکتر مسعود ضیاءبشرحق که با کمک های خود مسیر انجام این پایان نامه برای بنده هموار کردند، سپاسگزاری می نمایم. شاگردی این اساتید عزیز را افتخاری برای خود می دانم. بی شک رهنمودهای ایشان، چراغ راه زندگیم خواهد بود.

همچنین از جناب آقای دکتر مجید قاسمی و سرکار خانم دکتر شهیدیان به خاطر در اختیار گذاشتن تجهیزات لازم برای آماده سازی و اندازه گیری خواص نانوسیالات تشکر می کنم. از دوستان عزیزم خانم ها و آقایان آذین شکوهی، محمدرضا روشی، مهدی رازنهان، محمد رضایی فیروزجایی، علی اکبر ابراهیمزاده، محمدرضا امینی، کیانوش عزیزی، محمد نادری، محسن فراتی نژاد، حسن حمیدی، آرش جمالی به خاطر همراهی در مراحل ساخت، اندازه گیری خواص نانوسیال و کمک های فکری و معنوی کمال تشکر و امتنان را دارم.

چکیده

در پژوهش پیش رو اثر افزودن نانوذرات جامد آلومینا به آب بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و نیز افت فشار در داخل یک لوله دایره‌ای به طور تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام این کار، ابتدا نانوسیال آب - آلومینا توسط یک دستگاه فراصوت با غلظت‌های حجمی مختلف از نانوذرات آلومینا تهیه شده است. سپس انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری این نانوسیال در داخل یک لوله مسی با شرط مرزی دمایی دیواره ثابت، در محدوده عدد رینولدز ۶۵۰ تا ۱۳۳۰۰ و در غلظت‌های ۰٪، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷٪ و ۱٪، به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌ها شامل اثر حضور نانوذرات، غلظت‌های مختلف آن‌ها و عدد رینولدز بوده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را به اندازه ۴٪ تا ۳۲٪ و افت فشار را بین ۸٪ تا ۲۵٪ نسبت به سیال پایه (آب) افزایش خواهد داد. پس از آن با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، روابط جدیدی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک نانوسیالات در رژیم جریان آرام و آشفته ارائه شد.

در مرحله بعد، هندسه آزمایش با روش‌های عددی مختلفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. جهت شبیه‌سازی عددی از نرم افزار فلونت استفاده شده است. جهت تحلیل حرارتی و جریانی نانوسیال از روش‌های تک فاز همگن، تک فاز پخشی، دو فاز مخلوط و دو فاز اویلر لاگرانژی استفاده شده است. در روش تک فاز پخشی یک مدل جدید برای پیش بینی هدایت حرارت پخشی نانوسیالات ارائه شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی نشان می‌دهند که هر چند روش‌های تک فاز پخشی و دو فاز اویلر لاگرانژی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند، اما روش تک فاز پخشی به دلیل هزینه محاسباتی کمتر مقرون به صرفه است. در نهایت بازده استفاده از نانوسیالات با غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که افزایش غلظت نانوسیالات به بیشتر از ۰/۵٪ تأثیر چشمگیری در بهبود کارایی خنک کن ندارد.

کلمات کلیدی: نانوسیال آب آلومینا، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط، افت فشار، هدایت حرارتی پخشی، مدل اویلر لاگرانژ، مدل مخلوط.

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| ۱ | فصل اول: مقدمه | ۱ |
| ۱-۱ | پیشگفتار | ۲ |
| ۲-۱ | اهمیت نانوسیالات | ۵ |
| ۳-۱ | تعریف مسئله | ۶ |
| ۴-۱ | اهداف پروژه پیش رو | ۷ |
| ۵-۱ | روش انجام کار | ۷ |
| ۲ | فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده | ۹ |
| ۱-۲ | مقدمه | ۱۰ |
| ۲-۲ | مطالعات تجربی انجام شده | ۱۰ |
| ۱-۲-۲ | روش‌های تهیه نانوسیالات | ۱۰ |
| ۲-۲-۲ | اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات | ۱۱ |
| ۳-۲-۲ | اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات | ۱۴ |
| ۴-۲-۲ | اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی نانوسیالات | ۱۶ |
| ۵-۲-۲ | انتقال حرارت جابه‌جایی | ۱۶ |
| ۶-۲-۲ | افت فشار | ۱۸ |
| ۳-۲ | مطالعات عددی و تئوری انجام شده | ۱۹ |
| ۱-۳-۲ | روابط چگالی نانوسیالات | ۱۹ |
| ۲-۳-۲ | روابط هدایت حرارتی نانوسیالات | ۱۹ |

| | | |
|----|--|--------|
| ۲۰ | روابط ویسکوزیته نانوسیالات | ۳-۳-۲ |
| ۲۱ | انتقال حرارت جابه‌جایی | ۴-۳-۲ |
| ۲۴ | فصل سوم: بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیالات به روش تجربی | ۳ |
| ۲۵ | مقدمه | ۱-۳ |
| ۲۵ | دستگاه آزمایش | ۲-۳ |
| ۲۶ | پمپ | ۱-۲-۳ |
| ۲۷ | شیر سه راهه | ۲-۲-۳ |
| ۲۷ | روتامتر | ۳-۲-۳ |
| ۲۸ | فشارسنج دیفرانسیلی | ۴-۲-۳ |
| ۲۹ | لوله فولادی | ۵-۲-۳ |
| ۲۹ | لوله مسی | ۶-۲-۳ |
| ۳۰ | محفظه اختلاط | ۷-۲-۳ |
| ۳۱ | ترموکوپل | ۸-۲-۳ |
| ۳۱ | سیستم داده بردار | ۹-۲-۳ |
| ۳۲ | خنک کن اولیه | ۱۰-۲-۳ |
| ۳۳ | مخزن و خنک کن ثانویه | ۱۱-۲-۳ |
| ۳۳ | نحوه انجام آزمایش و جمع آوری داده‌ها | ۳-۳ |
| ۳۴ | نحوه تولید نانوسیالات | ۴-۳ |
| ۳۶ | اندازه‌گیری و محاسبه خواص نانوسیالات | ۵-۳ |
| ۳۶ | چگالی | ۱-۵-۳ |

| | | |
|----|---|-------|
| ۳۶ | ظرفیت گرمایی | ۲-۵-۳ |
| ۳۶ | هدایت حرارتی | ۳-۵-۳ |
| ۳۶ | اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات | ۴-۵-۳ |
| ۳۷ | نحوه انجام محاسبات | ۶-۳ |
| ۳۷ | محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی | ۱-۶-۳ |
| ۳۹ | افت فشار | ۲-۶-۳ |
| ۳۹ | آنالیز خطا | ۷-۳ |
| ۳۹ | خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری | ۱-۷-۳ |
| ۴۰ | خطای محاسبه عدد رینولدز | ۲-۷-۳ |
| ۴۰ | خطای محاسبه ضریب انتقال حرارت | ۳-۷-۳ |
| ۴۱ | بررسی دقت دستگاه آزمایش | ۸-۳ |
| ۴۲ | دقت نتایج ضریب انتقال حرارت | ۱-۸-۳ |
| ۴۳ | دقت نتایج افت فشار | ۲-۸-۳ |
| ۴۶ | فصل چهارم: شبیه‌سازی جریان نانوسیال با استفاده از روش‌های عددی تک‌فاز و دو‌فازی | ۴ |
| ۴۷ | مقدمه | ۱-۴ |
| ۴۷ | روش تک‌فازی همگن | ۲-۴ |
| ۴۹ | روش تک‌فاز پخشی | ۳-۴ |
| ۵۲ | روش مخلوط دو‌فاز | ۴-۴ |
| ۵۵ | روش اویلر لاگرانژ | ۵-۴ |
| ۶۰ | مشخصات شبیه‌سازی عددی | ۶-۴ |

- ۱-۶-۴ مشخصات هندسه مدل شده ۶۰
- ۲-۶-۴ مشخصات شبکه‌ی حل ۶۰
- ۳-۶-۴ بررسی استقلال از شبکه و دقت حل ۶۱
- ۴-۶-۴ تنظیمات حل گر و شرایط مرزی ۶۲
- ۵ بررسی نتایج، نتیجه گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ۶۳
- ۱-۵ مقدمه ۶۴
- ۲-۵ نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته ۶۴
- ۳-۵ توزیع دما در سطح مقطع‌هایی خاص از لوله ۶۵
- ۴-۵ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین ۶۶
- ۵-۵ عدد ناسلت میانگین ۷۲
- ۶-۵ افت فشار ۷۸
- ۷-۵ ارزیابی عملکرد استفاده از نانوسیالات ۸۴
- ۸-۵ پیشنهاد برای تحقیقات آینده ۸۶
- ۶ مراجع ۸۷

فهرست شکل‌ها و نمودارها

- شکل ۱-۳: شماتیک دستگاه آزمایش ۲۵
- شکل ۲-۳: تصویر دستگاه آزمایش ۲۶
- شکل ۳-۳: پمپ‌های مورد استفاده ۲۶
- شکل ۴-۳: شیر سه راهه ۲۷
- شکل ۵-۳: روتامترهای جریان آرام و آشفته ۲۸
- شکل ۶-۳: فشارسنج دیفرانسیلی ۲۹
- شکل ۷-۳: پره‌های محفظه اختلاط ۳۰
- شکل ۸-۳: نحوه اختلاط جریان ۳۰
- شکل ۹-۳: ترموکوپل نوع K ۳۱
- شکل ۱۰-۳: سیستم داده بردار ADAM 5000/TCP ۳۲
- شکل ۱۱-۳: خنک کن اولیه ۳۲
- شکل ۱۲-۳: کویل مسی ۳۳
- شکل ۱۳-۳: حمام اولتراسونیک ۳۵
- شکل ۱۴-۳: هم‌زن مغناطیسی ۳۵
- شکل ۱۵-۳: نمونه نانوسیال تولید شده ۳۶
- شکل ۱۶-۳: دستگاه اندازه‌گیری ویسکوزیته ۳۷
- شکل ۱۷-۳: حجم کنترل دیفرانسیلی بر روی سیال درون لوله ۳۸
- شکل ۱۸-۳: مقایسه نتایج تئوری هازن با نتایج تجربی برای جریان آرام آب مقطر ۴۲
- شکل ۱۹-۳: مقایسه نتایج تئوری گنیلینسکی با نتایج تجربی برای جریان آشفته آب مقطر ۴۳
- شکل ۲۰-۳: مقایسه نتایج تئوری داریسی ویسباخ با نتایج تجربی برای جریان آرام آب مقطر ۴۴
- شکل ۲۱-۳: مقایسه نتایج تئوری داریسی ویسباخ با نتایج تجربی برای جریان آشفته آب مقطر ۴۴
- شکل ۱-۵: مقایسه نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات با غلظت‌های مختلف با رابطه (۱۱-۲) ۶۴

شکل ۵-۲: مقایسه توزیع دما در حل عددی با دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها در آزمایش‌های

تجربی ($Re=1200$) ۶۵

شکل ۵-۳: مقایسه توزیع دما در حل عددی با دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها در آزمایش‌های

تجربی ($Re=10000$) ۶۶

شکل ۵-۴: نمودار ضریب انتقال حرارت میانگین برای غلظت‌های مختلف نانوسیالات بر حسب عدد

رینولدز در جریان آرام ۶۶

شکل ۵-۵: نمودار ضریب انتقال حرارت میانگین برای غلظت‌های مختلف نانوسیالات بر حسب عدد

رینولدز در جریان آشفته ۶۷

شکل ۵-۶: نمودار مقایسه نسبت ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۲۵٪

در جریان آرام ۶۸

شکل ۵-۷: نمودار مقایسه نسبت ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۵٪

در جریان آرام ۶۸

شکل ۵-۸: نمودار مقایسه نسبت ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۷٪

در جریان آرام ۶۹

شکل ۵-۹: نمودار مقایسه نسبت ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۱٪

در جریان آرام ۶۹

شکل ۵-۱۰: نمودار مقایسه نسبت ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت

۰/۲۵٪ در جریان آشفته ۷۰

شکل ۵-۱۱: نمودار مقایسه نسبت ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۵٪

در جریان آشفته ۷۰

شکل ۵-۱۲: نمودار مقایسه نسبت ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۷٪

در جریان آشفته ۷۱

شکل ۵-۱۳: نمودار عدد ناسلت میانگین برای غلظت‌های مختلف نانوسیالات بر حسب عدد رینولدز در

جریان آرام ۷۲

- شکل ۵-۱۴: نمودار عدد ناسلت میانگین برای غلظت‌های مختلف نانوسیالات بر حسب عدد رینولدز در جریان آشفته ۷۲
- شکل ۵-۱۵: نمودار مقایسه نسبت عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۲۵٪ در جریان آرام ۷۳
- شکل ۵-۱۶: نمودار مقایسه نسبت عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۵٪ در جریان آرام ۷۴
- شکل ۵-۱۷: نمودار مقایسه نسبت عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۷٪ در جریان آرام ۷۴
- شکل ۵-۱۸: نمودار مقایسه نسبت عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۱٪ در جریان آرام ۷۵
- شکل ۵-۱۹: نمودار مقایسه نسبت عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۲۵٪ در جریان آشفته ۷۵
- شکل ۵-۲۰: نمودار مقایسه نسبت عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۵٪ در جریان آشفته ۷۶
- شکل ۵-۲۱: نمودار مقایسه نسبت عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای غلظت ۰/۷٪ در جریان آشفته ۷۶
- شکل ۵-۲۲: نمودار مقایسه عدد ناسلت متوسط پیش بینی شده توسط رابطه ارایه شده با نتایج آزمایشگاهی در جریان آرام ۷۷
- شکل ۵-۲۳: : نمودار مقایسه عدد ناسلت متوسط پیش بینی شده توسط رابطه ارایه شده با نتایج آزمایشگاهی در جریان آشفته ۷۸
- شکل ۵-۲۴: نمودار افت فشار اندازه‌گیری شده بر حسب عدد رینولدز در جریان آرام ۷۹
- شکل ۵-۲۵: نمودار افت فشار اندازه‌گیری شده بر حسب عدد رینولدز در جریان آشفته ۷۹
- شکل ۵-۲۶: نمودار افت فشار اندازه‌گیری شده بر حسب عدد رینولدز در جریان آرام ۸۰
- شکل ۵-۲۷: نمودار افت فشار اندازه‌گیری شده بر حسب عدد رینولدز در جریان آشفته ۸۱

- شکل ۵-۲۸: نمودار مقایسه ضریب اصطکاک پیش بینی شده توسط رابطه ارایه شده با نتایج آزمایشگاهی در جریان آرام..... ۸۳
- شکل ۵-۲۹: نمودار مقایسه ضریب اصطکاک پیش بینی شده توسط رابطه ارایه شده با نتایج آزمایشگاهی در جریان آشفته..... ۸۳
- شکل ۵-۳۰: نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط نانوسیال با توان پمپاژ در جریان آرام..... ۸۵
- شکل ۵-۳۱: نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط نانوسیال با توان پمپاژ در جریان آشفته..... ۸۵

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱: مقادیر ضریب هدایت حرارتی مواد مختلف [۲] ۳
- جدول ۲-۱: مقایسه خواص سوسپانسیون های حاوی میکرو ذرات و نانوذرات ۴
- جدول ۱-۳: خواص نانوذره آلومینا تولیدی شرکت دگوسا ۳۴
- جدول ۲-۳: میزان خطای دستگاه‌های اندازه گیری ۴۰
- جدول ۱-۴: مقایسه مقدار عدد ناسلت متوسط برای جریان آرام برای شبکه‌های مختلف (Re=1200) ... ۶۱
- جدول ۲-۴: مقایسه مقدار عدد ناسلت متوسط برای جریان آشفته برای شبکه‌های مختلف (Re=10000) ۶۱
- جدول ۱-۵: بیشترین نسبت افت فشار در غلظت‌های مختلف ۸۰
- جدول ۲-۵: مقایسه نتایج روش های مختلف عددی و آزمایشگاهی برای افت فشار در عدد رینولدز ۱۷۰۰ ۸۲
- ۱۰۰۰۰
- جدول ۳-۵: مقایسه نتایج روش های مختلف عددی و آزمایشگاهی برای افت فشار در عدد رینولدز ۸۲

فهرست نمادها و علائم اختصاری

علائم:

| | | | |
|-------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|
| B_c | ثابت بولتزمن | a | شتاب |
| C | ضریب ثابت پخششی | c_p | گرمای ویژه در فشار ثابت |
| C_c | ضریب تصحیح کانینگهام | c_v | گرمای ویژه در حجم ثابت |
| C_m | ضریب ثابت | D | قطر لوله |
| C_s | ضریب ثابت | d | قطر نانوذرات |
| C_t | ضریب ثابت | \dot{E} | نرخ انتقال انرژی گرمایی |
| d_{ij} | تانسور تغییر شکل | f | ضریب اصطکاک |
| F | نیروی کل | f_{drag} | تابع درگ |
| F_B | نیروی براونی | g | شتاب گرانش |
| F_D | نیروی درگ | h | آنتالپی محسوس |
| F_G | نیروی گرانش | \bar{h} | ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین |
| F_L | نیروی لیفت سافمن | k | ضریب هدایت حرارتی |
| F_p | نیروی اختلاف فشار | L | طول لوله |
| F_T | نیروی ترموفرتیک | \dot{m} | دبی جرمی |
| F_v | نیروی جرم مجازی | \overline{Nu} | عدد ناسلت میانگین |
| H | آنتالپی | Pr | عدد پرائتل |
| Kn | عدد نادسون | r | شعاع لوله |
| K_s | ضریب ثابت | Re | عدد رینولدز |
| l | فضای آزاد میانگین | T | دما |
| \dot{Q} | نرخ حرارت منتقل شده | u_m | سرعت میانگین |
| Sp | ترم چشمه | x | فاصله محوری |
| زیر ونداها: | | | |
| i | ورودی | bf | سیال پایه |
| k | شماره فاز | c | سطح مقطع |
| lam | جریان آرام | exp | تجربی |
| m | مخلوط | f | فاز اول - سیال |
| nf | نانوسیال | fd | کاملاً توسعه یافته |

| | | | |
|------------|--------------------|-----------|---------------------|
| Num | عددی | h | هیدرودینامیکی |
| s | سطح | o | خروجی |
| t | حرارتی | p | فاز دوم - ذرات |
| turb | جریان معشوش | d | پخشی |
| | | | نمادهای یونانی: |
| ν | ویسکوزیته دینامیکی | ρ | چگالی |
| φ | غلظت حجمی نانوذرات | μ | ویسکوزیته سینماتیکی |
| ΔP | افت فشار | ζ_i | عدد تصادفی گوسی |

فصل اول: مقدمه