



۱۰۱۳۳۶

۱۷/۱/۱۰۱۶۹۹  
۱۷/۱۰/۲۱

دانشکده فنی

گروه مکانیک

(گرایش تبدیل انرژی)

مطالعه عددی جریان مگنوهیدرودینامیک و انتقال حرارت یک سیال مدل هرشل - بالکلی در لوله  
(با شرایط مرزی حرارتی متفاوت)

دفتر انتشارات و کتب فنی  
توسعه و چاپ

از:

موسی حیدرنتاج بانی

اساتید راهنما:

دکتر کورش جواهرده

دکتر محمد نقاش زادگان

استاد مشاور:

مهندس محمد اسماعیل محسنی

۱۳۸۷ / ۱۰ / ۲۱



تیرماه ۱۳۸۷

۱۰۸۳۳۴

تقدیم به پدر و مادر گرامی، خانواده عزیز و همسر مهربان و صبورم که با مهربانی شان

همواره، مشوق من بودند.

برخود لازم می‌دانم تا از زحمات استاد ارجمند جناب آقای دکتر کوروش جواهرده بدلیل زحمات بی دریغ ایشان که در به اتمام رساندن این رساله مرا صمیمانه یاری داده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

تشکر ویژه دارم از اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر محمد نقاش‌زادگان و جناب آقای مهندس محمد اسماعیل محسنی که از راهنمایی‌های ایشان بهره‌های فراوان بردم.

همچنین از اساتید و دوستان گرامی:

جناب آقای دکتر حسین احمدی کیا، جناب آقای مهندس اسحاق یزدان‌شناس و جناب آقای مهندس مبین خاکباز و سرکار خانم جعفرتبار، که در این راه کمک‌های ارزنده‌ای به اینجانب نموده‌اند، خالصانه متشکرم.

## فهرست

صفحه	عنوان
ز	چکیده فارسی
ژ	چکیده انگلیسی
۱	فصل اول- مقدمه .....
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- مروری بر مقالات و کارهای انجام شده
۶	فصل دوم- آشنایی با جریان مگنتوهیدرودینامیک سیالات غیرنیوتنی و .....
۷	۱-۲- بررسی جریان مگنتوهیدرودینامیک
۷	۱-۱-۲- تاریخچه و ماهیت مگنتوهیدرودینامیک
۱۱	۲-۱-۲- انتقال حرارت در سیستم‌های مگنتوهیدرودینامیک
۱۲	۲-۲- معرفی سیالات غیرنیوتنی و روابط رئولوژیکی حاکم بر آنها
۱۲	۱-۲-۲- سیال نیوتنی
۱۳	۲-۲-۲- سیالات غیر نیوتنی
۱۴	۱-۲-۲-۲- تقسیم بندی سیالات غیر نیوتنی
۲۳	فصل سوم- مدل سازی، معادلات حاکم و حل عددی .....
۲۴	۱-۳- تشریح مساله
۲۴	۲-۳- فیزیک مساله
۲۵	۳-۳- شبکه اعمال شده
۲۵	۴-۳- معادلات حاکم
۲۶	۱-۴-۳- محاسبه نیروی مغناطیسی و اتلاف ژول
۲۷	۲-۴-۳- شبیه سازی سیال غیر نیوتنی با نیوتنی
۲۸	۵-۳- حل معادلات حاکم
۲۸	۱-۵-۳- حل عددی میدان جریان (سرعت و فشار) با الگوریتم سیمپل
۲۸	۱-۱-۵-۳- منفصل سازی معادلات حاکم بر جریان و الگوریتم حل
۳۲	۱-۱-۱-۵-۳- شکل نهایی معادله انفصال
۳۴	۲-۱-۱-۵-۳- معادلات مقدار حرکت

۳۶	۳-۵-۱-۱-۳- تصحیح فشار و سرعت
۳۷	۳-۵-۱-۴- معادله تصحیح فشار و الگوریتم سیمپل
۴۰	۳-۶- حل معادلات جبری انفصالی
۴۱	۳-۷- موارد مهم در اجرای برنامه
۴۱	۳-۷-۱- شرایط مرزی سرعت
۴۲	۳-۷-۲- شرایط مرزی برای معادله تصحیح فشار
۴۳	۳-۷-۳- شرایط مرزی حرارتی
۴۳	۳-۷-۴- مقادیر ورودی به برنامه
۴۴	۳-۷-۵- مقدار حد همگرایی
۴۴	۳-۸- محاسبه ضریب اصطکاک و عدد نوسلت
۴۷	فصل چهارم- ارائه نتایج و بحث در آن.....
۴۸	۴-۱- مقدمه
۴۸	۴-۲- شبکه بندی مساله
۵۲	۴-۳- ارزیابی هیدرودینامیکی مساله
۷۳	۴-۴- ارزیابی گرمایی مساله
۷۳	۴-۴-۱- ارزیابی گرمایی با شرایط مرزی حرارتی دما ثابت (دیریشله)
۸۷	۴-۴-۲- ارزیابی گرمایی با شرایط مرزی حرارتی شار ثابت (نیومن)
۹۹	۴-۵- نتیجه گیری نهایی
۱۰۰	۴-۶- پیشنهادات
۱۰۱	منابع و مراجع

## فهرست شکلها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۲- افتادن یک ورق از فلز هادی در شکاف یک مغناطیس
۹	شکل ۲-۲- حالت ساده از پمپ الکترومغناطیس
۱۲	شکل ۳-۲- حرکت برشی آرام بین دو صفحه موازی برای سیال نیوتنی در حالت پایدار
۱۳	شکل ۴-۲- منحنی جریان سیال نیوتنی
۱۵	شکل ۵-۲- منحنی جریان سیالات مستقل از زمان
۱۶	شکل ۶-۲- پروفیل سرعت برای سیال دارای تنش تسلیم اولیه
۱۸	شکل ۷-۲- تغییرات ویسکوزیته- شدت برش سیالات غیر نیوتنی فاقد تنش تسلیم
۱۹	شکل ۸-۲- منحنی لگاریتمی جریان سیال شبه پلاستیک
۲۱	شکل ۹-۲- نمودار تغییرات ویسکوزیته نسبت به زمان سیال وابسته به زمان
۲۲	شکل ۱۰-۲- منحنی‌های جریان سیالات غیرنیوتنی تابع زمان در آزمایشات منفرد پایدار
۲۴	شکل ۱-۳- جریان سیال در لوله با تقارن محوری تحت میدان مغناطیسی
۲۵	شکل ۲-۳- نمایش شماتیک توزیع غیرهمسان سلول‌های شبکه
۳۱	شکل ۳-۳- نمایش حجم کنترل برای حالت دو بعدی
۳۵	شکل ۴-۳- نمایش حجم کنترل برای U
۳۵	شکل ۵-۳- نمایش حجم کنترل برای V
۳۷	شکل ۶-۳- نمایش حجم کنترل برای معادله پیوستگی
۴۱	شکل ۷-۳- نمایش روش خط به خط
۴۲	شکل ۸-۳- حجم کنترلی مرزی برای معادله پیوستگی
۴۹	شکل ۱-۴- شبکه بندی حالت اول
۴۹	شکل ۲-۴- شبکه بندی حالت دوم
۵۰	شکل ۳-۴- شبکه بندی حالت سوم
۵۰	شکل ۴-۴- نمودار تغییرات عدد نوسلت در طول لوله
۵۰	شکل ۵-۴- نمودار افت فشار در طول لوله
۵۱	شکل ۶-۴- نمودار افت فشار در طول لوله
۵۱	شکل ۷-۴- نمودار تغییرات عدد نوسلت محلی در طول لوله
۵۳	شکل ۸-۴- نمودار حاصلضرب اصطکاک در رینولدز بر حسب عدد هارتمن

- شکل ۴-۹- نمودار حاصلضرب اصطکاک در رینولدز بر حسب  $n$  ۵۴
- شکل ۴-۱۰- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای عدد هارتمن مختلف برای  $\tau_D = 0$  ۵۷
- شکل ۴-۱۱- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای  $n$  های مختلف برای  $\tau_D = 0$  ۵۸
- شکل ۴-۱۲- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای عدد هارتمن مختلف برای  $\tau_D = 0.2$  ۵۹
- شکل ۴-۱۳- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای  $n$  های مختلف برای  $\tau_D = 0.2$  ۶۰
- شکل ۴-۱۴- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای عدد هارتمن مختلف برای  $\tau_D = 0.4$  ۶۰
- شکل ۴-۱۵- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای  $n$  های مختلف برای  $\tau_D = 0.4$  ۶۲
- شکل ۴-۱۶- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای تنش تسلیم مختلف ۶۳
- شکل ۴-۱۷- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای هارتمن های مختلف ۶۴
- شکل ۴-۱۸- نمودار سرعت بر حسب شعاع لوله به ازای  $n$  های مختلف ۶۵
- شکل ۴-۱۹- نمودار سرعت ماکزیمم بر حسب عدد هارتمن ۶۶
- شکل ۴-۲۰- کانتور سرعت برای  $Re=50$  ،  $n=0.5$  ،  $Ha=0$  ،  $\tau_D = 0$  ۶۷
- شکل ۴-۲۱- کانتور سرعت برای  $Re=50$  ،  $n=0.5$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0$  ۶۷
- شکل ۴-۲۲- کانتور سرعت برای  $Re=50$  ،  $n=1$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0$  ۶۸
- شکل ۴-۲۳- کانتور سرعت برای  $Re=50$  ،  $n=1.5$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0$  ۶۸
- شکل ۴-۲۴- کانتور سرعت برای  $Re=50$  ،  $n=0.5$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0.2$  ۶۹
- شکل ۴-۲۵- کانتور سرعت برای  $Re=50$  ،  $n=0.5$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0.4$  ۶۹
- شکل ۴-۲۶- منحنی پروفیل سرعت در مقاطع مختلف برای سیال نیوتنی ( $Re=50$  ،  $n=1$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0$ ) ۷۰
- شکل ۴-۲۷- منحنی پروفیل سرعت در مقاطع مختلف برای مدل پاورلا ( $Re=50$  ،  $n=0.5$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0$ ) ۷۰
- شکل ۴-۲۸- منحنی پروفیل سرعت در مقاطع مختلف برای مدل بینگهام پلاستیک ( $Re=50$  ،  $n=1$  ،  $Ha=0$  ،  $\tau_D = 0.4$ ) ۷۱
- شکل ۴-۲۹- منحنی پروفیل سرعت در مقاطع مختلف برای مدل بینگهام پلاستیک ( $Re=50$  ،  $n=1$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0.4$ ) ۷۱
- شکل ۴-۳۰- منحنی پروفیل سرعت در مقاطع مختلف برای مدل هرشل-بالکلی ( $Re=50$  ،  $n=1.5$  ،  $Ha=0$  ،  $\tau_D = 0.2$ ) ۷۱
- شکل ۴-۳۱- منحنی پروفیل سرعت در مقاطع مختلف برای مدل هرشل-بالکلی ( $Re=50$  ،  $n=1.5$  ،  $Ha=0$  ،  $\tau_D = 0.4$ ) ۷۲
- شکل ۴-۳۲- منحنی پروفیل سرعت در مقاطع مختلف برای مدل هرشل-بالکلی ( $Re=50$  ،  $n=0.5$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0.2$ ) ۷۲
- شکل ۴-۳۳- منحنی پروفیل سرعت در مقاطع مختلف برای مدل هرشل-بالکلی ( $Re=50$  ،  $n=0.5$  ،  $Ha=9$  ،  $\tau_D = 0.4$ ) ۷۲
- شکل ۴-۳۴- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)  $\tau_D = 0$  به ازای هارتمن های مختلف برای ۷۴
- شکل ۴-۳۵- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت) به ازای تنش تسلیم های مختلف برای ( $Re=10$  ،  $Pr=3000$  ،  $n=0.5$ ) ۷۵



- ۷۵ شکل ۴-۳۶- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $n=1, Pr=3000, Re=10$ )
- ۷۷ شکل ۴-۳۷- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $\tau_D = 0, Pr=3000, Re=10$ )
- ۷۸ شکل ۴-۳۸- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $\tau_D = 0.2, Pr=3000, Re=10$ )
- ۷۹ شکل ۴-۳۹- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $\tau_D = 0.4, Pr=3000, Re=10$ )
- ۸۱ شکل ۴-۴۰- نمودار تغییرات نوسلت محلی در راستای طول لوله (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت) برای  $Re=10, Pr=3000$  و  $\tau_D = 0$
- ۸۲ شکل ۴-۴۱- نمودار تغییرات نوسلت محلی در راستای طول لوله (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)، برای  $Re=30, Pr=6000$
- ۸۳ شکل ۴-۴۲- کانطور دما (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)، برای  $Ha=9$  و  $Br=0, n=0.5, Re=30, Pr=3000$
- ۸۳ شکل ۴-۴۳- کانطور دما (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)، برای  $Ha=9$  و  $Br=1, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۸۴ شکل ۴-۴۴- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)  $\tau_D = 0, Ha=9, Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۸۵ شکل ۴-۴۵- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)  $\tau_D = 0, Ha=9, Br=1, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۸۵ شکل ۴-۴۶- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)  $\tau_D = 0, Ha=0, Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۸۶ شکل ۴-۴۷- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)  $\tau_D = 0.2, Ha=9, Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۸۶ شکل ۴-۴۸- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی دما ثابت)  $\tau_D = 0.4, Ha=9, Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۸۸ شکل ۴-۴۹- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت) به ازای هارتمن‌های مختلف برای  $\tau_D = 0$
- ۸۹ شکل ۴-۵۰- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $n=0.5, Pr=3000, Re=10$ )
- ۸۹ شکل ۴-۵۱- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $n=1, Pr=3000, Re=10$ )
- ۹۰ شکل ۴-۵۲- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $\tau_D = 0, Pr=3000, Re=10$ )
- ۹۱ شکل ۴-۵۳- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $\tau_D = 0.2, Pr=3000, Re=10$ )

- ۹۲ شکل ۴-۵۴- نمودار تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد هارتمن (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت) به ازای تنش تسلیم‌های مختلف برای ( $\tau_D = 0.4, Pr=3000, Re=10$ )
- ۹۳ شکل ۴-۵۵- نمودار تغییرات نوسلت محلی در راستای طول لوله (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)، برای  $\tau_D = 0$  و  $Re=10, Pr=3000$
- ۹۴ شکل ۴-۵۶- نمودار تغییرات نوسلت محلی در راستای طول لوله (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)، برای  $Ha=6$  و  $Re=30, Pr=6000$
- ۹۵ شکل ۴-۵۷- کانتور دما (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)، برای  $Ha=9$  و  $Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۹۵ شکل ۴-۵۸- کانتور دما (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)، برای  $Ha=9$  و  $Br=1, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۹۶ شکل ۴-۵۹- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)  $\tau_D = 0, Ha=9, Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۹۷ شکل ۴-۶۰- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)  $\tau_D = 0, Ha=9, Br=1, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۹۷ شکل ۴-۶۱- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)  $\tau_D = 0, Ha=0, Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۹۸ شکل ۴-۶۲- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)  $\tau_D = 0.2, Ha=9, Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$
- ۹۸ شکل ۴-۶۳- منحنی دما در مقاطع مختلف (شرایط مرزی حرارتی شار ثابت)  $\tau_D = 0.4, Ha=9, Br=0, n=0.5, Re=10, Pr=3000$

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۷	جدول ۱-۲- جدول معادلات رئولوژیکی پیشنهاد شده برای سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان
۳۳	جدول ۱-۳- تابع $A(P)$ برای طرح‌های مختلف
۵۵	جدول ۱-۴- مقایسه حاصلضرب ضریب اصطکاک در رینولدز در قسمت توسعه یافته
۵۵	جدول ۲-۴- مقایسه سرعت ماکزیمم در قسمت توسعه یافته
۷۳	جدول ۳-۴- مقدار عدد نوسلت محلی در حالت توسعه یافته برای سیال نیوتنی

فهرست علائم

	<u>علائم انگلیسی</u>
عدد برینکمن	Br
قدرت میدان مغناطیسی	$\vec{B}_0$
چشمه جرم تعریف شده در رابطه (۳-۹۹)	b
ظرفیت گرمایی ویژه سیال	C <sub>p</sub>
قطر لوله	d
قطر بی بعد لوله	D
کنداکتانس پخش	D <sub>e</sub>
میدان الکتریکی القایی	E
نیروی مغناطیسی	$\vec{F}_m$
ضریب اصطکاک	f
عدد هارتمن	Ha
شدت میدان مغناطیسی	H
چگالی جریان	$\vec{j}$
شدت جریان هدایت	$\vec{j}_c$
شارهای کلی	J <sub>Z</sub>
شارهای کلی	J <sub>R</sub>
طول لوله	l
طول بی بعد لوله	L
شاخص پایداری	m
شاخص جریان	n
عدد نوسلت محلی	Nu <sub>D</sub>
عدد نوسلت متوسط	Nu <sub>m</sub>
فشار سیال	p
عدد پکلت	P <sub>e</sub>
فشار حدسی	P*
تصحیح فشار	p <sup>C</sup>
عدد پراتل	Pr
گرمای متوسط	$\bar{q}_w$
عدد رینولدز	Re
عدد رینولدز مغناطیسی	Re <sub>m</sub>
مختصات استوانه ای	r,z
مختصات استوانه ای بی بعد	R,Z
جمله چشمه	S
دمای سیال	T
دمای مرجع سیال	T <sub>0</sub>

دماهای دیواره	$T_w$
سرعت سیال در راستای Z	$u$
سرعت جریان آزاد	$u_0$
سرعت بی بعد سیال در راستای Z	$U$
سرعت ستاره دار	$U^*$
تصحیحات سرعت	$U^C$
سرعت سیال در راستای r	$v$
سرعت سیال در راستای R	$V$
سرعت ستاره دار	$V^*$
تصحیحات سرعت	$V^C$

### علائم یونانی

ضریب هدایت الکتریکی	$\sigma$
زیر تخفیف برای سرعت u	$\alpha_u$
زیر تخفیف برای سرعت v	$\alpha_v$
زیر تخفیف برای فشار	$\alpha_p$
تنش آستانه حرکت	$\tau_y$
تنش تسلیم اولیه بدون بعد	$\tau_D$
تنش اعمالی به سیال	$\tau$
ویسکوزیته	$\mu$
ویسکوزیته سیال در شدت برش خیلی زیاد	$\mu_\infty$
ویسکوزیته سیال در شدت برش صفر	$\mu_0$
نفوذپذیری مغناطیسی	$\mu_0$
ویسکوزیته مرجع	$\mu_r$
اتلاف ویسکوزیته	$\Phi'$
اتلاف ژول	$\Phi''$
چگالی جریان آزاد	$\rho_0$
چگالی	$\rho$
دمای بی بعد	$\theta$
دمای بی بعد متوسط	$\theta_m$
دمای بی بعد دیواره	$\theta_w$
متغیر کلی	$\Phi$
ضریب پخش	$\Gamma$
نرخ برش	$\dot{\gamma}$

مطالعه عددی جریان مگنوهیدرودینامیک و انتقال حرارت یک سیال مدل هرشل-بالکلی در لوله (با شرایط مرزی حرارتی متفاوت)

موسی حیدرنتاج بائی

تعدادی از سیالات مهم مورد استفاده در صنعت از قبیل پلاستیک‌های گداخته شده، پلیمرها، جسم خمیر مانند و غذاها، رفتار سیال غیر نیوتنی از خود نشان می‌دهند. به دلیل رشد و تعدد استفاده از سیالات غیر نیوتنی در صنایع مختلف، تلاش زیادی در جهت شناخت ویژگی‌های رفتاری این سیالات به عمل آمده است. مسائل مرتبط با سیال غیر نیوتنی و انتقال حرارت آن در حضور میدان مغناطیسی، موضوعی بسیار جالب بوده و کاربردهای زیادی در علوم مهندسی دارد.

در پروژه حاضر، یک جریان آرام، پایا، برای یک سیال غیر نیوتنی (مدل هرشل-بالکلی)، هادی الکتریسیته و غیر قابل تراکم، با حضور یک میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی در لوله دو بعدی همراه با انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحلیل، معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی با روش حجم محدود و با بکارگیری الگوریتم سیمپل حل شده است. جمله جابجایی در این معادلات با استفاده از طرح قاعده توانی، منفصل گردید. برای بررسی جامع تر دو شرط مرزی حرارتی شار ثابت و دما ثابت روی دیواره بررسی شده و جملات اتلاف ویسکوزیته و ژول نیز در معادله انرژی، در نظر گرفته شد. یک حل عددی بر روی معادلات حاکم انجام شده که تأثیرات میدان مغناطیسی، شاخص رفتار جریان ( $n$ ) و تنش تسلیم اولیه، بر روی سرعت، ضریب اصطکاک و عدد نوسلت مورد بررسی قرار گرفته شد. همچنین اثرات جملات اتلاف بر روی عدد نوسلت نیز، مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که وجود نیروی مغناطیسی، به ازای تمامی مقادیر  $n$  و تنش تسلیم اولیه، سبب تضعیف جریان می‌گردد. همچنین نتایج عددی حاکی از آن است که افزایش عدد هارتمن و تنش تسلیم اولیه، سبب کاهش ماکزیمم سرعت سیال و افزایش ضریب اصطکاک می‌گردد. زمانی که عدد برینکمن برابر با صفر باشد، افزایش عدد هارتمن و تنش تسلیم اولیه سبب افزایش عدد نوسلت می‌گردد. همچنین افزایش  $n$ ، باعث افزایش سرعت ماکزیمم و ضریب اصطکاک می‌گردد. زمانی که عدد برینکمن برابر با صفر باشد، افزایش  $n$ ، سبب کاهش عدد نوسلت می‌گردد. افزایش در عدد برینکمن باعث کاهش در عدد نوسلت به ازای تمامی مقادیر عدد هارتمن،  $n$  و تنش تسلیم اولیه می‌گردد.

## Abstract

Numerical study of MHD flow and heat transfer of a Herschel-Bulkley fluid in pipe  
(With different thermal boundary conditions)

Musa Heidarnataj Bae

A number of industrially important fluids such as molten plastics, polymers, pulps and foods exhibit non-Newtonian fluid behavior. Due to the growing use of these non-Newtonian materials, in various manufacturing and processing industries, considerable efforts have been directed towards understanding their flow characteristics. The problems of non-Newtonian fluids flow and heat transfer in the presence of an external magnetic field is of great interest in many engineering applications.

In this project, the heat transfer of incompressible, electrically conducting, Herschel-Bulkley non-Newtonian fluids through two-dimensional circular pipes in the presence of an external uniform magnetic field steady laminar flow is considered. In this analysis, the continuity, momentum and energy equations are solved by using a finite volume method and SIMPLE algorithm in which convection terms applied by using the power-law scheme. Two cases of the thermal boundary, constant temperature and constant heat flux at the wall, are considered. The viscous and Joule dissipations are taken into consideration in the energy equation. A numerical solution for the governing partial differential equations is developed and the influence of the magnetic field, flow behavior index ( $n$ ) and initial yielding stress on the velocity distribution, the friction factor and the Nusselt numbers are discussed. Also the influence of the viscous and Joule dissipations on the Nusselt numbers is investigated.

The results show that the magnetic field has a damping effect on the flow for all values of  $n$  and initial yielding stress. Increasing "Hartmann number" and initial yielding stress decrease maximum fluid velocity and increase friction factor, but when Brinkman number is equal zero, the Nusselt number is increased. Increasing  $n$  increases maximum fluid velocity and friction factor, when Brinkman number is equal zero, the Nusselt number is decreased.

The increment in the Brinkman number decreases the value of Nusselt number for all Hartmann number,  $n$  and initial yielding stress.

**Keywords:** Numerical solution, MHD flow, Heat transfer, Herschel-Bulkley fluid

---

# فصل اوّل

مقدمه



در علم مکانیک سیالات دو نگرش تئوریک و تجربی وجود دارد که به بررسی رفتار دینامیکی سیال می‌پردازد. در نگرش تئوریک، علم هیدرودینامیک داریم که با معادلات حرکت اویلر در مورد یک سیال ایده‌آل فرضی شروع شده و تا حد قابل توجهی در اواخر قرن نوزدهم پیشرفت نمود بطوریکه در مواردی جوابگوی موضوعات مکانیک سیالات بود. ولی در عرصه علم هیدرولیک که متکی بر تجربیات آزمایشگاهی می‌باشد، علم کلاسیک هیدرودینامیک در تعارض با نتایج تجربی بوده بطوریکه با رشد تکنولوژی دیگر معادلات حرکت اویلر جوابگوی مسائل علمی در زمینه سیالات نبود. بدیهی است که علت اختلاف بین نتایج هیدرودینامیک کلاسیک و علم هیدرولیک مبتنی بر تجربه، صرف نظر کردن از اصطکاک سیال می‌باشد. با ارائه معادلات حرکت سیالات با اصطکاک (معادلات ناویر-استوکس) راه حل حرکت سیالات توأم با اصطکاک با استفاده از علوم ریاضی و روش‌های عددی ارائه شده، هموار شده است. حل معادلات حاکم در مکانیک سیالات یکی از مطرح‌ترین مسائل در علوم مهندسی است. در اغلب موارد فرمولبندی قوانین پایه مکانیک سیالات به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی<sup>1</sup> در می‌آید. بیشتر معادلات به صورت معادلات دیفرانسیل پاره‌ای مرتبه دوم ظاهر می‌شود و بنابراین در مکانیک سیالات و انتقال حرارت از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. عموماً، معادلات حاکم در مکانیک سیالات یک مجموعه معادلات پاره‌ای غیر خطی و وابسته را ایجاد می‌کنند که باید در یک قلمرو ناهموار با شرایط مرزی اولیه و مرزی مختلف حل شوند. در بیشتر موارد، حل تحلیلی معادلات مکانیک سیالات بسیار محدود است. با اعمال شرایط مرزی این محدودیت‌ها تنگتر می‌شود. مکانیک سیالات تجربی می‌تواند اطلاعات مورد نیاز یک میدان جریان خاص را فراهم کند. در هر حال به علت محدودیت‌های تجهیزاتی، مانند اندازه نمونه آزمایش و تجهیزات آزمایشگاهی و همچنین مشکلات ناشی از عدم تشابه کامل با میدان جریان واقعی، کسب اطلاعات آزمایشگاهی در بیشتر میدان‌های جریان غیر عملی است. به هر حال از نتایج آزمایشگاهی برای اثبات درستی حل معادلات ریاضی استفاده می‌شود. پس در طراحی، نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسباتی معادلات در کنار یکدیگر بکار می‌روند. روشی که در سال‌های اخیر رواج زیادی یافته، در واقع روش دینامیک سیالات عددی است. البته تحلیل عددی از گذشته‌های دور دراز مطرح بوده است. در هر حال پیشرفت‌های بدست آمده در امر ساخت کامپیوترها که سبب افزایش حافظه و کارایی شد، امکان حل معادلات مکانیک سیالات را با استفاده از روش‌های عددی مختلفی فراهم کرده است. بر خلاف مکانیک سیالات تجربی، شرایط جریان در ابعاد و اندازه‌های آن به راحتی قابل تغییرند تا اهداف طراحی مختلفی را بتوان برآورده کرد [1].

در طول سالیان اخیر، صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی برای رفع نیازهای بشر، توسعه روز افزونی یافته‌اند. در فرآیند تولید محصولات در این صنایع، عموماً با سیالات جدیدی سر و کار دارند که رفتار برشی آنها را با استفاده از روابط مربوط به سیالات نیوتنی نمی‌توان بررسی نمود. از طرفی شمار زیادی از سیالاتی که در صنعت کاربرد داشته و دارای مشخصه "برش

<sup>1</sup> Partial Differential Equation

رقیق<sup>۱</sup> و<sup>۲</sup> برش غلیظ<sup>۳</sup> می‌باشند، سیال پاورلا نامیده می‌شود. تعدادی از این سیالات معروف در صنعت از قبیل پلاستیک‌های گداخته شده، پلیمرها، جسم خمیر مانند و غذاها، رفتار سیال غیر نیوتنی از خود نشان می‌دهند [۲]

فرآیندهای انتقال حرارت در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی (بیوشیمیایی، صنایع غذایی، پلیمر و ...) وجود دارند. مسائل مربوط به جریان آرام و انتقال حرارت با جابجایی اجباری در یک کانال در طراحی مبدل‌های حرارتی، خنک کاری سیستم‌های الکترونیکی و غیره، اهمیت بسزایی دارد. از طرفی مبدل‌های حرارتی از تجهیزات اصلی انتقال حرارت می‌باشند و بهینه سازی در طراحی آنان از نظر افت فشار سیال و شدت انتقال گرما برای سیالات مختلفی که در آنها جاری هستند مورد توجه خاص علوم مهندسی می‌باشد. جریان آرام کاملاً توسعه یافته از جمله مسائلی است که راجع به آن تحقیق و بررسی زیادی انجام گرفته است. این جریان بخصوص در کانال‌هایی که دارای قطر هیدرولیکی کوچکی هستند، اتفاق می‌افتد. عدد رینولدز در این نوع کانال‌ها کوچک بوده و در نتیجه جریان بصورت آرام می‌باشد. انتقال حرارت جریان آرام به نوع سیال جاری در کانال، شکل هندسی کانال، سرعت جریان ورودی، پروفیل دمای جریان و شرایط مرزی حرارتی بستگی دارد.

در تکنولوژی جدید، تعدادی از موضوعات تخصصی شده در انتقال حرارت دارای اهمیت خاص هستند. از جمله این موضوعات، انتقال حرارت در سیستم مگنتوفلوئیددینامیک<sup>۳</sup> (MFD) یا تحت عنوان مگنتوهیدرودینامیک<sup>۴</sup> (MHD) می‌باشد.

بررسی جریان مگنتوفلوئیددینامیک<sup>۵</sup> در کانال‌ها به دو دلیل حائز اهمیت بسیار است [۳]:

- ۱- بدلیل کاربردهای رایج آن، از قبیل پمپ الکترو مگنتیک، جریان سنج<sup>۶</sup>، تولید کننده نیروی مگنتوفلوئیددینامیک
- ۲- مساله‌ای که با بکارگیری میدان مغناطیسی روی میدان جریان، مورد بررسی و تحلیل واقع شده باشد را می‌توان در آزمایشگاه نیز مشاهده نمود.

مسائل مرتبط با سیال غیر نیوتنی در کانال و انتقال حرارت آن در حضور میدان مغناطیسی کاربردهای زیادی در علوم مهندسی از جمله در صنایع هوا و فضا، توربو ماشین‌ها، پمپ‌های مگنتوهیدرودینامیک، مهندسی شیمی و پتروشیمی، تولید کننده‌های نیروی مگنتوهیدرودینامیک، مبدل‌های حرارتی، کابل‌های دفنی زیر زمینی، شتاب دهنده‌ها، جریان سنج‌ها، علم الکترونیک، علم شیمی، راکتورهای شیمیایی، راکتورهای هسته‌ای و سیستم‌های احتراق دارد [۲ و ۴ و ۵].

<sup>1</sup> Shear thinning

<sup>2</sup> Shear thickening

<sup>3</sup> MagnetoFluidDynamics

<sup>4</sup> MagnatoHydroDynamics

<sup>5</sup> Magneto-fluid-mechanic

<sup>6</sup> flowmeter

## ۲-۱- مروری بر مقالات و کارهای انجام شده

اولین مطالعه در مورد لوله دایره ای، توسط هاگن<sup>۱</sup> در سال ۱۸۳۹ و پوآزی<sup>۲</sup> در سال ۱۸۴۰، صورت گرفت [۶]. سپس جریان و انتقال حرارت برای سیال‌های غیر نیوتنی در لوله توسط هیچ<sup>۳</sup> مطالعه شد [۷]. وی تعریفی برای عدد استانتون بصورت تابعی از عدد رینولدز، پزانتل و اشمیت<sup>۴</sup> بدست آورد. جریان و انتقال حرارت سیال غیر نیوتنی سیال پاورلا در لوله حلقوی و سیال مدل هرشل-بالکلی در کانال مربعی، توسط سعید-احمد<sup>۵</sup>، مورد تحلیل عددی قرار داد [۹ و ۸]. در سال ۱۹۴۲، مهندس و فیزیکدان نجوم، آلفون<sup>۶</sup>، مقاله ای منتشر کرد که دلالت بر ظهور کامل MHD دارد. واژه "مگنتوهیدرودینامیک" توسط آلفون ایجاد شد وی توانست در سال ۱۹۷۰ جایزه نوبل را دریافت کند [۱۱ و ۱۰]. حل دقیق جریان مگنتوهیدرودینامیک در لوله برای سیال نیوتنی توسط هارتمن<sup>۷</sup> در سال ۱۹۳۷، شریف<sup>۸</sup> در سال ۱۹۵۳، گولد<sup>۹</sup> در سال ۱۹۶۲، کی آن و همکارش گو<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۸۷ انجام گرفت. بطوری که گولد از آنالیز فوریه و کی آن و همکارش از روش تابع گرین<sup>۱۱</sup>، برای حل استفاده کردند [۱۲]. یک حل دقیق بر روی جریان، برای همه اعداد هارتمن توسط تانازاوا<sup>۱۲</sup> در سال ۱۹۶۱، با در نظر گرفتن عایق الکتریکی جداره و همچنین توسط چانگ و همکارش لونژرن<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۶۱، با در نظر گرفتن رسانایی الکتریکی دیواره صورت گرفت [۱۳].

همچنین شریف در سال ۱۹۵۶، یک حل تقریبی برای عدد هارتمن بزرگ، در ابتدا با فرض عایق الکتریکی دیواره و به دنبال آن با فرض رسانایی الکتریکی ضعیف جداره، انجام داد و سپس، ای هارا و همکارانش تاجی ما و مات سوشی ما<sup>۱۴</sup> در سال ۱۹۶۷، حلی برای جداره نازک و هر نوع هدایت الکتریکی جداره بدست آوردند و سپس در حالت کلی تر، یک حل دقیق برای جریان در داخل لوله با ضخامت و رسانایی الکتریکی دلخواه جداره، توسط عبدالصمد<sup>۱۵</sup> در سال ۱۹۸۱، صورت پذیرفت [۱۳].

جریان مگنتوهیدرودینامیک در داخل کانال توسط رودیت و همکارش سس<sup>۱۶</sup> در سال ۱۹۶۲، همچنین توسط شویت و همکارانش اوسترل و یانگ<sup>۱۷</sup> در سال ۱۹۸۲، همچنین توسط فان و همکارش ایچ وانگ<sup>۱۸</sup> در سال ۱۹۶۳، و سیندر<sup>۱۹</sup> در سال ۱۹۶۵، بررسی شد [۱۴]. بررسی‌های آنها از سرعت ورودی یکنواخت تا سرعت توسعه یافته بنام سرعت هارتمن، بوده است.

<sup>1</sup> Hagen

<sup>2</sup> Poiseuille

<sup>3</sup> Hecht

<sup>4</sup> shmit

<sup>5</sup> M. E. sayed- Ahmad

<sup>6</sup> Alfvén

<sup>7</sup> Hartmann

<sup>8</sup> Shercliff

<sup>9</sup> Gold

<sup>10</sup> Qian and Gu

<sup>11</sup> Green function

<sup>12</sup> Tanazava

<sup>13</sup> Chang and Lundgren

<sup>14</sup> Ihara and Tajima and Matsushima

<sup>15</sup> Abdus samad

<sup>16</sup> Rodit and Cess

<sup>17</sup> Shohet and Osterle and Yong

<sup>18</sup> Fan and Hwang

<sup>19</sup> Synder

ماسیولایتیس با همکاری لوفر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۴، بررسی‌هایی در تبدیل پروفیل سرعت ورودی تا سرعت هارتمن، در ناحیه توسعه یافته انجام دادند. آنها از روش انتگرالی کارمن-پولهاسن<sup>۲</sup> با تقریب پروفیل سرعت شیلر<sup>۳</sup>، استفاده کردند [۱۴]. فآن و همکارش اچوانگ در سال ۱۹۶۶، در مقاله ای جریان مگنتوهیدرودینامیک را بین دو صفحه موازی افقی و عایق الکتریکی حل عددی نمودند. آنها در مقاله خود از پروفیل ورودی سهموی در کانال استفاده کرده و ناحیه ورودی تا حالت توسعه یافتگی (پروفیل سرعت هارتمن) را محاسبه کردند. پروفیل سرعت ورودی در کانال همان پروفیل سرعت سیال نیوتنی در حالت توسعه یافتگی و در غیاب میدان مغناطیسی می‌باشد. بدین معنی که طول ناحیه ورودی در غیاب میدان مغناطیسی صفر می‌باشد [۱۴].

در سال ۱۹۹۸، آتیا، جریان MHD بین دو صفحه موازی متخلخل، برای سیال غیر نیوتنی را حل عددی و حل تحلیلی نمود. وی جریان را در حالت آرام، غیر پایا و با در نظر گرفتن اثر هال مورد مطالعه قرار داد. تحلیل‌های عددی گسترده ای در زمینه جریان مگنتوهیدرو دینامیک، برای سیال غیر نیوتنی در کانال، توسط سعید-احمد، انجام شد [۴ و ۵ و ۱۵].

در پایان نامه حاضر، جریان آرام، تراکم ناپذیر و پایا و با وجود انتقال حرارت در یک سیال غیر نیوتنی هادی الکتریکی، دارای تنش تسلیم اولیه (مدل هرشل-بالکلی<sup>۴</sup>) عبوری از لوله، با حضور یک میدان مغناطیسی یکنواخت، به صورت دو بعدی مورد تحلیل عددی قرار گرفت. معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی با روش حجم محدود و با بکارگیری الگوریتم سیمپل حل شده است. دو شرط مرزی حرارتی شار ثابت و دما ثابت در نظر گرفته شد و جملات اتلاف ویسکوزیته و ژول نیز در معادله انرژی نیز حذف نشد. با انجام حل عددی بر روی معادلات حاکم، تأثیرات قدرت میدان مغناطیسی، مقدار تنش تسلیم اولیه سیال و میزان انحراف از نیوتنی بودن سیال، بر روی سرعت، ضریب اصطکاک و عدد نوسلت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیرات جملات اتلاف بر روی عدد نوسلت مورد بحث و تحلیل واقع شد.

<sup>1</sup> Maciulaitis and Loffler

<sup>2</sup> Karman-Pohlhausen

<sup>3</sup> Schiller

<sup>4</sup> Herschel- Bulkley