بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک
گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی جریان آرام سیال نانو درون لوله‌های افقی و مایل تحت شار حرارتی غیر یکنواخت در دیواره

استاد راهنما:
دکتر امین بهزادمهر

استاد مشاور:
دکتر سید مسعود حسینی سروری

تحقیق و نگارش:
شهریار الله یاری

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره مند شده است)

بهمن ۱۳۸۹

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان **مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی جریان آرام سیال نـانو درون لوله‌های افقی و مایل تحت شار حرارتی غیـر یکنواخـت در دیـواره** قـسمتی از برنامـه آموزشـی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی توسط دانشجو شهریار الله یاری تحت راهنمـایی اسـتاد پایـان نامه دکتر امین بهزادمهر تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطـلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

(شهریار الله یاری)

این پایان نامه ۸ واحد درسی شناخته می شـود و در تـاریخ ۱۳۸۹/۱۱/۲۱ توسـط هیئـت داوران بررسـی و درجه عالی به آن تعلق گرفت.

	نام و نام خانوادگی	**امضاء**	**تاریخ**
استاد راهنما:	دکتر امین بهزادمهر		
استاد مشاور:	دکتر سید مسعود حسینی سروری		
داور ۱:	دکتر محمد حسین شفیعی		
داور ۲:	دکتر علیرضا حسین نژاد		
نماینده تحصیلات تکمیلی:	دکتر محمد رضا سهرابی		

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب شهریار الله یاری تأیید می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: شهریار الله یاری

امضاء

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

و

همسر عزیزم

سپاسگزاری

اکنون که با یاری خداوند متعال این پایان نامه به اتمام رسیده است برخود لازم می‌دانم از تمام کسانی که به نوعی اینجانب را در انجام پایان نامه یاری کرده‌اند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. از زحمات شایان و بی‌دریغ استاد ارجمندم جناب دکتر بهزادمهر که مرا در تمامی عرصه‌های علمی و زندگی یاری نموده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم. از استاد گرانقدر جناب دکتر حسینی سروری که به عنوان مشاور اینجانب را در انجام پروژه یاری نموده‌اند سپاسگزاری می‌نمایم.

از زحمات دوستان عزیزم، آقایان اقبال عبادی و محمد شریعت، که به اینجانب کمک شایانی کردند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از پدر و مادرم، همسرم و برادارنم که با تمام سختی‌ها و مشکلات، همیشه مشوق من برای ادامه تحصیل بودند و همچنین بخاطر محبت‌های بی دریغشان صمیمانه سپاسگزارم و به تک تکشان می‌بالم.

همچنین از دیگر دوستان آقایان مهدی جهان بخش رستمی، جواد عاشوری، مقداد حسنی، امید غفاری، امین فرهمند، علی‌اکبر شکوهی، هادی چوپان، مهدی پورغریب شاهی، احمد جمالی‌کیخواه، مهران پارسایی، جابر ابویان، سعید ناهیدی، علیرضا رضوان‌فر، هادی شادفر، عباس دهقانی‌پور، سلمان رنجبر، مجتبی فدایی، محسن مهدوی عادلی، وحید رضایی تالار پشتی، رامین احسانی و همچنین سرکار خانم مرضیه حکیمی و سرکار خانم محدثه میری و تمامی دوستان که مرا همراهی کردند هرگز فراموششان نخواهم کرد و کمال تشکر و قدردانی را دارم و از درگاه خدای متعال برای همه این بزرگواران آرزوی سعادت روز افزون خواستارم.

چکیده

با توجه به کاربرد فراوان لوله‌های افقی و مایل در صنعت، افزایش انتقال حرارت در این موارد خیلی مهم می‌باشد. در این پایان نامه رفتار حرارتی و هیدردینامیکی سیال نانو در یک لوله مسی بطور عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل دو فازی مخلوط برای مدل کردن جریان سیال انتخاب شده است. معادلات بقای سه بعدی با استفاده از روش حجم محدود حل شده‌اند. سطح بالایی لوله در معرض شار حرارتی قرار گرفته است و سطح پایینی عایق می‌باشد و انتقال حرارت هدایت داخل لوله مسی در نظر گرفته شده است. خواص‌های فیزیکی سیال نانو به غیر از چگالی در نیروی حجمی که با استفاده از فرض بوزینسک تقریب زده می‌شود، ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

رفتارهای حرارتی و هیدرودینامیکی نانو سیال آب و اکسید آلومینیم برای اعداد گراشهف، اعداد رینولدز و قطر متوسط ذرات نانو مختلف در شیب‌های مختلف لوله مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که در یک رینولدز و گراشهف، با افزایش نسبت حجمی جامد-مایع، ضریب انتقال حرارت و تنش برشی افزایش می‌یابد. با افزایش قطر متوسط ذرات پخش شده علاوه بر ضریب انتقال حرارت نیروهای شناوری نیز کاهش می‌یابد. آن همچنین باعث افزایش غیر یکنواختی ذرات نانو نیز می‌شود.

همچنین نشان داده شده است که شیب لوله می‌تواند در ضریب انتقال حرارت و همچنین تنش برشی در سراسر لوله بخاطر تغییر مولفه‌های محوری و شعاعی نیروهای شناوری موثر باشد.

کلمات کلیدی: نانو سیال، مدل مخلوط، شار حرارتی غیر یکنواخت، جابجایی ترکیبی، لوله‌ی افقی و مایل

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	**۱**
۱-۱- فن‌آوری نانو	۲
۱-۲- نانو سیال	۲
۱-۳- مروری بر کارهای انجام شده در مورد قابلیت هدایت حرارتی و انتقال حرارت جابجایی نانوسیال	۴
۱-۴- پژوهش حاضر	۸
۱-۵- ساختار پایان نامه	۸
فصل دوم: معرفی مسئله،معادلات حاکم،شرایط مرزی و روش حل عددی	**۹**
۲-۱- تعریف مسئله	۱۰
۲-۲- معادلات حاکم	۱۰
۲-۲-۱- مدل دو فازی	۱۰
۲-۲-۲- مدل بوزینسک	۱۱
۲-۲-۳- معادله‌ی پیوستگی	۱۲
۲-۲-۴- معادله‌ی ممنتم	۱۲
۲-۲-۵- معادله‌ی کسر حجمی فاز دوم	۱۴
۲-۲-۶- معادله‌ی انرژی	۱۴
۲-۲-۶-۱- معادله انرژی برای سیال	۱۴
۲-۲-۶-۲- معادله انرژی برای پوسته‌ی لوله	۱۴
۲-۳- خواص فیزیکی	۱۵
۲-۳-۱- دانسیته	۱۵
۲-۳-۲- ظرفیت گرمایی	۱۵

۲-۳-۳- ضریب هدایت حرارتی..... ۱۵
۲-۳-۴- ویسکوزیته..... ۱۶
۲-۳-۵- ضریب انبساط حجمی..... ۱۶
۲-۴- اعداد بی بعد مورد بررسی در مسئله..... ۱۷
۲-۵- شرایط مرزی..... ۱۷
۲-۶- حل عددی..... ۱۸
۲-۷- بررسی صحت کد محاسباتی..... ۱۹
۲-۷-۱- استقلال شبکه..... ۱۹
۲-۷-۲- بررسی صحت کد محاسباتی..... ۲۵
فصل سوم: اثر تغییرات نسبت حجمی جامد-مایع..... ۲۸
۳-۱- مقدمه..... ۲۹
۳-۲- . تاثیر نسبت حجمی جامد-مایع بر روی سرعت محوری..... ۳۰
۳-۲-۱- تاثیر نسبت حجمی جامد-مایع بر روی سرعت محوری درون لوله‌ی افقی..... ۳۰
۳-۲-۲- تاثیر نسبت حجمی جامد-مایع بر روی سرعت محوری درون لوله‌ی مایل..... ۳۲
۳-۳- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی جریان‌های ثانویه..... ۳۴
۳-۳-۱- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی جریان‌های ثانویه درون لوله‌ی افقی..... ۳۴
۳-۳-۲- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی جریان‌های ثانویه درون لوله‌ی مایل..... ۳۶
۳-۴- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی دمای بی بعد..... ۳۹
۳-۴-۱- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی دمای بی بعد درون لوله‌ی افقی..... ۳۹
۳-۴-۲- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی دمای بی بعد درون لوله‌ی مایل..... ۴۱
۳-۵- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی..... ۴۶
۳-۵-۱- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌ی افقی..... ۴۶
۳-۵-۲- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی درون

لوله‌ی مایل..... ۴۸
۳-۶- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی ۵۱
۳-۶-۱- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی درون لوله‌ی افقی..... ۵۱
۳-۶-۲- تاثیر نسبت حجمی جامد- مایع بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی درون لوله‌ی مایل..... ۵۴
فصل چهارم: اثر تغییرات عدد گراشهف..... ۶۰
۴-۱- مقدمه..... ۶۱
۴-۲- اثر عدد گراشهف بر روی سرعت محوری..... ۶۱
۴-۲-۱- اثر عدد گراشهف بر روی سرعت محوری درون لوله‌ی افقی..... ۶۱
۴-۲-۲- اثر عدد گراشهف بر روی سرعت محوری درون لوله‌ی مایل..... ۶۳
۴-۳- اثر عدد گراشهف بر روی جریان‌های ثانویه..... ۶۳
۴-۳-۱- اثر عدد گراشهف بر روی جریان‌های ثانویه درون لوله‌ی افقی..... ۶۳
۴-۳-۲- اثر عدد گراشهف بر روی جریان‌های ثانویه درون لوله‌ی مایل..... ۶۵
۴-۴- اثر عدد گراشهف بر روی دمای بی بعد..... ۶۶
۴-۴-۱- اثر عدد گراشهف بر روی دمای بی بعد درون لوله‌ی افقی..... ۶۶
۴-۴-۲- اثر عدد گراشهف بر روی دمای بی بعد درون لوله‌ی مایل..... ۶۸
۴-۵- اثر عدد گراشهف بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی..... ۶۹
۴-۵-۱- اثر عدد گراشهف بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌ی افقی..... ۶۹
۴-۵-۲- اثر عدد گراشهف بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌ی مایل..... ۷۰
۴-۶- اثر عدد گراشهف بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی لوله..... ۷۱
۴-۶-۱- اثر عدد گراشهف بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی درون لوله‌ی افقی..... ۷۱
۴-۶-۲- اثر عدد گراشهف بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی درون لوله‌ی

مایل..... ۷۲

فصل پنجم: اثر تغییرات عدد رینولدز..... ۷۵

۵-۱- مقدمه..... ۷۶

۵-۲- اثر عدد رینولدز بر روی سرعت محوری..... ۷۶

۵-۲-۱- اثر عدد رینولدز بر روی سرعت محوری درون لوله‌ی افقی..... ۷۶

۵-۲-۲- اثر عدد رینولدز بر روی سرعت محوری درون لوله‌ی مایل..... ۷۸

۵-۳- اثر عدد رینولدز بر روی جریان‌های ثانویه..... ۷۸

۵-۳-۱- اثر عدد رینولدز بر روی جریان‌های ثانویه درون لوله‌ی افقی..... ۷۸

۵-۳-۲- اثر عدد رینولدز بر روی جریان‌های ثانویه درون لوله‌ی مایل..... ۸۰

۵-۴- اثر عدد رینولدز بر روی دمای بی بعد..... ۸۱

۵-۴-۱- اثر عدد رینولدز بر روی دمای بی بعد درون لوله‌ی افقی..... ۸۱

۵-۴-۲- اثر عدد رینولدز بر روی دمای بی بعد درون لوله‌ی مایل..... ۸۳

۵-۵- اثر عدد رینولدز بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی..... ۸۴

۵-۵-۱- اثر عدد رینولدز بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌ی افقی..... ۸۴

۵-۵-۲- اثر عدد رینولدز بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌ی مایل..... ۸۵

۵-۶- اثر عدد رینولدز بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی لوله..... ۸۶

۵-۶-۱- اثر عدد رینولدز بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی درون لوله‌ی افقی..... ۸۶

۵-۶-۲- اثر عدد رینولدز بر روی تنش برشی و ضریب اصطکاک سطحی درون لوله‌ی مایل..... ۸۷

فصل ششم: نحوه‌ی توزیع فاز دوم و اثر قطر ذرات معلق..... ۹۰

۶-۱- مقدمه..... ۹۱

۶-۲- نحوه‌ی توزیع فاز دوم با تغییر قطر ذرات نانو..... ۹۲

۶-۲-۱- نحوه‌ی توزیع فاز دوم با تغییر قطر ذرات نانو درون لوله‌ی افقی..... ۹۲

۶-۲-۲- نحوه‌ی توزیع فاز دوم با تغییر قطر ذرات نانو درون لوله‌ی مایل..... ۹۵
۶-۳- اثر قطر ذرات بر روی جریان‌های ثانویه..... ۹۹
۶-۳-۱- اثر قطر ذرات بر روی جریان‌های ثانویه درون لوله‌ی افقی..... ۹۹
۶-۳-۲- اثر قطر ذرات بر روی جریان‌های ثانویه درون لوله‌ی مایل..... ۱۰۱
۶-۴- اثر قطر ذرات بر روی دمای بی بعد..... ۱۰۲
۶-۴-۱- اثر قطر ذرات بر روی دمای بی بعد درون لوله‌ی افقی..... ۱۰۲
۶-۴-۲- اثر قطر ذرات بر روی دمای بی بعد درون لوله‌ی مایل..... ۱۰۴
۶-۵- اثر قطر ذرات بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی..... ۱۰۵
۶-۵-۱- اثر قطر ذرات بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌ی افقی..... ۱۰۵
۶-۵-۲- اثر قطر ذرات بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌ی مایل..... ۱۰۷
۶-۶- تغییرات تنش برشی و ضریب اصطکاک متوسط محیطی با افزایش قطر نانوذرات..... ۱۰۸
۶-۶-۱- تغییرات تنش برشی و ضریب اصطکاک متوسط محیطی با افزایش قطر نانوذرات درون لوله‌ی افقی..... ۱۰۸
۶-۶-۲- تغییرات تنش برشی با افزایش قطر نانوذرات درون لوله‌ی مایل..... ۱۱۰
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۱۱۲
۷-۱- نتیجه گیری..... ۱۱۳
۷-۲- پیشنهادات..... ۱۱۶
مراجع ۱۱۷

فهرست جدول ها

عنوان جدول **صفحه**

جدول ۲-۱. آزمایش استقلال شبکه بندی ۲۰

جدول ۲-۲. خصوصیات آب و اکسید آلومنیوم ۲۰

جدول ۳-۱. تغییرات مشخصه‌های فیزیکی نانوسیال با توجه به تغییرات کسر حجمی نانوذرات ۲۹

جدول ۳-۲. شار حرارتی و عدد پرانتل در کسرهای حجمی مختلف در $dp = 28\ nm$ ۲۹

جدول ۳-۳. متوسط اختلاف مقدار سرعت بین کسر حجمی‌ها در $Gr = 150000$

$Z / D = 95, Re = 300,$ ۳۱

جدول ۶-۱. تغییرات مشخصه‌های فیزیکی نانوسیال با توجه به تغییرات قطر نانوذرات ۹۱

جدول ۶-۲. مقدار شار حرارتی اعمالی به دیواره‌ها با توجه به تغییر قطر نانوذرات ۹۱

فهرست شکل ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۲-۱. هندسه مورد بررسی ۱۰

شکل ۲-۲. نمونه ای از مش بندی حوزه حل ۱۹

شکل۲-۳. بررسی سرعت محوری در راستای قطر عمودی در$Z/D=50$ ۲۱

شکل ۲-۴. بررسی دما در راستای قطر عمودی در$Z/D=50$ ۲۱

شکل ۲-۵. بررسی سرعت محوری در جهت طولی بر روی خط مرکزی لوله ۲۲

شکل ۲-۶. بررسی سرعت محوری در راستای قطر عمودی در$Z/D=50$ ۲۲

شکل۲-۷. بررسی دما در راستای قطر عمودی در $Z/D=50$ ۲۳

شکل ۲-۸. بررسی سرعت محوری در جهت طولی بر روی خط مرکزی لوله ۲۳

شکل ۲-۹. بررسی سرعت محوری در راستای قطر عمودی در $Z/D=50$ ۲۴

شکل ۲-۱۰. بررسی دما در راستای قطر عمودی در $Z/D=50$ ۲۴

شکل ۲-۱۱. بررسی سرعت محوری در جهت طولی بر روی خط مرکزی لوله ۲۵

شکل ۲-۱۲. مقایسه عدد بی بعد ناسلت متوسط محیطی با کار تجربی باروزی و همکاران ۲۶

شکل ۲-۱۳. مقایسه عدد بی بعد ناسلت متوسط محیطی با کار تجربی پت خوو و پلی کوو ۲۶

شکل ۲-۱۴. مقایسه سرعت و دمای بی بعد با کار عددی اوزان و گلنیس ۲۷

شکل ۳-۱. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی برای کسر حجمی‌های مختلف در $Z / D = 95, Gr = 150000$ ۳۱

شکل ۳-۲. خطوط جریان در طول لوله در $\phi = 0.04, Re = 300, Gr = 150000$ در صفحه $X=0$ ۳۱

شکل ۳-۳. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی برای زاویه های مختلف در $Z / D = 95, Gr = 30000$ ۳۳

شکل ۳-۴. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی برای زاویه‌های مختلف در

$Z / D = 95, Gr = 150000$ ۳۳

شکل ۳-۵. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی برای زاویه‌های مختلف در $Z / D = 95, Gr = 450000$ ۳۴

شکل ۳-۶. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای کسر حجمی‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, Gr = 30000,$ ۳۵

شکل ۳-۷. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای کسر حجمی های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, Gr = 150000,$ ۳۶

شکل ۳-۸. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای زاویه‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, \varphi = 0.04, Gr = 150000,$ ۳۷

شکل ۳-۹. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای کسر حجمی‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, \alpha = 60, Gr = 150000,$ ۳۸

شکل ۳-۱۰. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای کسر حجمی‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, Gr = 30000,$ ۴۰

شکل ۳-۱۱. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای کسر حجمی‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, Gr = 150000,$ ۴۱

شکل ۳-۱۲. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای زاویه‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, \phi = 0.04, Gr = 30000,$ ۴۳

شکل ۳-۱۳. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای زاویه‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, \phi = 0.04, Gr = 150000,$ ۴۴

شکل ۳-۱۴. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای زاویه‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, \phi = 0.04, Gr = 450000,$ ۴۵

شکل ۳-۱۵. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای کسر حجمی‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, \alpha = 60, Gr = 30000,$ ۴۶

شکل ۳-۱۶. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای کسر حجمی‌های مختلف در طول

بی بعد لوله و در $Gr = 30000$ ۴۷

شکل ۳-۱۷. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای کسر حجمی‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 150000$ ۴۸

شکل ۳-۱۸. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 30000$ ۴۹

شکل ۳-۱۹. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 150000$ ۴۹

شکل ۳-۲۰. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 450000$ ۵۰

شکل ۳-۲۱. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای کسر حجمی‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $\alpha = 60, Gr = 150000$ ۵۱

شکل ۳-۲۲. تغییرات تنش برشی برای کسر حجمی‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 30000$ ۵۲

شکل ۳-۲۳. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای کسر حجمی‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 30000$ ۵۳

شکل ۳-۲۴. تغییرات تنش برشی برای کسر حجمی‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 150000$ ۵۳

شکل ۳-۲۵. خطوط هم تراز فشار نسبی برای کسر حجمی‌های مختلف در طول لوله و در $Gr = 150000, Re = 300$ در صفحه $X = 0$ ۵۴

شکل ۳-۲۶. تغییرات تنش برشی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 30000$ ۵۵

شکل ۳-۲۷. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 30000$ ۵۶

شکل ۳-۲۸. تغییرات تنش برشی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در

$Gr = 150000$ ۵۷

شکل ۳-۲۹. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 150000$ ۵۷

شکل ۳-۳۰. تغییرات تنش برشی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 450000$ ۵۸

شکل ۳-۳۱. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای زاویه‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $Gr = 450000$ ۵۸

شکل ۳-۳۲. تغییرات تنش برشی برای کسر حجمی‌های مختلف در طول بی بعد لوله و در $\alpha = 60, Gr = 150000$ ۵۹

شکل ۴-۱. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی لوله برای گراشهف‌های مختلف در $Z / D = 15$ ۶۲

شکل ۴-۲. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی لوله برای گراشهف‌های مختلف در $Z / D = 95$ ۶۲

شکل ۴-۳. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی لوله برای گراشهف‌های مختلف در $Z / D = 95, \alpha = 60$ ۶۳

شکل ۴-۴. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای گراشهف‌های مختلف در $\phi = 0.04$ $Z / D = 15, Re = 300,$ ۶۴

شکل ۴-۵. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای گراشهف‌های مختلف در $\phi = 0.04$ $Z / D = 95, Re = 300,$ ۶۵

شکل ۴-۶. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای گراشهف‌های مختلف در $Re = 300$ $Z / D = 95, \alpha = 60, \phi = 0.04,$ ۶۶

شکل ۴-۷. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای گراشهف‌های مختلف در $\phi = 0.04$ $Z / D = 15, Re = 300,$ ۶۷

شکل ۴-۸. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای گراشهف‌های مختلف در $\phi = 0.04$

$Z / D = 95, Re = 300,$ ۶۸

شکل ۴-۹. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای گراشهف‌های مختلف در $\phi = 0.04$

$Z / D = 95, \alpha = 60, Re = 300,$ ۶۹

شکل ۴-۱۰. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای گراشهف‌های مختلف در طول بی بعد لوله ۷۰

شکل ۴-۱۱. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای گراشهف‌های مختلف در طول بی بعد لوله در $\alpha = 60$ ۷۱

شکل ۴-۱۲. تغییرات تنش برشی برای گراشهف‌های مختلف در طول بی بعد لوله ۷۲

شکل ۴-۱۳. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای گراشهف‌های مختلف در طول بی بعد لوله ۷۲

شکل ۴-۱۴. تغییرات تنش برشی برای گراشهف‌های مختلف در طول بی بعد لوله در $\alpha = 60$ ۷۳

شکل ۴-۱۵. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای گراشهف‌های مختلف در طول بی بعد لوله در $\alpha = 60$ ۷۴

شکل ۵-۱. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی لوله برای رینولدزهای مختلف در $Z / D = 15$ ۷۷

شکل ۵-۲. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی لوله برای رینولدزهای مختلف در $Z / D = 95$ ۷۷

شکل ۵-۳. پروفیل سرعت محوری بی بعد در راستای قطر عمودی لوله برای رینولدزهای مختلف در $Z / D = 95, \alpha = 60$ ۷۸

شکل ۵-۴. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای رینولدزهای مختلف در $\phi = 0.04$

$Z / D = 15, Gr = 150000,$ ۷۹

شکل ۵-۵. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای رینولدزهای مختلف در $\phi = 0.04$

$Z / D = 95, Gr = 150000,$ ۸۰

شکل ۵-۶. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای رینولدزهای مختلف در $Gr = 150000$

$Z/D=95,\alpha=60,\phi=0.04,$ ۸۱

شکل ۵-۷. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای رینولدزهای مختلف در $\phi=0.04$

$Z/D=15,Gr=150000,$ ۸۲

شکل ۵-۸. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای رینولدزهای مختلف در $\phi=0.04$

$Z/D=95,Gr=150000,$ ۸۳

شکل ۵-۹. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای رینولدزهای مختلف در $\phi=0.04$

$Z/D=95,\alpha=60,Gr=150000,$ ۸۴

شکل ۵-۱۰. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای رینولدزهای مختلف در طول بی بعد لوله ۸۵

شکل ۵-۱۱. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای رینولدزهای مختلف در طول بی بعد لوله در $\alpha=60$ ۸۶

شکل ۵-۱۲. تغییرات تنش برشی برای رینولدزهای مختلف در طول بی بعد لوله ۸۷

شکل ۵-۱۳. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای رینولدزهای مختلف در طول بی بعد لوله ۸۷

شکل ۵-۱۴. تغییرات تنش برشی برای رینولدزهای مختلف در طول بی بعد لوله در $\alpha=60$ ۸۸

شکل ۵-۱۵. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای رینولدزهای مختلف در طول بی بعد لوله در $\alpha=60$ ۸۹

شکل ۶-۱. توزیع ذرات نانو در روی قطر عمودی لوله برای قطرهای مختلف در $Z/D=95$ ۹۳

شکل ۶-۲. نحوه‌ی پخش نانوذرات برای قطرهای مختلف در $Gr=30000,Re=300$

$Z/D=95,\phi=0.04,$ ۹۴

شکل ۶-۳. نحوه‌ی پخش نانوذرات برای قطرهای مختلف در $Gr=150000,Re=300$

$Z/D=95,\phi=0.04,$ ۹۵

شکل ۶-۴. نحوه‌ی پخش نانوذرات برای زاویه‌های مختلف در $Gr=150000,Re=300$

$Z/D=95,d_p=47,\phi=0.04,$ ۹۷

شکل ۶-۵. نحوه‌ی پخش نانوذرات برای قطرهای مختلف در $Gr=150000,Re=300$

$Z/D=95,\alpha=60,\phi=0.04,$ ۹۸

شکل ۶-۶. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای قطرهای مختلف در $Re=300$

$Z/D=95,\phi=0.04,Gr=30000,$ ۱۰۰

شکل ۶-۷. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای قطرهای مختلف در $Re=300$

$Z/D=95,\phi=0.04,Gr=150000,$ ۱۰۱

شکل ۶-۸. بردارهای سرعت جریان ثانویه برای قطرهای مختلف در $Re=300$

$Z/D=95,\alpha=60,\phi=0.04,Gr=150000,$ ۱۰۲

شکل ۶-۹. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای قطرهای مختلف در $Re=300$

$Z/D=95,\phi=0.04,Gr=30000,$ ۱۰۳

شکل ۶-۱۰. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای قطرهای مختلف در $Re=300$

$Z/D=95,\phi=0.04,Gr=150000,$ ۱۰۴

شکل ۶-۱۱. خطوط هم تراز دمای بی بعد برای قطرهای مختلف در $Re=300$

$Z/D=95,\phi=0.04,\alpha=60,Gr=150000,$ ۱۰۵

شکل ۶-۱۲. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای قطرهای مختلف در طول بی بعد لوله در $Gr=30000$ ۱۰۶

شکل ۶-۱۳. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای قطرهای مختلف در طول بی بعد لوله در $Gr=150000$ ۱۰۷

شکل ۶-۱۴. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای قطرهای مختلف در طول بی بعد لوله در $\alpha=60,Gr=150000$ ۱۰۸

شکل ۶-۱۵. تغییرات تنش برشی برای قطرهای مختلف در طول بی بعد لوله در $Gr=30000$ ۱۰۹

شکل ۶-۱۶. تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای قطرهای مختلف در طول بی بعد لوله در $Gr=30000$ ۱۰۹

شکل ۶-۱۷. تغییرات تنش برشی برای قطرهای مختلف در طول بی بعد لوله در $Gr=150000$ ۱۱۰