دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مکانیک سیالات

بررسی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در مجاری خمیده دارای مقطع مستطیلی و در حالت های ایستا و چرخان

دانشجو : محمود نوروزی

اساتید راهنما :

دکتر محمد حسن کیهانی

دکتر محمد رضا حیرانی نوبری

استاد مشاور

دکتر فرهاد طالبی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

اسفند ۱۳۸۸

شماره : ۴/۲۸۸/۱۹۰
تاریخ : ۱۳/۱۲/ ۸۸
ویرایش :

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورتجلسه دفاع از رساله دکتری (ph.D)

فرم شماره ۱۱

بدینوسیله گواهی می شود آقای **محمود نوروزی** دانشجوی دکتری رشته **مکانیک – تبدیل انرژی** ورودی **۱۳۸۴** در تاریخ **۱۳۸۸/۱۲/۴** از رساله خود با عنوان: **بررسی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکو الاستیک در مجاری خمیده دارای مقطع مستطیلی و در حالت های ایستاو چرخان** دفاع و با اخذ نمره ۲۰ به درجه : عالی (ph.D) نائل گردید .

الف) درجه عالی : نمره ۲۰-۱۹ ☒	ب) درجه بسیار خوب : نمره ۱۸/۹۹ – ۱۷ ☐
ج) درجه خوب : نمره ۱۶/۹۹– ۱۵ ☐	د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
ذ) رساله نیاز به اصلاحات دارد ☐	

	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکترمحمدحسن کیهانی	استاد راهنمای اول	دانشیار	
۲	دکترمحمدرضاحیرانی‌نوبری	استاد راهنمای دوم	دانشیار	
۳	دکتر فرهاد طالبی	استاد راهنما / مشاور	استادیار	
۴	دکتر مهرداد تقی‌زاده‌منظری	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۵	دکتربهار فیروزآبادی	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۶	دکترمحمدجواد مغربی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۷	دکتر محمود شریعتی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۸	دکتر محمود فرزانه گرد	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید .

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران :

تاریخ و امضاء

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی
یار و پشتیبان من بودند.

تشکر و قدردانی

اکنون که این رساله به پایان رسیده بر خود واجب می‌دانم از راهنمایی‌ها و زحمات بی دریغ اساتید محترم آقایان دکتر محمد حسن کیهانی، دکتر محمدرضا حیرانی نوبری و دکتر فرهاد طالبی سپاسگزاری نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **محمود نوروزی** دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی** دانشکده **مکانیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله **بررسی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکو الاستیک در مجاری خمیده دارای مقطع مستطیلی و در حالت های ایستا و چرخان** تحت راهنمایی **دکتر محمدحسن کیهانی و محمدرضا حیرانی نوبری** متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصلت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه/رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچگونه مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه/رساله رعایت می‌گردد .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه/رساله ،در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه/رساله ،در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا از آن استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ : ۸۸/۱۲/۱۲

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات شاخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و این مطلب باشد به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد .
- متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیرشده پایان نامه/رساله وجود داشته باشد .

چکیده

جریان در مجاری خمیده از جمله مسائل کلاسیک و پایه در مکانیک سیالات محسوب می شود که دارای کاربردهای متنوعی در زمینه های مختلف صنعتی و پزشکی است. تاکنون تحقیقات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی بیشماری در خصوص این جریان صورت گرفته که عمده این تحقیقات در مورد سیالات نیوتنی بوده و سهم اندکی از آنها متوجه سیالات غیرنیوتنی و بویژه سیالات ویسکوالاستیک است. در این تحقیق، جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در کانال خمیده دارای مقطع مستطیلی در حالات ایستا و چرخان مورد بررسی قرار می گیرد. هدف اصلی از پژوهش حاضر، شناخت بهتر اثرات خواص ویسکوالاستیک بر این جریان است. برای این منظور از مدل کریمینال-اریکسون-فیلبی (CEF) به عنوان معادله متشکله سیال ویسکوالاستیک استفاده شده که قادر به ارائه اثر توابع ویسکومتریک غیرخطی و بویژه هر دو مقدار اختلاف تنش های نرمال اول و دوم است.

در این تحقیق، مطالعه جریان و انتقال حرارت در مجاری خمیده با استفاده از روش های تحلیلی و عددی انجام شده است. در اینجا با استفاده از تکنیک مرتبه بزرگی رابطه تحلیلی برای تعادل نیروها در ناحیه هسته جریان در کانال خمیده ارائه می شود که به شناخت نحوه اثر نیروهای موثر بر میدان جریان کمک شایانی می نماید. همچنین برای نخستین بار با استفاده از این تکنیک روابط تحلیلی برای میدان جریان خزشی سیال مرتبه دو در کانال های خمیده دارای مقطع مستطیلی ارائه می شود. در اینجا برای اثبات اثرات متضاد ثابت های زمانی رهایی از تنش و تاخیر سیال ویسکوالاستیک بر دبی جریان در مجاری خمیده از روش حساب اختلالات استفاده شده است. به دلیل وجود دشوارهای محاسباتی در راه استفاده از این روش برای مطالعه جریان در مجاری خمیده غیر مدور، این اثرات در مجاری خمیده مدور مطالعه شده است. با استفاده از این نتایج تحلیلی نشان داده می شود که در سیالات دارای مقادیر ثابت زمانی نسبتاً بزرگ، میزان مقاومت جریان ویسکوالاستیک از جریان نیوتنی بیشتر است حال آنکه در سیالات دارای

مقادیر ثابت زمانی تاخیر بزرگ این اثر برعکس بوده و جریان از خود رفتار کاهش پسا نشان می دهد. همچنین نتایج عددی مربوط به جریان در کانال خمیده مستطیلی نیز به این پدیده دلالت دارد. بخش اصلی نتایج این پژوهش مربوط به نتایج حاصل از شبیه سازی عددی است. در اینجا از روش تفاضل محدود برای گسسته سازی معادلات حاکم بر روی شبکه جابجا شده استفاده شده و نحوه اختصاص پارامترهای میدان جریان و انتقال حرارت بر روی این شبکه مطابق روش علامتگذاری و سلول است. همچنین روش تراکم پذیری مصنوعی جهت تخمین فشار در طی گامهای زمانی تحلیل به کار گرفته شده و از برخی تکنیک های عددی برای پایدار نمودن حل عددی در خواص الاستیک بزرگ استفاده شده است. بر اساس شبیه سازی عددی، صحت نتایج حاصل از حل عددی ارزیابی شده و استقلال پاسخ های عددی از شبکه تحقیق شده است. همچنین اثر پارمترهایی نظیر عدد رینولدز، عدد دین، عدد روزبی، عدد الاستیک، عدد وایزنبرگ، نسبت انحنا، نسبت ابعادی، اثر ویسکوزیته و ثابت های اختلاف تنش نرمال اول و دوم وابسته به نرخ برش بر میدان جریان و انتقال حرارت در جریان خزشی و اینرسی (در حالات پایدار و ناپایدار) به روش عددی مورد بررسی قرار می گیرد. در اینجا برای نخستین بار نشان داده می شود که برخلاف جریان خزشی سیال نیوتنی در کانال خمیده، جریان خزشی سیال ویسکوالاستیک در کانال خمیده می تواند ناپایدار شود. از نوآوری های دیگر تحقیق حاضر آن است که برخلاف تحقیقات پیشین، اثر اختلاف تنش های نرمال بطور مجزا بر میدان جریان بررسی شده و نشان داده می شود که ازدیاد اختلاف تنش نرمال اول با افزایش شدت جریانهای ثانویه همراه بوده و می تواند سبب بروز ناپایداری در جریان شود حال آنکه ازدیاد اختلاف تنش نرمال دوم منفی دارای اثر کاملاً متضادی بوده و در جهت پایدار نمودن جریان عمل می نماید.

کلمات کلیدی: سیال ویسکوالاستیک، جریان، انتقال حرارت، لوله خمیده، مقطع مستطیلی، مدل CEF

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات منتشر شده در مجلات

1. Norouzi, M., Kayhani, M.H., Chang, S., Nobari, M.R.H., "Flow of Second Order Fluid in a Curved Duct with Square Cross Section", JNNFM, In Press.
2. Norouzi, M., Kayhani, M.H., Nobari, M.R.H., Joneidi, A.A., "An Analytical Investigation of Second Order Fluid Flow inside a Curved Circular Pipe", Int. J. of Non. Dyn. and Eng. Sci., In Press.
3. Norouzi, M., Kayhani, M.H., Nobari, M.R.H, "Mixed and Forced Convection of Viscoelastic Materials in Straight Duct with Rectangular Cross Section", World App. Sci. J., Vol. 7., No. 3., pp. 285-296, 2009

۴- کیهانی، م، ح، نوبری، م، ر، ح، نوروزی، م، "بررسی عددی جریان و انتقال حرارت در یک کانال U شکل چرخان"، مجله علمی و پژوهشی مکانیک و هوافضا امام حسین (ع)، شماره ۲، جلد ۳، صفحات، ۵۹-۷۲، ۱۳۸۶.

کنگره های بین المللی

1. Norouzi, M., Kayhani, M.H., Nobari, M.R.H, M. Karimi Demneh, "Convective Heat Transfer of Viscoelastic Flow in a Curved Duct", International Conference on Mechanical, Aeronautical and Manufacturing Engineering, Singapore, 2009.

۲- نوروزی، م، کیهانی، م، ح، نوبری، م، ر، ح، "بررسی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک در کانال خمیده دارای مقطع مربعی"، هفدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، تهران، ۱۳۸۸.

فهرست مطالب **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تاریخچه ۳

۱-۳- جریان و انتقال حرارت در مجاری مستقیم ۷

۱-۴- جریان و انتقال حرارت در مجاری خمیده ۲۴

۱-۴-۱- مجاری خمیده دارای مقطع مدور ۲۴

۱-۴-۲- مجاری خمیده دارای مقطع غیرمدور ۴۷

۱-۴-۲-۱- جریان سیال نیوتنی ۴۷

۱-۴-۲-۲- جریان سیال غیر نیوتنی ۵۹

۱-۵- نمونه هایی از رفتار سیالات ویسکوالاستیک در جریانهای غیر دائم ۶۴

۱-۶- تحقیق حاضر ۶۸

۱-۶-۱- مشخصات کلی ۶۸

۱-۶-۲- ضرورت و کاربردها ۷۰

۱-۶-۳- جنبه های نوآوری ۷۱

۱-۶-۴- ساختار کلی ۷۲

فصل دوم: روابط فیزیکی

۲-۱- مقدمه ۷۵

۲-۲- روابط جریان در مجاری خمیده ۷۵

۲-۲-۱- مقطع مستطیلی ۷۶

۲-۲-۱-۱- پارامترهای بی بعد جریان ۷۶

۲-۲-۱-۲- معادلات حاکم بر جریان و شرایط مرزی مربوطه ۷۷

۲-۲-۱-۳- پارامترهای بی بعد انتقال حرارت و شرایط مرزی مربوطه ۸۲

۲-۲-۱-۴- معادله حاکم بر انتقال حرارت ۸۳

۲-۲-۲- مقطع مدور ۸۸
۲-۲-۲-۱- پارامترهای بی بعد جریان و انتقال حرارت ۸۹
۲-۲-۲-۲- معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت ۸۹
۲-۳- معادله متشکله ۹۴
۲-۳-۱- معرفی مدل CEF ۹۴
۲-۳-۲- توابع ویسکومتریک ۹۶
۲-۳-۳- چند قضیه معروف ۱۰۰
۲-۳-۴- معادله متشکله سیال CEF در دستگاه مختصات استوانه ای ۱۰۱
۲-۳-۵- معادله متشکله سیال CEF در دستگاه مختصات ترویدال ۱۰۳

فصل سوم: آنالیز تحلیلی

۳-۱- مقدمه ۱۰۶
۳-۲- تکنیک مرتبه بزرگی جهت تحلیل جریان در کانال خمیده ۱۰۷
۳-۲-۱- رابطه تعادل نیروها ۱۰۸
۳-۲-۲- جریان خزشی ۱۱۱
۳-۳- حل تحلیلی جریان و انتقال حرارت در لوله های خمیده ۱۲۳
۳-۳-۱- حل میدان جریان ۱۲۳
۳-۳-۱-۱- حل مرتبه δ^0 ۱۲۴
۳-۳-۱-۲- حل مرتبه δ^1 ۱۲۵
۳-۳-۱-۳- حل مرتبه δ^2 ۱۲۶
۳-۳-۱-۴- تعیین دبی جریان ۱۲۸
۳-۳-۱-۵- نتایج میدان سرعت ۱۳۰
۳-۳-۲- حل میدان دما ۱۴۱
۳-۳-۲-۱- سیال مرتبه دو ۱۴۲
۳-۳-۲-۲- سیال اولدروید-بی ۱۴۷

فصل چهارم: روش عددی

۴-۱- مقدمه ۱۶۱
۴-۲- تحلیل عددی جریانهای دائمی ۱۶۱
۴-۳- نحوهٔ تولید شبکه محاسباتی ۱۶۳
۴-۴- گسسته سازی معادلات حاکم ۱۶۵
۴-۴-۱- شیوه گسسته سازی ۱۶۵
۴-۴-۲- صورت گسسته معادلات حاکم ۱۶۷
۴-۵- شرایط مرزی ۱۷۱
۴-۵-۱- کلیات ۱۷۱
۴-۵-۲- شرایط مرزی جریان و انتقال حرارت در تحقیق حاضر ۱۷۳
۴-۶- شرایط اولیه ۱۷۵
۴-۷- خطای محاسباتی ۱۷۷
۴-۸- پایداری روش عددی ۱۷۹
۴-۹- الگوریتم تحلیل ۱۸۰

فصل پنجم: نتایج عددی

۵-۱- مقدمه ۱۸۴
۵-۲- شرایط و الگوی همگرایی ۱۸۴
۵-۳- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه ۱۸۵
۵-۴- ارزیابی صحت نتایج ۱۸۸
۵-۵- جریان خزشی ۲۰۱
۵-۵-۱- مطالعه جریان ۲۰۱
۵-۵-۲- بررسی ناپایداری ۲۰۸
۵-۶- جریان اینرسی ۲۱۴
۵-۶-۱- اثر اینرسی جریان ۲۱۴
۵-۶-۲- اثر اختلاف تنش های نرمال در کانال ایستا ۲۲۱

۵-۶-۳- ناپایداری در جریان اینرسی ۲۳۴
۵-۶-۴- اثر ثابت های مربوط به وابستگی توابع ویسکومتریک به نرخ برش ۲۵۴
۵-۶-۵- اثر دوران کانال ۲۵۹

فصل ششم: نتیجه گیری

۶-۱- مقدمه ۲۸۱
۶-۲- حل تحلیلی ۲۸۱
۶-۲-۱- تکنیک مرتبه بزرگی ۲۸۱
۶-۲-۲- روش حساب اختلالات ۲۸۴
۶-۳- حل عددی ۲۸۸
۶-۳-۱- پایداری حل عددی ۲۸۸
۶-۳-۲- جریان خزشی در کانال ایستا ۲۸۸
۶-۳-۳- جریان اینرسی در کانال ایستا و چرخان ۲۹۱
۶-۴- پیشنهادات ۲۹۶

ضمیمه: مروری اجمالی بر سیالات ویسکوالاستیک

الف-۱- مقدمه ۲۹۸
الف-۲- طبقه بندی سیالات ویسکوالاستیک ۲۹۸
الف-۲-۱- سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان ۲۹۹
الف-۲-۲- سیالات غیر نیوتنی تابع زمان ۳۰۱
الف-۲-۳- سیالات ویسکوالاستیک ۳۰۳
الف-۲-۳-۱- معرفی سیالات ویسکوالاستیک ۳۰۳
الف-۲-۳-۲- برخی رفتارهای سیال ویسکوالاستیک ۳۰۷
الف-۲-۳-۳- منشاء رفتار ویسکوالاستیک در پلیمرها ۳۱۳
الف-۲-۳-۴- اندازه گیری خواص ۳۱۷
الف-۲-۳-۵- برخی پارامترهای مهم در جریان سیالات ویسکوالاستیک ۳۱۹

الف-۲-۳-۶- معادلات متشکله ۳۲۱
الف-۲-۳-۶-۱- کلیات ۳۲۱
الف-۲-۳-۶-۲- اصول حاکم و دیدگاه های رایج در تعیین معادلات متشکله ۳۲۴
الف-۲-۳-۶-۳- مدل های ویسکوالاستیک خطی ۳۲۶
الف-۲-۳-۶-۴- مدل های ویسکوالاستیک غیر خطی ۳۳۱
الف-۲-۳-۶-۵- رابطه معادلات متشکله ۳۴۳
الف-۲-۳-۶-۶- نحوه انتخاب معادله متشکله ۳۴۵

مراجع ۳۴۶

فهرست تصاویر **صفحه**

شکل (۱-۱): نتایج تاونسند برای مقدار ماکزیمم تابع جریان (ψ) بر حسب N_2 [۶] ۹

شکل (۱-۲): نتایج ژو و همکاران برای اثر نسبت ابعاد سطح مقطع کانال بر جریانهای ثانویه [۸] ۱۱

شکل (۱-۳): حساسیت پاسخ ها به شبکه [۹] ۱۳

شکل (۱-۴): اثر نسبت ابعاد کانال [۹] ۱۳

شکل (۱-۵): اثر ضریب C_{N21} [۹] ۱۳

شکل (۱-۶): اثر ضریب C_{N22} [۹] ۱۳

شکل (۱-۷): اثر عدد Re [۹] ۱۳

شکل (۱-۸): اثر ضریب C_{n1} [۹] ۱۳

شکل (۱-۹): توزیع عدد ناسلت بر حسب اعداد دبورا (Dr)، وایزنبرگ (ε) و برینکمن (Br) [۱۰] ۱۶

شکل (۱-۱۰): مقدار Nu/Nu_0 بر حسب عدد دبورا (Dr) و در اعداد برینکمن (Br) مختلف [۱۰] ۱۶

شکل (۱-۱۱): جریانهای ثانویه در اعداد وایزنبرگ مختلف [۱۶]، (a) : $\dot{\gamma}=0.01$ ، $|\psi|_{\max}=1.3\times10^{-8}$، (b) : $\dot{\gamma}=0.50$ ، $|\psi|_{\max}=2.3\times10^{-4}$، (c) : $\dot{\gamma}=1.00$ ، $|\psi|_{\max}=4.4\times10^{-4}$ ۱۹

شکل (۱-۱۲): جریانهای ثانویه در مقاطع چهار ضلعی با اعداد ε_1 مختلف ($\dot{\gamma}=0.5$)[۱۶]، (a) : $\varepsilon_1=0.044$ ، $|\psi|_{\max}=6.1\times10^{-7}$ (b) : $\varepsilon_1=0.176$ ، $|\psi|_{\max}=1.8\times10^{-5}$، (c) : $\varepsilon_1=0.220$ ، $|\psi|_{\max}=2.3\times10^{-4}$ ۱۹

شکل (۱-۱۳): جریان در کانال با مقطع مثلثی [۱۶]، (a) : سرعت محوری سیال نیوتنی در $\omega t=0.25\pi$، (b) : سرعت محوری سیال ویسکوالاستیک در $\omega t=1.907\pi$ و $\dot{\gamma}=0.5$، (c) : جریانهای ثانویه برای سیال ویسکوالاستیک ۲۰

شکل (۱-۱۴): جریان در کانال با مقطع شش ضلعی [۱۶]، (a) : سرعت محوری سیال نیوتنی در $\omega t=0.48\pi$، (b) : سرعت محوری سیال ویسکوالاستیک در $\omega t=0.455\pi$ و $\dot{\gamma}=1.0$، (c) : جریانهای ثانویه برای سیال ویسکوالاستیک ۲۰

شکل (۱-۱۵): هندسه مقطع جریان در پژوهش هاشم آبادی و اعتماد [۱۷] ۲۱

شکل (۱-۱۶): اثر شعاع انحناء گوشه ها بر سرعت گردابه ها ($n=0.8$ ،$\Psi_2^*=0.005$ و $\mathrm{Re}=500$) [۱۷] ۲۲

شکل (۱-۱۷): اثر شعاع انحناء گوشه ها بر سرعت گردابه ها ($n=0.8$ ،$\Psi_2^*=0.01$ و $\mathrm{Re}=500$) [۱۷] ۲۲

شکل (۱-۱۸): هندسه جریان در پژوهش توماس و والترز [۳۹] ۲۶

شکل (۱-۱۹): خطوط جریانهای ثانویه (خطوط ممتد: $m=1$ و خطوط خط چین: $m=0$) [۳۹] ۲۷

شکل (۱-۲۰): مسیرهای خط مرکز لوله در تحقیق ایموتو (a: خم سینوسی، b: خم دارای یک تقعر و c: خم دارای دو تقعر) [۴۰] ۲۷

شکل (۱-۲۱): اختلاف دبی جریان در کانال مستقیم نسبت به کانال خمیده [۴۳] ۳۰

شکل (۱-۲۲): هندسه جریان در تحقیق سارین برای مجرای مدور [۴۴] ۳۱

شکل (۱-۲۳): هندسه جریان در تحقیق رابرتسون و مولر برای مجرای دارای مقطع مدور [۴۶] ۳۵

شکل (۱-۲۴): دبی نسبی بر حسب عدد وایزنبرگ ((a) : جریان خزشی و (b) : $\mathrm{Re}=25$) [۴۶] ۳۶

شکل (۱-۲۵): جریانهای ثانویه سیال نیوتنی در کانال خمیده دارای مقطع حلقوی [۴۶]، ($\delta=0.1$ ، $\mathrm{Re}=25$)، (a) $r_i/r_o=0.01$ ، (b) $r_i/r_o=0.1$ و (c) $r_i/r_o=0.5$ ۳۷

شکل (۱-۲۶): جریانهای ثانویه سیال اولدروید-B در کانال خمیده دارای مقطع حلقوی [۴۶]، ($\delta=0.1$ ، $\mathrm{Re}=25$ ، $We=5.0$ و $\eta_p/\eta=0.2$)، (a) $r_i/r_o=0.01$ ، (b) $r_i/r_o=0.1$ و (c) $r_i/r_o=0.5$ ۳۷

شکل (۱-۲۷): هندسه جریان در تحقیق چن و همکارانش [۵۴] ۴۲

شکل (۱-۲۸): مقدار f_c/f_s بر حسب عدد دوران و در اعداد وایزنبرگ مختلف ($\kappa=0.05$) [۵۴] ۴۴

شکل (۱-۲۹): موقعیت ماکزیمم توزیع دما و Nu_r بر حسب عدد رینولدز و عدد وایزنبرگ [۵۵] ۴۴

شکل (۱-۳۰): میزان انحراف عدد ناسلت بر حسب عدد دوران و در مقادیر مختلف عدد رینولدز و عدد وایزنبرگ ($\eta_p/\eta=0.2$)[۵۵] ۴۵

شکل (۱-۳۱): هندسه کانال خمیده در تحقیق بارا [۷۸] ۴۸

شکل (۱-۳۲): نمای شماتیک تجهیزات آزمایش در تحقیق بارا [۷۸] ۴۸

شکل (۱-۳۳): خطوط جریانهای ثانویه سیال نیوتنی در عدد دین ۱۲۵ [۷۸] ۵۰

شکل (۱-۳۴): خطوط جریانهای ثانویه سیال نیوتنی در عدد دین ۱۳۷ [۷۸] ۵۱

شکل (۱-۳۵): خطوط جریانهای ثانویه سیال نیوتنی در عدد دین ۱۵۰ [۷۸] ۵۲

شکل (۱-۳۶): توزیع سرعت محوری در جهات شعاعی و عرضی وسط مقطع کانال در حالت توسعه یافته و در اعداد دین مختلف (خطوط پیوسته: نتایج حل عددی، علائم دایره ای: نتایج آزمایشگاهی) [۷۹] ۵۳

شکل (۱-۳۷): نمای شماتیک تجهیزات آزمایش در تحقیق فلونا و همکاران [۸۰] ۵۳

شکل (۱-۳۸): تصاویر جریانهای ثانویه حاصل از آزمایش و خطوط جریانهای ثانویه حاصل از حل عددی در موقعیت های مختلف نسبت به ورودی مجرای خمیده [۸۰] ۵۵

شکل (۱-۳۹): تصاویر جریانهای ثانویه حاصل از آزمایش و خطوط جریانهای ثانویه حاصل از حل عددی در اعداد دین مختلف [۸۰] ۵۶

شکل (۱-۴۰): خطوط جریانهای ثانویه و توزیع سرعت محوری در کانال دارای نسبت ابعادی ۱:۲
$(a): F=1.0,\ (b): F=0.0,\ (c): F=-1.0,\ (d):\ F=-1.3\ (Dn=400,\ \delta=0.3)$ ۵۸
$[۸۱]\ (e): F=-1.5,\ \ (f): F=-2.0$

شکل (۱-۴۱): خطوط جریانهای ثانویه و توزیع سرعت محوری در کانال دارای نسبت ابعادی ۱:۸
$(a): F=1.0,\ (b): F=0.0,\ (c): F=-0.2,\ (d):\ F=-1.5,\ (Dn=130,\ \delta=0.3)$ ۵۸
$[۸۱]\ (e): F=-2.0$

شکل (۱-۴۲): تابع جریان (نیمه بالایی) و سرعت محوری سیال توانی در کانال خمیده [۱۰۴] ۵۹

شکل (۱-۴۳): کانتورهای تابع جریان سیال MPTT در عدد دین ۱۲۵ و در اعداد دبورای مختلف [۱۰۹] ۶۱

شکل (۱-۴۴): کانتورهای تابع جریان سیال MPTT در $Dn=150$، $De=0.3$ و در زوایای مختلف [۱۱۰] ۶۱

شکل (۱-۴۵): کانتورهای سرعت محوری در مقادیر مختلف پارامتر F
$(Dn=10,\ \eta_p/\eta=0.2,\ We=5,\ \delta=0.1)$ [۱۱۱] ۶۳

شکل (۱-۴۶): کانتورهای تنش نرمال محوری در مقادیر مختلف پارامتر F
$(Dn=10,\ \eta_p/\eta=0.2,\ We=5,\ \delta=0.1)$ [۱۱۱] ۶۳

شکل (۱-۴۷): تغییرات سرعت برای جریان غیر دائم سیالات مرتبه دو و ماکسول [۱۱۴] ۶۵

شکل(۱-۴۸): توزیع سرعت در حالت $\delta=2$ در زمانهای (a), 1.0(b), 10(c) T=0.4 [۱۱۵] ۶۶

شکل(۱-۴۹): توزیع سرعت در حالت $\delta=1.2$ در زمانهای (a), 0.2(b), 3.0(c) T=0.1 [۱۱۵] ۶۶

شکل (۱-۵۰): نوسانات سرعت در $x=1.5$ به ازای $\delta=2$ [۱۱۶] ۶۷

شکل (۱-۵۱): نوسانات سرعت در $x=1.1$ به ازای $\delta=1.2$ [۱۱۶] ۶۷

شکل (۱-۵۲): هندسه جریان در تحقیق حاضر ۶۹

شکل (۲-۱): هندسه جریان در تحقیق اخیر با در نظر گرفتن دستگاه مختصات ترویدال ۸۸

شکل (۲-۲): دیاگرام ویسکوزیته در برابر نرخ برش برای محلول های مختلف [۳]، Δ: ۲٪ پلی ایزوبوتیلن در پریمول ۳۳۵، ○: ۵٪ پلی استیرن در آروکلور ۱۲۴۲، ∇: ۰/۷۵٪ پلی اکریل آمید در مخلوط ۹۵٪ وزنی آب و گلیسرین و □ ۷٪صابون آلومینیوم در دیکالین و ام-کرسول ۹۹

شکل (۳-۱): توزیع سرعت محوری در نسبت های ابعادی و نسبت های انحنای مختلف (v_θ/U) (الف): $\kappa=0.5$,(ب): $\kappa=1.0$ و (ج): $\kappa=2.0$ ۱۱۴

شکل (۳-۲): موقعیت ماکزیمم سرعت محوری نسبت به مرکز مقطع کانال ($\zeta=r-R$) بر حسب نسبت انحنا و در نسبت های انحنای مختلف ۱۱۵

شکل (۳-۳): نسبت مقاومت جریان بر حسب نسبت انحنا و در نسبت های ابعادی مختلف [۱۲۵] ۱۱۹
شکل (۳-۴): پارامتر Γ بر حسب نسبت ابعادی در $\delta < 0.2$ ۱۱۹
شکل (۳-۵): توزیع سرعت در نیمی از مقطع کانال در $\mathrm{Re} = 0.01,\ \kappa = 0.25,\ \delta = 0.5$ ۱۲۱
شکل (۳-۶): توزیع تابع جریانهای ثانویه (نیمه بالایی مقطع کانال با جهت چرخش پادساعتگرد) و سرعت محوری (نیمه پایینی مقطع کانال) جریان سیال مرتبه دو در اعداد وایزنبرگ مختلف ($\mathrm{Re} = 50$ و $\delta = 0.1$) [۱۲۷] ۱۳۱
شکل (۳-۷): اثر عدد وایزنبرگ بر ماکزیمم سرعت محوری جریان سیال مرتبه دو در اعداد رینولدز مختلف و $\delta = 0.1$ [۱۲۷] ۱۳۳
شکل (۳-۸): اثر عدد وایزنبرگ بر ماکزیمم شدت جریانهای ثانویه جریان سیال مرتبه دو در اعداد رینولدز مختلف و $\delta = 0.1$ [۱۲۷] ۱۳۳
شکل (۳-۹): اثر عدد وایزنبرگ بر موقعیت ماکزیمم سرعت محوری در $\delta = 0.1$ [۱۲۷] ۱۳۴
شکل (۳-۱۰): اثر عدد وایزنبرگ بر موقعیت مرکز گردابه ها در $\delta = 0.1$ [۱۲۷] ۱۳۵
شکل (۳-۱۱): نسبت دبی جریان سیالات نیوتنی، مرتبه دو (SOF) و فوق همرفتی ماکسول (UCM) نسبت به عدد رینولدز و در اعداد وایزنبرگ مختلف [۱۲۷] ۱۳۹
شکل (۳-۱۲): تغییرات نسبت دبی جریان سیالات نیوتنی، مرتبه دو (SOF) و فوق همرفتی ماکسول (UCM) نسبت به عدد رینولدز و در اعداد وایزنبرگ مختلف ۱۳۹
شکل (۳-۱۳): توزیع تنش نرمال محوری (τ_{ss}) و مولفه های تنش τ_{rs} و $\tau_{\varphi s}$ در $\mathrm{Re} = 50$ و $\delta = 0.1$ [۱۲۷] ۱۴۰
شکل (۳-۱۴): کانتورهای توزیع دمای جریان سیال نیوتنی در $\mathrm{Pr} = 0.85$ ۱۵۱
شکل (۳-۱۵): عدد ناسلت نسبی و موقعیت مینیمم دما بر حسب عدد وایزنبرگ در $\mathrm{Re}=25,\ \mathrm{Pr}=0.85$ $\eta_p / \eta = 0.2,\ \delta = 0.1$ ۱۵۳
شکل (۳-۱۶): کانتورهای توزیع دمای جریان سیال اولدروید-بی در $\mathrm{Re} = 30,\ \mathrm{Pr} = 0.85$ و $\delta = 0.2$ ۱۵۵
شکل (۳-۱۷): دیاگرام های عدد ناسلت نسبی و موقعیت مینیمم مقدار توزیع دمای جریان سیال اولدروید-بی بر حسب عدد رینولدز در اعداد وایزنبرگ مختلف و در $\mathrm{Pr} = 0.85$ و $\eta_p / \eta = 0.2$ ۱۵۶
شکل (۳-۱۸): دیاگرام های عدد ناسلت نسبی و موقعیت مینیمم مقدار توزیع دمای جریان سیال اولدروید-بی بر حسب عدد رینولدز در نسبتهای ویسکوزیته مختلف و در $\mathrm{Pr} = 0.85$ و $We = 2$ ۱۵۸
شکل (۳-۱۹): دیاگرام های عدد ناسلت نسبی و موقعیت مینیمم مقدار توزیع دمای جریان سیال اولدروید-بی بر حسب عدد رینولدز در اعداد پرانتل مختلف و در $\eta_p / \eta = 0.2$ و $We = 2$ ۱۵۹
شکل (۴-۱): شبکه محاسباتی مورد استفاده و نحوه تخصیص پارمترهای جریان در تحقیق حاضر [۱۲۵] ۱۶۴

شکل (۵-۱): نمونه هایی از تاریخچه همگرایی ۱۸۶
شکل (۵-۲): توزیع سرعت محوری در عدد دین ۱۲۵ بر مبنای متوسط سرعت محوری ۱۹۱
شکل (۵-۳): جریانهای ثانویه سیال نیوتنی در اعداد دین مختلف ۱۹۱
شکل (۵-۴): خطوط جریانهای ثانویه در نسبت های ابعادی و اختلاف تنش های نرمال مختلف ۱۹۳
شکل (۵-۵): گردابه های جریان سیال مرتبه دو در کانال مستقیم در حالت $\mathrm{Re}=10$ و $\Psi_2/\Psi_1=-10\%$ ۱۹۵
شکل (۵-۶): گردابه های جریان سیال CEF در یک چهارم مقطع کانال مستقیم در نسبت های ابعادی مختلف ۱۹۶
شکل (۵-۷): گردابه های جریان سیال مرتبه دو در یک چهارم مقطع کانال مستقیم در نسبت های ابعادی مختلف و در $\mathrm{Re}=10,\ \Psi_1=0.1,\ \Psi_2/\Psi_1=-10\%$ ۱۹۷
شکل (۵-۸): جریانهای ثانویه در $Dn_b=125$ برای حل عددی در نیمی از سطح مقطع با استفاده از شرط مرزی تقارن و حل عددی در کل سطح مقطع ۲۰۰
شکل (۵-۹): نسبت ماکزیمم سرعت جریانهای ثانویه به سرعت بالک در نسبتهای انحنای مختلف جریان خزشی [۱۲۵] ۲۰۲
شکل (۵-۱۰): توزیع سرعت محوری، فشار استاتیکی، تنش نرمال محوری و Γ برای جریان خزشی [۱۲۵] ۲۰۵
شکل (۵-۱۱): جریانهای ثانویه در جریان خزشی سیالات مختلف در $\mathrm{Re}=0.002$ و $\delta=0.3$ [۱۲۵] ۲۰۷
شکل (۵-۱۲): خطوط جریانهای ثانویه برای جریان خزشی در $\delta=0.5$، $\Psi_2=0$، $\kappa=1.5$ و در مقادیر مختلف اختلاف تنش نرمال اول ۲۰۹
شکل (۵-۱۳): خطوط جریانهای ثانویه برای جریان خزشی در $\kappa=1,\Psi_2=0,\delta=0.5$ و در مقادیر مختلف Ψ_1 ۲۱۱
شکل (۵-۱۴): خطوط جریانهای ثانویه برای جریان خزشی در $\kappa=0.5,\Psi_2=0,\delta=0.5$ و در مقادیر مختلف Ψ_1 ۲۱۱
شکل (۵-۱۵): خطوط جریانهای ثانویه برای جریان خزشی در $\kappa=0.125,\Psi_2=0,\delta=0.5$ و در مقادیر مختلف Ψ_1 ۲۱۲
شکل (۵-۱۶): خطوط جریانهای ثانویه برای جریان خزشی در $\kappa=0.125,\Psi_1=2,\delta=0.5$ و در مقادیر مختلف Ψ_2 ۲۱۳
شکل (۵-۱۷): توزیع سرعت محوری، فشار استاتیکی، تنش نرمال محوری و خطوط جریانهای ثانویه در جریان سیال نیوتنی در حالت $\mathrm{Re}=200$، $\delta=0.15$ ۲۱۵
شکل (۵-۱۸): توزیع سرعت محوری، فشار استاتیکی، تنش نرمال محوری و خطوط جریانهای ثانویه در جریان سیال تعمیم یافته نیوتنی در حالت $\mathrm{Re}=20$، $\kappa=0.125$ و $\delta=0.15$ ۲۱۷

شکل (۵-۱۹): توزیع دمای جریان نیوتنی در مقاطع مختلف برای حالت شار ثابت و در شرایط $\mathrm{Re}=50$، $\kappa=1$ و $\delta=0.15$ ۲۱۹

شکل (۵-۲۰): توزیع دمای جریان نیوتنی در مقاطع مختلف برای حالت دما ثابت و در شرایط $\mathrm{Re}=50$، $\kappa=1$ و $\delta=0.15$ ۲۱۹

شکل (۵-۲۱): توزیع دمای متوسط بی بعد برای حالات شار ثابت و دما ثابت در شرایط $\mathrm{Re}=50$، $\kappa=1$ و $\delta=0.15$ ۲۲۰

شکل (۵-۲۲): توزیع عدد ناسلت متوسط برای حالات شار ثابت و دما ثابت در شرایط $\mathrm{Re}=50$، $\kappa=1$ و $\delta=0.15$ ۲۲۰

شکل (۵-۲۳): اثر ثابت اختلاف تنش نرمال اول بر ماکزیمم سرعت جریانهای ثانویه و نسبت مقاومت کانال خمیده ۲۲۳

شکل (۵-۲۴): اثر ثابت اختلاف تنش نرمال دوم بر ماکزیمم سرعت جریانهای ثانویه ۲۲۵

شکل (۵-۲۵): توزیع سرعت محوری، فشار، تنش نرمال محوری و پارامتر Γ در $\mathrm{Re}=50$، $\kappa=1$ و $\delta=0.15$ [۱۲۵] ۲۲۷

شکل (۵-۲۶): توزیع سرعت محوری، فشار و ویسکوزیته در $\mathrm{Re}=20$، $\kappa=1$ و $\delta=0.15$ ۲۳۱

شکل (۵-۲۷): کانتور های مولفه های تنش در $\mathrm{Re}=20$، $\kappa=1$ و $\delta=0.15$ ۲۳۲

شکل (۵-۲۸): خطوط جریانهای ثانویه، توزیع سرعت محوری و فشار جریان اینرسی نیوتنی در $\delta=0.15$ [۱۲۵] ۲۳۵

شکل (۵-۲۹): توزیع سرعت محوری سیال نیوتنی (v_θ/U) در اعداد رینولدز مختلف و در $\delta=0.15$ ۲۳۶

شکل (۵-۳۰): خطوط جریانهای ثانویه برای جریان اینرسی سیال نیوتنی در $\delta=0.15$ و $\kappa=0.125$ ۲۳۷

شکل (۵-۳۱): توزیع سرعت محوری (v_θ/U) برای جریان اینرسی سیال نیوتنی در $\delta=0.15$ و $\kappa=0.125$ ۲۳۸

شکل (۵-۳۲): خطوط جریانهای ثانویه برای جریان اینرسی سیال نیوتنی در $\delta=0.15$ و $\kappa=2$ ۲۳۹

شکل (۵-۳۳): خطوط جریان ثانویه سیال CEF بر حسب مقادیر مختلف Ψ_1 در $Dn_b=125$ و $\Psi_2=0$ ۲۴۰

شکل (۵-۳۴): خطوط جریان ثانویه سیال مرتبه دو بر حسب مقادیر مختلف Ψ_2 در $Dn_b=125$ و $\Psi_1=0.6$ [۱۲۵] ۲۴۲

شکل (۵-۳۵): اثر اختلاف تنش نرمال اول بر جریانهای ثانویه سیال CEF در $\mathrm{Re}=29$، $\delta=0.15$، $\kappa=1$ و $\chi=0.0$ ۲۴۳

شکل (۵-۳۶): اثر اختلاف تنش نرمال دوم بر جریانهای ثانویه سیال CEF در $\mathrm{Re}=29$، $\delta=0.15$، $\kappa=1$ و $We=0.005$ ۲۴۳