

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مکانیک

گروه حرارت و سیالات

بررسی تولید آنتروپی جریان سیال ویسکوپلاستیک در

هیت سینک‌های میکروکانالی

دانشجو:

محمدرضا محمدی

اساتید راهنما:

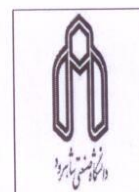
دکتر علی جباری مقدم

دکتر محمود فرزانه گرد

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

آذر ۹۳

ب



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمدرضا محمدی رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان "بررسی تولید آنتروپی جریان سیال ویسکوپلاستیک در هیت سینک‌های میکروکانالی" که در تاریخ ۱۳۹۳/۹/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید، به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار خوب امتیاز: ۱۸) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر علی جباری مقدم	استادیار	
۲- استاد راهنما	دکتر محمود فرزانه گرد	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مهندس احمد مددی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر محمد محسن شاه‌مردان	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر محمود نوروزی	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه‌مردان

امضاء

ش. داوران

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

بہ پاس زحماتشان...

تقدیر و سپاس

منت خدای راعزوجل که مسیر زندگیم را با چراغ دانش روشن کرد. بر خود لازم می دانم که از اساتید گرامی جناب آقای دکتر علی جباری مقدم و جناب آقای دکتر محمود فرزانه کرد که در به انجام رساندن این پژوهش مرایاری فرمودند، سپاسگزاری نمایم.

محمدرضا محمدی - آذرماه ۹۳

تعهد نامه

اینجانب محمدرضا محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه "بررسی تولید آنتروپی جریان سیال ویسکوپلاستیک در هیت سینک های میکروکانالی" تحت راهنمایی دکتر علی جباری مقدم به عنوان استاد راهنمای اول و دکتر محمود فرزانه گرد به عنوان استاد راهنمای دوم متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood university of technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

رشد روز افزون صنعت، بهبود پارامترهای انتقال حرارت و افزایش بازده ترمودینامیکی را جهت خنک کاری بهتر و بیشتر ضروری ساخته است. امروزه صنعت توانایی تولید سیستم‌هایی با تراکمی بالا از تراشه‌های کامپیوتری را دارد. این دستگاه‌ها اغلب به دلیل تولید گرمای زیاد در سطحی کوچک، نیازمند روش‌های نوین و مفید به منظور خنک کاری می‌باشند. یکی از سیستم‌هایی که می‌توان برای انتقال حرارت در این موارد از آن‌ها استفاده نمود، هیت سینک‌های حرارتی هستند که متشکل از میکروکانال‌ها با سطح مقاطع متفاوت و جنس‌های گوناگون می‌باشند.

در این پژوهش به بررسی یک میکروکانال مدور از یک هیت سینک حرارتی که تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد، پرداخته شده است. با در نظر گرفتن سیال بینگهام داخل میکروکانال جهت خنک کاری سطح موردنظر، به بررسی پارامترهای موثر در انتقال حرارت و نیز تولید آنتروپی پرداخته شده است. همچنین نتایج به دست آمده و پارامترهای مختلف از جمله بهبود انتقال حرارت و بازده ترمودینامیکی نیز در هر بخش با سیالات نیوتونی مقایسه شده است.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیالات نیوتونی در جهت جذب گرمای وارد بر دیواره موثرتر از سیالات بینگهام عمل کرده و علاوه بر این از تحلیل آنتروپی انجام شده نیز مشخص می‌شود که سیالات نیوتونی به دلیل تولید آنتروپی کمتر نسبت به سیالات بینگهام دارای بازده ترمودینامیکی بیشتری بوده و انرژی مفید بیشتری جهت تولید کار دارا می‌باشند که می‌تواند مورد توجه محققان جهت بررسی‌های آزمایشگاهی واقع شود.

همچنین با تحلیل لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال نیز مشاهده شد که با افزایش ضریب لغزش سیال، ظرفیت سیال برای جذب گرمای وارد بر دیواره افزایش یافته و همچنین تولید آنتروپی سیال نیز کاهش چشم‌گیری خواهد داشت.

کلمات کلیدی: میکروکانال، سیال بینگهام، سیال نیوتونی، میدان دما، تولید آنتروپی.

۱.....	فصل اول: مقدمه
۲.....	۱-۱ مقدمه
۳.....	۱-۱-۱ تعریف و کاربرد هیت سینک‌ها
۴.....	۲-۱-۱ تعریف و کاربرد میکروکانال‌ها
۶.....	۳-۱-۱ تعریف و کاربرد سیالات ویسکوپلاستیک
۹.....	۲-۱ مفاهیم
۹.....	۱-۲-۱ مفاهیم مرتبط با سیال بینگهام
۱۱.....	۲-۲-۱ مفاهیم مرتبط با لغزش سیال
۱۳.....	۳-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده
۱۹.....	۱-۳-۱ فرضیات و اهداف پژوهش
۲۱.....	فصل دوم: معادلات حاکم و شرایط مرزی
۲۲.....	۱-۲ میدان سرعت
۲۳.....	۱-۱-۲ ساده سازی معادلات حاکم
۲۵.....	۲-۱-۲ بررسی پارامترهای بی بعد مسئله در حالت عدم لغزش
۲۶.....	۳-۱-۲ تعیین توزیع سرعت جریان سیال در حالت عدم لغزش
۲۸.....	۴-۱-۲ تعیین ضریب اصطکاک
۲۹.....	۵-۱-۲ تعیین عدد پوازی
۲۹.....	۶-۱-۲ بررسی پارامترهای بی بعد مسئله در حالت وجود لغزش
۳۲.....	۷-۱-۲ تعیین توزیع سرعت جریان سیال در حالت وجود لغزش
۳۳.....	۸-۱-۲ تعیین ضریب اصطکاک
۳۳.....	۹-۱-۲ تعیین عدد پوازی
۳۴.....	۱۰-۱-۲ بررسی عدد بینگهام در حالت عدم لغزش
۳۵.....	۱۱-۱-۲ بررسی عدد بینگهام در حالت وجود لغزش
۳۷.....	۲-۲ میدان دما
۳۸.....	۱-۲-۲ ساده سازی معادلات حاکم

۳۸	۲-۲-۲ بررسی پارامترهای بی بعد میدان دما
۳۹	۳-۲-۲ تعیین توزیع دمای سیال در حالت عدم لغزش
۴۲	۴-۲-۲ تعیین توزیع دمای سیال در حالت وجود لغزش
۴۴	۵-۲-۲ بررسی شرط مرزی عدم پرش دمایی در مایعات
۴۶	۶-۲-۲ بررسی گرادیان دمای سیال
۴۷	۷-۲-۲ بررسی عدد برینکمن
۴۸	۸-۲-۲ بررسی عدد ناسلت
۴۹	۳-۲ بررسی تولید آنتروپی
۵۰	۱-۳-۲ بررسی تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک
۵۱	۲-۳-۲ بررسی تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت
۵۲	۳-۳-۲ بررسی عدد بیژن
۵۲	۴-۳-۲ بررسی مقادیر متوسط آنتروپی کلی و عدد بیژن
۵۵	فصل سوم: بررسی نتایج کلی در حالت عدم وجود لغزش سیال روی دیواره
۵۶	۱-۳ بررسی میدان سرعت
۵۸	۱-۱-۳ بررسی عدد پوازی
۵۸	۲-۳ بررسی میدان دما
۵۹	۱-۲-۳ بررسی میدان دما در حالت گرمایش
۶۵	۲-۲-۳ بررسی میدان دما در حالت سرمایش
۷۲	۳-۲-۳ بررسی گرادیان دما در حالت گرمایش
۷۸	۴-۲-۳ بررسی گرادیان دما در حالت سرمایش
۸۳	۵-۲-۳ بررسی عدد ناسلت در حالت گرمایش
۸۶	۶-۲-۳ بررسی عدد ناسلت در حالت سرمایش
۸۷	۳-۳ بررسی تولید آنتروپی
۸۷	۱-۳-۳ بررسی تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک
۹۰	۲-۳-۳ بررسی تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت
۹۲	۳-۳-۳ بررسی تولید آنتروپی کلی
۹۵	۴-۳-۳ بررسی آنتروپی کلی متوسط
۹۶	۵-۳-۳ بررسی عدد بیژن

۹۸	 ۳-۳ بررسی عدد بیژن متوسط
۹۹	 فصل چهارم: بررسی نتایج کلی در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره
۱۰۰	 ۴-۱ بررسی میدان سرعت
۱۰۳	 ۴-۱-۱ بررسی عدد پوازی
۱۰۳	 ۴-۲ بررسی میدان دما
۱۰۴	 ۴-۲-۱ بررسی میدان دما در حالت گرمایش
۱۰۹	 ۴-۲-۲ بررسی میدان دما در حالت سرمایش
۱۱۳	 ۴-۲-۳ بررسی گرادیان دما در حالت گرمایش
۱۱۸	 ۴-۲-۴ بررسی گرادیان دما در حالت سرمایش
۱۲۰	 ۴-۳ بررسی عدد ناسلت
۱۲۵	 ۴-۴ بررسی تولید آنتروپی
۱۲۶	 ۴-۴-۱ بررسی تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک
۱۲۹	 ۴-۴-۲ بررسی تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت
۱۳۲	 ۴-۴-۳ بررسی تولید آنتروپی کلی
۱۳۵	 ۴-۴-۴ بررسی آنتروپی کلی متوسط
۱۳۶	 ۴-۵ بررسی عدد بیژن
۱۴۰	 ۴-۶ بررسی عدد بیژن متوسط
۱۴۳	 فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۴۴	 ۵-۱ مشاهدات و نتایج
۱۵۱	 ۵-۲ پژوهش های پیشنهادی
۱۵۳	 مراجع

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: شماتیکی از یک هیت سینک میکروکانالی.....	۴
شکل ۲-۱: تغییرات تنش برشی در برابر تغییرات نرخ برش برای سیالات مختلف.....	۶
شکل ۳-۱: شماتیکی از توزیع سرعت و تنش برشی مربوط به سیال بینگهام داخل کانال [۹].....	۹
شکل ۴-۱: شماتیک حالات مختلف طول لغزش [۱۲].....	۱۲
شکل ۱-۲: شماتیکی از هندسه‌ی مسئله‌ی مورد بررسی.....	۲۰
شکل ۱-۳: نمودار توزیع سرعت بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام.....	۵۶
شکل ۲-۳: نمودار تغییرات عدد پوازی در برابر تغییرات شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ.....	۵۸
شکل ۳-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0$	۵۹
شکل ۴-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.01$	۶۱
شکل ۵-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.1$	۶۲
شکل ۶-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.5$	۶۲
شکل ۷-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 1$	۶۳
شکل ۸-۳: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع دمای بی بعد برای یک ϕ مشخص.....	۶۴
شکل ۹-۳: تغییرات ماکزیمم اختلاف دمای دیواره و سیال عامل در حالت گرمایش دیواره.....	۶۵
شکل ۱۰-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.01$	۶۶
شکل ۱۱-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.1$	۶۷
شکل ۱۲-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.5$	۶۸
شکل ۱۳-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -1$	۶۹
شکل ۱۴-۳: اثر افزایش عدد برینکمن در جهت منفی روی توزیع دمای بی بعد برای یک ϕ مشخص.....	۷۰
شکل ۱۵-۳: نمودار تغییرات عدد برینکمن بحرانی در برابر تغییرات شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ.....	۷۱
شکل ۱۶-۳: نمودار تغییرات ماکزیمم اختلاف دمای دیواره و سیال عامل در حالت سرمایش سطح.....	۷۱
شکل ۱۷-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0$	۷۳
شکل ۱۸-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.01$	۷۵
شکل ۱۹-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.1$	۷۶
شکل ۲۰-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.5$	۷۶
شکل ۲۱-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 1$	۷۷
شکل ۲۲-۳: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای یک ϕ مشخص.....	۷۸
شکل ۲۳-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.01$	۷۹
شکل ۲۴-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.1$	۸۰
شکل ۲۵-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.5$	۸۱
شکل ۲۶-۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -1$	۸۱

- شکل ۳-۲۷: اثر افزایش عدد برینکمن در جهت منفی روی توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای یک ϕ مشخص..... ۸۲
- شکل ۳-۲۸: تغییرات عدد ناسلت در برابر عدد بینگهام برای مقادیر مختلف عدد برینکمن..... ۸۳
- شکل ۳-۲۹: تغییرات عدد ناسلت در برابر عدد برینکمن برای مقادیر مختلف عدد بینگهام..... ۸۵
- شکل ۳-۳۰: تغییرات عدد ناسلت در برابر عدد برینکمن در دو حالت گرمایش و سرمایش..... ۸۶
- شکل ۳-۳۱: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.01$ ۸۸
- شکل ۳-۳۲: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.5$ ۸۸
- شکل ۳-۳۳: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک برای یک ϕ مشخص..... ۸۹
- شکل ۳-۳۴: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.01$ ۹۰
- شکل ۳-۳۵: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.5$ ۹۱
- شکل ۳-۳۶: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت برای یک ϕ مشخص..... ۹۲
- شکل ۳-۳۷: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.01$ ۹۳
- شکل ۳-۳۸: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.5$ ۹۳
- شکل ۳-۳۹: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع تولید آنتروپی کلی برای یک ϕ مشخص..... ۹۴
- شکل ۳-۴۰: نمودار تغییرات آنتروپی کلی متوسط با افزایش عدد برینکمن..... ۹۵
- شکل ۳-۴۱: نمودار عدد بیژن در حالت $Br = 0.1$ ۹۶
- شکل ۳-۴۲: نمودار عدد بیژن در حالت $Br = 0.5$ ۹۷
- شکل ۳-۴۳: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع عدد بیژن برای یک ϕ مشخص..... ۹۷
- شکل ۳-۴۴: نمودار تغییرات عدد بیژن متوسط با افزایش عدد برینکمن..... ۹۸
- شکل ۴-۱: نمودار توزیع سرعت بی بعد سیال برای مقادیر مختلف ضریب لغزش..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲: نمودار توزیع سرعت بی بعد سیال برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در ضریب لغزش ثابت..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳: نمودار تغییرات عدد پوازی در برابر تغییرات ضریب لغزش سیال..... ۱۰۳
- شکل ۴-۴: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0$ ۱۰۴
- شکل ۴-۵: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.01$ ۱۰۵
- شکل ۴-۶: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.1$ ۱۰۶
- شکل ۴-۷: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$ ۱۰۶
- شکل ۴-۸: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 1$ ۱۰۷
- شکل ۴-۹: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در ضریب لغزش ثابت برای حالت $Br = 0.5$ ۱۰۸
- شکل ۴-۱۰: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -0.01$ ۱۰۹
- شکل ۴-۱۱: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -0.1$ ۱۱۰
- شکل ۴-۱۲: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -0.5$ ۱۱۱
- شکل ۴-۱۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -1$ ۱۱۱
- شکل ۴-۱۴: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در ضریب لغزش ثابت در حالت $Br = -0.5$ ۱۱۲
- شکل ۴-۱۵: نمودار تغییرات عدد برینکمن بحرانی در برابر تغییرات ϕ برای مقادیر مختلف ضریب لغزش..... ۱۱۳
- شکل ۴-۱۶: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0$ ۱۱۴

- شکل ۴-۱۷: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$ ۱۱۵
- شکل ۴-۱۸: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0$ ۱۱۶
- شکل ۴-۱۹: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.5$ ۱۱۷
- شکل ۴-۲۰: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -0.5$ ۱۱۸
- شکل ۴-۲۱: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.5$ ۱۱۹
- شکل ۴-۲۲: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات ϕ برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت عدم وجود تلفات ۱۲۰
- شکل ۴-۲۳: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات ϕ برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت وجود تلفات ۱۲۱
- شکل ۴-۲۴: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات ضریب لغزش در حالت عدم وجود تلفات..... ۱۲۲
- شکل ۴-۲۵: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات ضریب لغزش در حالت وجود تلفات ۱۲۳
- شکل ۴-۲۶: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات عدد برینکمن برای مقادیر مختلف ضریب لغزش..... ۱۲۴
- شکل ۴-۲۷: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات عدد برینکمن برای مقادیر مختلف عدد بینگهام ۱۲۵
- شکل ۴-۲۸: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.01$ ۱۲۶
- شکل ۴-۲۹: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.5$ ۱۲۷
- شکل ۴-۳۰: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.01$ ۱۲۸
- شکل ۴-۳۱: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.5$ ۱۲۸
- شکل ۴-۳۲: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.01$ ۱۲۹
- شکل ۴-۳۳: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.5$ ۱۳۰
- شکل ۴-۳۴: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.01$ ۱۳۱
- شکل ۴-۳۵: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.5$ ۱۳۱
- شکل ۴-۳۶: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.01$ ۱۳۲
- شکل ۴-۳۷: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.5$ ۱۳۳
- شکل ۴-۳۸: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.01$ ۱۳۴
- شکل ۴-۳۹: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.5$ ۱۳۴
- شکل ۴-۴۰: نمودار تغییرات آنتروپی کلی متوسط با افزایش ضریب لغزش در حالت $Br = 0.01$ ۱۳۵
- شکل ۴-۴۱: نمودار تغییرات آنتروپی کلی متوسط با افزایش ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$ ۱۳۶
- شکل ۴-۴۲: نمودار عدد بیژن برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.01$ ۱۳۷
- شکل ۴-۴۳: نمودار عدد بیژن برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$ ۱۳۷
- شکل ۴-۴۴: نمودار عدد بیژن برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.01$ ۱۳۸
- شکل ۴-۴۵: نمودار عدد بیژن برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.5$ ۱۳۹
- شکل ۴-۴۶: نمودار تغییرات عدد بیژن متوسط با افزایش ضریب لغزش در حالت $Br = 0.01$ ۱۴۰
- شکل ۴-۴۷: نمودار تغییرات عدد بیژن متوسط با افزایش ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$ ۱۴۱

فهرست علائم و اختصارات

عنوان	علامت اختصاری	عنوان	علامت اختصاری
سطح مقطع	A	مختصه استوانه‌ای	r
ثابت	m	مختصه استوانه‌ای	z
سرعت لغزشی سیال	V_s	شعاع میکروکانال	r_o
ضریب لغزش	β	شار حرارتی وارد بر دیواره	q''
سرعت متوسط سیال	V_w	تنش تسلیم	τ_0
طول لغزش	l	لزجت پلاستیک بینگهام	μ_B
طول لغزش بی بعد	L	نرخ برش	$\dot{\gamma}$
ثابت	m'	سرعت شعاعی سیال	V_r
چگالی سیال	ρ	سرعت زاویه‌ای سیال	V_θ
گرمای ویژه	c_p	سرعت محوری سیال	V_z
دما	T	تنش اعمالی به سیال	τ
زمان	t	فشار	P
ضریب هدایت حرارتی	k	مختصه‌ی بی بعد استوانه‌ای	R
دمای بی بعد	θ	مختصه‌ی بی بعد استوانه‌ای	Z
عدد برینکمن	Br	شعاع ناحیه‌ی جریان پلاگ	r_p
عدد برینکمن بحرانی	Br_c	شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ	ϕ
دمای دیواره	T_w	سرعت متوسط سیال	V_m
دمای متوسط سیال	T_m	سرعت بی بعد سیال	V
ثابت	α	قطر هیدرولیکی	D_h
ثابت	α'	تنش اعمالی بی بعد	τ^*

عنوان	علامت اختصاری	عنوان	علامت اختصاری
عدد نادسن	Kn	عدد بینگهام	Bi
متوسط طول پویش آزاد مولکولی	λ	دبی حجمی	Q
عدد رینولدز	Re_B	ضریب اصطکاک	f
عدد پرنتل	Pr	عدد پوازی	Po
آنتروپی کلی بی بعد	N_s	دمای مایع چسبیده به دیواره	T_f
آنتروپی حرارتی بی بعد	N_{HT}	مقاومت حرارتی سطحی دیواره	l_k
آنتروپی اصطکاکی بی بعد	N_{FF}	ضریب انتقال حرارت جابجایی	h
عدد پکلت	Pe	دمای متوسط بی بعد	θ_m
شار حرارتی بی بعد	ψ	عدد ناسلت	Nu
عدد بیژن	Be	نرخ محلی تولید آنتروپی کلی	$\dot{S}_{gen}'''$
آنتروپی کلی متوسط	$\overline{N_s}$	نرخ محلی تولید آنتروپی حرارتی	$\dot{S}_{HT}'''$
عدد بیژن متوسط	$\overline{Be}$	نرخ محلی تولید آنتروپی اصطکاکی	$\dot{S}_{FF}'''$
		عملگر گرادیان	∇

فصل اول

مقدمه، مفاهیم و مروری بر پژوهش‌های انجام شده

۱-۱ مقدمه

امروزه پیشرفت چشم‌گیری در تکنولوژی تولید قطعات و سیستم‌های الکترونیکی صورت گرفته است. با افزایش نیاز به اطلاعات زیاد در اندک زمان ممکن، سیستم‌های الکترونیکی با سرعت عملیات بالا مورد نیاز است که همین افزایش سرعت عملیاتی و حجم داده‌ها موجب تولید شار حرارتی زیادی می‌گردد و باید این حرارت تولیدی به سرعت از سیستم گرفته شود تا از این طریق سرعت پردازش داده‌ها بالا رود. پردازش‌گرهای معمولی به دلیل پردازش‌های سنگین و متعددی که انجام می‌دهند، گرمای زیادی را از خود متصاعد می‌نمایند و در حقیقت هر چه قدر یک پردازش گر قوی تر باشد، تولید گرما توسط آن بیشتر است که امری طبیعی می‌باشد.

در واقع پردازنده‌ی کامپیوتر نیز مانند قطعات الکترونیکی دیگر هنگام انجام عملیات، تولید گرما می‌کند که این گرمای تولیدی را می‌توان به حرکت الکترون‌های درون آن نسبت داد. در اثر حرکت این الکترون‌ها و برخورد آن‌ها با یکدیگر، اصطکاک تولید شده که باعث تولید گرما می‌شود.

چنانچه این حرارت تولیدی به سرعت از پردازنده خارج نشود، سبب افزایش بیش از حد دمای پردازنده می‌شود که در این حالت، مشکلاتی از قبیل کاهش عمر پردازنده، هنگ کردن اتفاقی سیستم، ریست^۱ شدن ناگهانی سیستم و در بدترین حالت باعث سوختن پردازنده می‌شود [۱].

بنابراین، اگرچه همواره خنک‌کاری قطعات الکترونیکی یکی از چالش‌های صنایع کامپیوتر و الکترونیک بوده است، اما یکی ابزارهای مفید جهت این امر، استفاده از هیت سینک‌های میکروکانالی^۲ یا MCHS است که می‌تواند با قرار گیری روی پردازش گر و میکروتراشه‌های ابر رایانه‌ها، حرارت تولیدی را از این اجزا خارج کند [۲].

به این ترتیب همان‌طور که مشاهده می‌شود، باید توجه خاصی به عملکرد هیت سینک‌ها و افزایش بازدهی آن‌ها داشت که در بخش بعد در این مورد بیشتر بحث خواهد شد.

^۱ Reset^۲ Micro-channel heat sinks

۱-۱-۱ تعریف و کاربرد هیت سینک‌ها

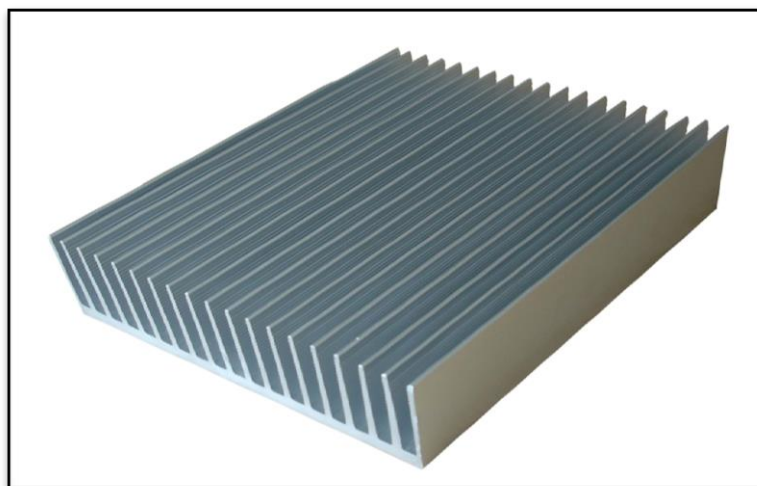
هیت سینک‌ها یا در واقع چاه‌های حرارتی، نوعی شبکه فلزی می‌باشند که از فلزی با ضریب هدایت حرارتی بالا مانند نقره، مس یا آلومینیوم ساخته می‌شوند. این وسیله به‌طور دائم با پردازنده در تماس بوده و گرمای حاصل از عملکرد هسته‌ی پردازشی را به‌طور مستقیم جذب می‌کند.

تا زمانی که دمای هیت سینک از دمای پردازنده بالاتر نرود، گرما از پردازنده به هیت سینک انتقال می‌یابد و هنگامی که دما بین هیت سینک و پردازنده برابر شود، انتقال گرما متوقف شده و در این زمان فن با به جریان انداختن هوا شروع به خنک کردن هیت سینک می‌کند.

هیت سینک‌ها و فن‌ها، متداول‌ترین نوع خنک کننده‌های قطعات الکترونیکی می‌باشند. ولی علاوه بر آن‌ها، خنک کننده‌های آبی نیز وجود دارند که بدون استفاده از فن نیز به راحتی گرما را انتقال می‌دهند. همان‌طور که مشخص است، آب هدایت گرمایی بیشتری از هوا داشته و می‌تواند گرما را سریع‌تر از هوا منتقل کند. علاوه بر این، به‌علت ظرفیت گرمایی ویژه بالاتری که دارد، می‌تواند قبل از این که شروع به گرم شدن کند، گرمای بیشتری را جذب نماید. در این نوع خنک کننده‌ها از فن استفاده نشده و در عوض از گردش یک مایع خنک کننده برای خنک کردن هیت سینک مورد نظر استفاده می‌شود.

روش دیگر برای خنک کردن پردازش‌گر، تغییر فاز سیال عامل است. در این حالت، درون کیس یک کمپرسور وجود دارد که مانند یخچال عمل می‌کند. به این ترتیب که کمپرسور، گازی که خنک شده است را فشرده کرده و به مایع تبدیل می‌کند، سپس مایع پمپ شده و به سمت پردازش‌گر جریان می‌یابد. در نتیجه، مایع با جذب گرمای ناشی از عملکرد پردازش‌گر تبخیر شده و با حرکت به سمت کمپرسور، این سیکل مجدد تکرار می‌شود [۳].

در شکل زیر، نمایی از یک هیت سینک حرارتی که متشکل از میکروکانال‌های با سطح مقطع مستطیلی می‌باشد، مشاهده می‌شود که بر روی تراشه مورد نظر نصب شده و حرارت تولیدی ناشی از عملکرد پردازش‌گر را جذب می‌نماید.



شکل ۱-۱: شماتیکی از یک هیت سینک میکروکانالی

همان‌گونه که عنوان شد، امروزه در ساخت هیت سینک‌ها در ابعاد کوچک، از میکروکانال‌ها استفاده می‌شود که در بخش بعد در مورد اهمیت استفاده از آن‌ها بحث خواهد شد.

۱-۱-۲ تعریف و کاربرد میکروکانال‌ها

میکروکانال‌ها، مبدل‌های حرارتی بسیار کوچک و کارآمدی هستند که با سطح مقاطع متفاوت و از جنس‌های گوناگون با زبری^۱های مختلف تولید می‌شوند. این ابزارها، وسایل بسیار کارآمدی در مقاصد مختلف به‌خصوص انتقال حرارت می‌باشند که به‌دلیل حجم سیال کم مورد استفاده در آن‌ها و هم‌چنین وزن و ابعاد کوچک، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته‌اند [۴]. در واقع، مزیت کوچک نمودن ابعاد، دستیابی به کیفیت بهتر در ضمن صرفه‌جویی در انرژی و منابع می‌باشد.

گفتنی است امروزه، قابلیت این ابزارها در زمینه‌ی داشتن ضرایب انتقال حرارت بالا توسط بررسی‌های آزمایشگاهی محققان مختلف به اثبات رسیده است [۵، ۶].

همان‌طور که مشخص است، نسبت سطح به حجم با بعد طول سیستم نسبت عکس دارد و به این ترتیب با کاهش ابعاد سیستم، نسبت سطح به حجم افزایش می‌یابد. بنابراین در میکروسیستم‌ها به علت وجود سطح زیاد در دسترس، مقدار قابل ملاحظه‌ای اصطکاک به‌دلیل لزجت سیال تولید می‌شود

¹ Roughness

که باید در تحلیل‌ها آن را در نظر گرفت.

میکروکانال‌ها در واقع یکی از اجزای اصلی میکروسیستم‌ها می‌باشند که قطر هیدرولیکی^۱ آن‌ها در محدوده‌ی ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد. اگرچه در آینده‌ای نزدیک، نانو کانال‌ها نیز بخش اصلی میکروسیستم‌ها را تشکیل خواهند داد.

گفتنی است جهت عبور سیال از میان مجاری کوچک، باید فرضیاتی را که در مورد عبور سیال از مجاری بزرگ به کار می‌رود را مجدد تحت مطالعه و بررسی قرار داد. پیش از استفاده از معادلات برای میکروسیستم‌ها باید برخی شرایط برقرار باشند. یکی از این شرایط، شرط پیوستگی^۲ می‌باشد که در واقع بیان گر این است که سیال تا بی نهایت قابل تقسیم باشد. شرط دیگر این است که سیال دارای یک وضعیت تعادلی ترمودینامیکی در تمام قسمت‌هایش باشد. یعنی در واقع طول متوسط پویش آزاد^۳ در مولکول‌های گاز و یا فاصله‌ی بین مولکول‌ها در حالت مایع در تمام سیال یکسان باشد تا بتوان تحلیل درستی از جریان سیال در داخل میکروسیستم داشت.

جهت بررسی فرض پیوستگی، سیالات را به دو دسته‌ی گاز و مایع تقسیم بندی می‌کنند. شایان ذکر است که به دلیل رفتار پیچیده‌تر مایعات نسبت به گازها، تاکنون هیچ تئوری دقیق و کاملی مانند تئوری‌های جنبشی گازها برای مایعات ارائه نشده است. زیرا در مایعات، مولکول‌های مایع بسیار بیشتر به هم نزدیک بوده و بسامد برخورد آن‌ها نیز بالاست. بنابراین در مایعات مفاهیمی مانند میانگین طول پویش آزاد مولکول‌ها و عدد نادسن^۴ (Kn) کاربردی ندارد [۷].

اما نکته‌ی قابل ذکر در مورد میکروکانال‌ها این است که حرکت سیال در مجاورت یک سطح جامد و دیواره با فرض عدم لغزش سیال و سرعت صفر روی دیواره در سیستم‌های میکرو چندان صادق نبوده و بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند که سیال روی دیواره لغزیده و دارای سرعتی معادل غیر صفر می‌باشد [۸] که در بخش ۱-۲-۲ به طور مفصل به آن پرداخته خواهد شد.

¹ Hydraulic diameter

² Continuity

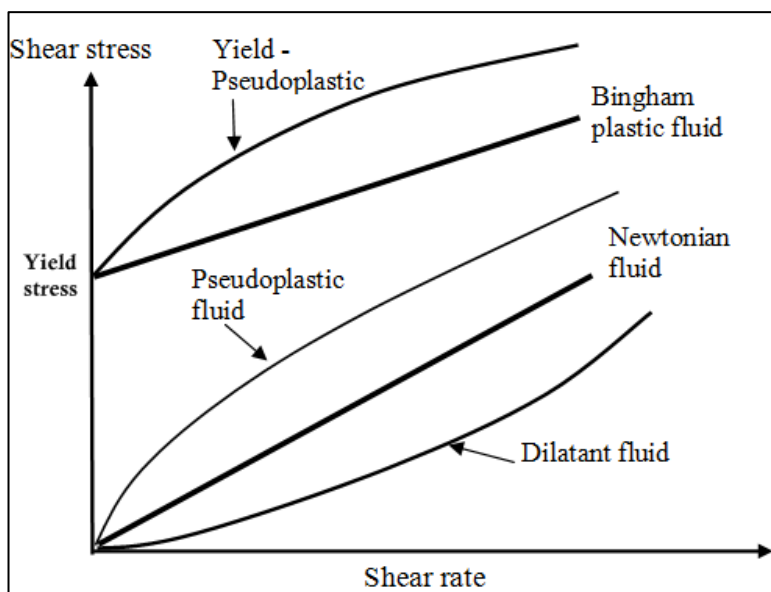
³ Mean free path

⁴ Knudsen number

۳-۱-۱ تعریف و کاربرد سیالات ویسکوپلاستیک

سیالات غیر نیوتونی دارای دسته‌بندی‌های گوناگونی هستند که یک گروه از آن‌ها سیالات ویسکوپلاستیک می‌باشند. رفتار این گونه از سیالات توسط تنشی به نام تنش تسلیم^۱ (τ_0) مشخص می‌شود که در صورت اعمال تنش بزرگ‌تر از مقدار تنش تسلیم، سیال تغییر شکل داده و شروع به جاری شدن می‌کند. بنابراین، این نوع مواد در صورتی که تنشی کمتر از تنش تسلیم به آن‌ها اعمال شود، به صورت الاستیک تغییر شکل داده و یا به صورت یک جسم صلب^۲ شروع به حرکت می‌کنند؛ در حالی که همان‌طور که عنوان شد، در تنش‌های بزرگ‌تر از تنش تسلیم، ساختار ماده شکسته شده و به صورت یک سیال لزج جاری می‌شوند.

گفتنی است، اگر تنش اعمالی به سیالات ویسکوپلاستیک بزرگ‌تر از تنش تسلیم باشد و سیال شروع به جاری شدن نماید، تغییرات تنش برشی با نرخ برش می‌تواند خطی و یا غیر خطی باشد که این منحنی از نقطه مبدأ مختصات نیز آغاز نمی‌شود که این تغییرات در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱: تغییرات تنش برشی در برابر تغییرات نرخ برش برای سیالات مختلف

^۱ Yield stress

^۲ Rigid body

با توجه به شکل ۱-۲، سیالاتی که دارای تغییرات تنش برشی خطی پس از گذشتن از تنش تسلیم می‌باشند، سیالات بینگهام^۱ نامیده می‌شوند که دارای دو مشخصه‌ی لزجت پلاستیک^۲ و تنش تسلیم می‌باشند و مفاهیم مربوط به آن‌ها در بخش بعد به‌طور مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هم‌چنین موادی که پس از گذشتن از مقدار تنش تسلیم، تغییرات تنش برشی با نرخ برش در آن‌ها به‌صورت غیر خطی می‌باشد نیز مواد سودوپلاستیک^۳ نامیده می‌شوند.

بنابراین در مواد مذکور در صورتی که تنش اعمالی کمتر از مقدار تنش تسلیم باشد، سیال تغییر شکل نداده و به این ترتیب گرادیان سرعت نیز در آن‌ها وجود نخواهد داشت. از موادی که دارای چنین خاصیتی می‌باشند می‌توان به سیمان، لجن، گریس، پلاستیک و خمیر کاغذ اشاره کرد [۹].

هم‌چنین هنگامی که یک ماده‌ی پلاستیک در محدوده مشخصی از نرخ‌های برش دچار یک تغییر شکل برشی ساده گردد، ملاحظه می‌شود که اگر نرخ برش به سمت صفر میل نماید، تنش برشی به سمت مقدار حدی معینی میل خواهد نمود که همان مقدار تنش تسلیم می‌باشد.

مدل‌های تجربی مختلفی برای ارتباط بین تنش برشی این مواد به شدت برش آن‌ها ارائه شده است. مدل بینگهام شامل دو ثابت مربوط به این نوع سیالات یعنی لزجت پلاستیک و تنش تسلیم است که نمایان‌گر یک منحنی جریان خطی بوده و به صورت زیر عنوان می‌شود [۹]:

$$\begin{cases} |\tau_{rz}| = \tau_0 + \mu_B |\dot{\gamma}_{rz}| & \text{for } |\tau_{rz}| \geq |\tau_0| \\ \dot{\gamma}_{rz} = 0 & \text{for } |\tau_{rz}| < |\tau_0| \end{cases} \quad (1-1)$$

که در آن τ_0 و μ_B ثوابت مربوط به سیال بینگهام بوده و به ترتیب تنش تسلیم و لزجت پلاستیک سیال می‌باشند. هم‌چنین $\dot{\gamma}_{rz}$ نیز نرخ برش بوده که در فصل آینده به تعریف و توضیح این پارامتر پرداخته خواهد شد.

¹ Bingham fluids

² Plastic viscosity

³ Pseudo-plastic materials

بنابراین رفتار سیالات بینگهام همان‌طور که عنوان شد توسط یک تنش تسلیم مشخص می‌شود که تنش اعمالی به سیال جهت جاری شدن آن بایستی بیش از مقدار تنش تسلیم سیال باشد. به این ترتیب حرکت این نوع سیالات زمانی که تنش اعمالی به آن‌ها کمتر از تنش تسلیم باشد مانند حرکت یک جسم جامد می‌باشد.

هم‌چنین رفتار این نوع سیالات را می‌توان به این‌گونه نیز شرح داد که این مواد در حالت معمولی شامل یک ساختار سه بعدی بوده که داری سفتی کافی در برابر هرگونه تغییر شکل خارجی هستند و در تنش‌های کمتر از تنش تسلیم مقاومت زیادی در برابر تغییر شکل از خود نشان داده و تمایلی به جاری شدن ندارند. هر چند ممکن است دارای تغییر شکل‌های الاستیک نیز در این حالت باشند. اما در تنش‌های بالاتر از تنش تسلیم ساختار ماده شکسته شده و مانند سیالات لزج رفتار می‌کنند.

هم‌چنین گفتنی است در برخی موارد علاوه بر این که ساختار ماده در تنش‌های بالاتر از تنش تسلیم شکسته می‌شود، ممکن است سیال باز هم به حالت اولیه برگردد که در این حالت به‌طور حتم دارای تنش تسلیم کمتری برای جاری شدن خواهد بود.

علاوه بر این، برخی از محققان با مشاهده‌ی عملکرد تنش تسلیم سیال در شرایط گذار از جامد به مایع و کاهش شدید در ویسکوزیته سیال و جاری شدن آن به این نتیجه رسیدند که جهت درک این موضوع که آیا ماده دارای تنش تسلیم می‌باشد یا خیر، کمیت زمان نیز حائز اهمیت است که ماده چه مدت تحت اثر تنش قرار بگیرد که این موضوع برای تولید مواد غذایی، دارویی و بهداشتی دارای اهمیت می‌باشد.

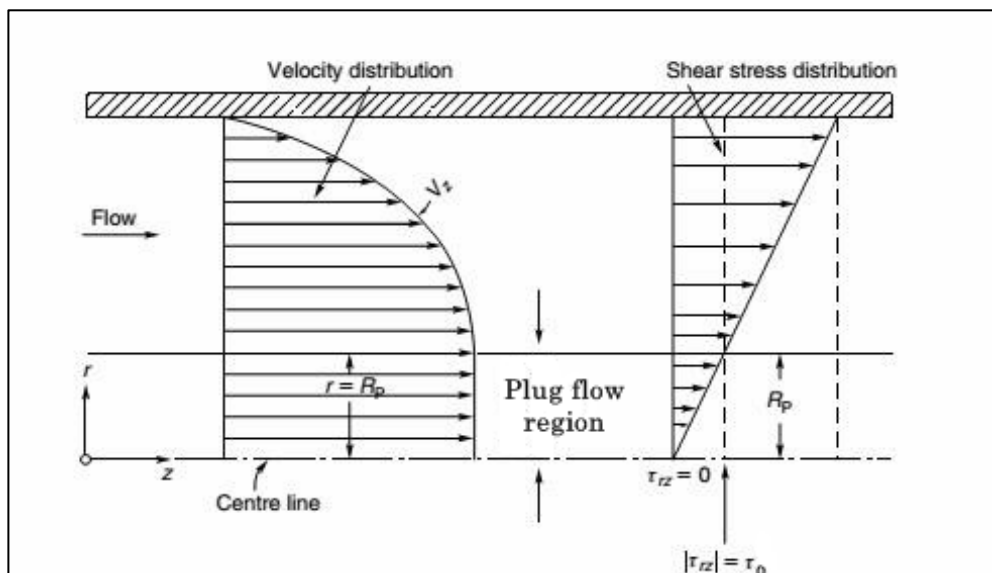
با توجه به ساختار ماده، فرآیند تسلیم ماده می‌تواند تحت تنش‌های کم و یا زیاد باشد که نشان دهنده‌ی شکننده بودن و یا انعطاف پذیر بودن ماده است. بنابراین برای هر ماده با ساختار پلیمری زنجیره‌ای مشخص، استحکام و میزان قدرت متفاوتی در برابر تغییر شکل و جاری شدن وجود دارد [۹، ۱۰]. علاوه بر این، در ادامه نیز در مورد مفاهیم مرتبط با این نوع سیالات بیشتر بحث خواهد شد.

۲-۱ مفاهیم

در این بخش به بررسی برخی مفاهیم که کاربرد زیادی در این پژوهش دارند، پرداخته شده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به بررسی مفاهیم مربوط به سیال بینگهام و هم‌چنین تحلیل مکانیزم وجود لغزش مایعات روی دیواره‌ی میکروکانال‌ها اشاره نمود.

۱-۲-۱ مفاهیم مرتبط با سیال بینگهام

همان‌طور که عنوان شد، با افزایش تنش اعمالی به سیالات بینگهام و گذر از تنش تسلیم مربوطه، سیال جاری شده و مانند یک سیال لزج تغییر شکل می‌دهد. با توجه به این‌که اثرات تنش برشی در نزدیکی دیواره بیشترین مقدار است، بنابراین سیال در این ناحیه با گذر از تنش تسلیم شروع به جاری شدن می‌کند و با نزدیک شدن به مرکز کانال، با توجه به کم شدن مقدار تنش اعمالی به سیال در این ناحیه، ناحیه‌ای به نام ناحیه‌ی جریان پلاگ^۱ ایجاد می‌شود که در این منطقه، ماده تسلیم نشده و حرکت آن مانند حرکت یک جسم جامد در کانال می‌باشد [۹]. در شکل زیر، این ناحیه به‌خوبی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳-۱: شماتیکی از توزیع سرعت و تنش برشی مربوط به سیال بینگهام داخل کانال [۹]

^۱ Plug flow region

به این ترتیب، سیالات مختلف بینگهام با توجه به تنش تسلیم مربوطه و تنش اعمالی از طرف دیواره، می‌توانند دارای ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع‌های متفاوتی باشند. هم‌چنین گفتنی است برای جریان این سیال داخل کانال، با افزایش اختلاف فشار اعمالی، از آن‌جا که تنش برشی روی دیواره افزایش می‌یابد، درصد بیشتری از ماده جاری شده و باعث کوچک شدن ناحیه‌ی جریان پلاگ و کاهش شعاع این ناحیه می‌شود.

بنابراین ناحیه‌ی جریان پلاگ، ناحیه‌ای است که توزیع سرعت در آن یکنواخت بوده و در واقع اثرات تنش برشی و تسلیم سیال در این ناحیه وجود ندارد. یکی از کاربردهای مهم این نوع جریان، در راکتورهای شیمیایی^۱ می‌باشد که جهت واکنش‌های شیمیایی استفاده شده و در این حالت مواد به صورت یکنواخت و با سرعت ثابت در داخل راکتورها ترکیب می‌شوند [۱۱].

در نتیجه برای داشتن ناحیه‌ای با شعاع جریان پلاگ مشخص، باید از سیالی با تنش تسلیم متناسب استفاده کرد تا با توجه به اختلاف فشار اعمالی و تنش برشی روی دیواره، تسلیم شده و ناحیه‌ی جریان پلاگ مورد نظر تشکیل شود. زیرا همان‌طور که عنوان شد، تنش تسلیم و لزجت پلاستیک دو مشخصه‌ی سیالات بینگهام هستند که در اکثر موارد ثابت می‌باشند.

به این ترتیب شعاع ناحیه‌ی جریان پلاگ، یکی از مهم‌ترین مفاهیم مربوط به سیال غیر نیوتونی بینگهام می‌باشد که در فصول آینده با بی بعد سازی این پارامتر توسط شعاع میکروکانال به تحلیل حالات مختلف جریان سیال پرداخته خواهد شد.

هم‌چنین مطابق شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود که توزیع سرعت سیال بینگهام با توجه به تنش اعمالی به سیال دارای دو ناحیه‌ی تسلیم شده و تسلیم نشده می‌باشد که در شعاع مربوط به ناحیه‌ی جریان پلاگ دارای سرعت برابری می‌باشند که از این نکته در فصل آینده جهت تعیین توزیع سرعت سیال استفاده خواهد شد.

¹ Chemical reactors

۲-۲-۱ مفاهیم مرتبط با لغزش سیال

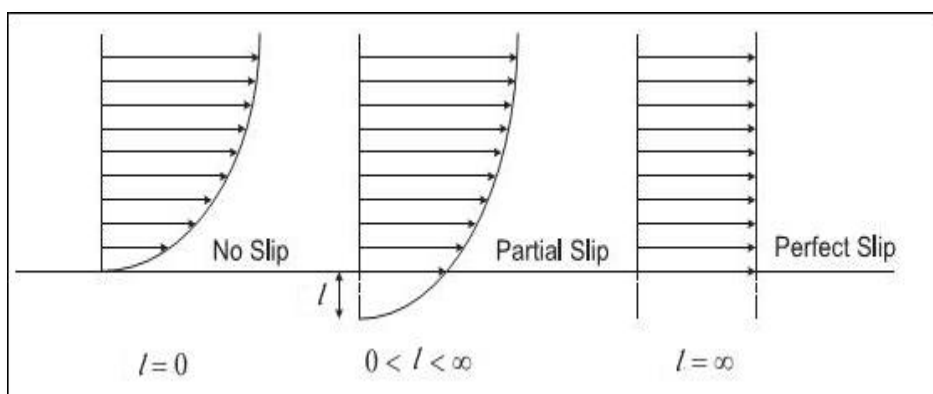
در حالی که شرط عدم لغزش مایعات روی دیواره به‌طور گسترده در بررسی‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما تحقیقات آزمایشگاهی اخیر مشخص کرده است که لغزش مایعات روی دیواره‌ی میکروکانال‌های با سطوح آب‌گریز^۱ و یا فوق‌العاده آب‌گریز^۲ رخ می‌دهد. شایان ذکر است که درجه‌ی آب‌گریزی سطح توسط زاویه‌ای که قطره با سطح آزاد جامد در حالت پایا ایجاد می‌کند، تعیین می‌شود.

به‌طور کلی مکانیزم لغزش مایعات با گازها متفاوت می‌باشد. لغزش در گازها روی دیواره زمانی رخ می‌دهد که فاصله متوسط آزاد مولکول‌ها از یکدیگر به حدی برسد که نتوان گاز را به‌عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفت، در حالی که لغزش در مایعات به‌دلیل اندرکنش بین مولکول‌های مایع نزدیک دیواره با سطح پوشش داده شده توسط ماده خاص و یا ساخته شده با جنس و زبری مخصوص رخ می‌دهد و به این ترتیب در حالتی که مایع یک محیط کاملاً پیوسته نیز باشد، لغزش مایع روی دیواره می‌تواند رخ دهد [۱۲].

گفتنی است یکی از عوامل مهم در لغزش مایعات زبری سطح می‌باشد که باعث می‌شود تا مایع مورد نظر، حفره‌های در ابعاد میکرومتر که بین قله‌های زبری‌ها وجود دارد را پر نکند. بنابراین نوعی پایداری در فصل مشترک سطح جامد - هوا - آب به‌وجود می‌آید که باعث می‌شود مایع در اثر تنش سطحی بر فراز قله‌های زبری‌ها شروع به لغزیدن نماید. هم‌چنین قابل ذکر است که نتایج آزمایشگاهی بیان‌گر کاهش نیروی درگ سیال در جریان آرام با کاهش ارتفاع زبری‌های سطح و افزایش فاصله‌ی بین قله‌ها می‌باشد [۱۳].

¹ Hydrophobic² Super-hydrophobic

یکی از شرایط مرزی لغزش سیال روی دیواره، تعریف بر اساس طول لغزش^۱ می‌باشد که در واقع طول لغزش به‌عنوان فاصله مجازی از دیواره‌ی میکروکانال تا مکانی است که سرعت در آن نقطه صفر می‌باشد که در شکل زیر این موضوع مشاهده می‌شود [۱۴].



شکل ۱-۴: شماتیک حالات مختلف طول لغزش [۱۲]

در واقع با توجه به دیدگاه مولکولی، اگر اصطکاک داخلی بین لایه‌های سیال بزرگ‌تر از نیروی بین مولکول‌های مایع و جامد در روی دیواره باشد، طول لغزش به وقوع می‌پیوندد که در این حالت، مولکول‌های مایع شروع به لغزش روی دیواره می‌نمایند.

بنابراین لزجت سیال به‌عنوان پارامتری که مشخص‌کننده‌ی اصطکاک داخلی بین لایه‌های سیال است، یکی از پارامترهای مهم در زمینه‌ی بحث در مورد لغزش مایع است و هرچه لزجت سیال بالاتر باشد، طول لغزش مربوطه نیز بیشتر می‌باشد.

هم‌چنین گفتنی است، کاهش نیروی درگ اصطکاکی در حالت لغزش و یا در حقیقت افزایش طول لغزش، وابسته به عوامل مختلفی از جمله زبری سطح، نیروهای بین مولکولی بین جامد و سیال روی دیواره و هم‌چنین زاویه تماس سیال با سطح می‌باشد. به این ترتیب، طول لغزش ثابت به مفهوم ثابت ماندن ضریب اصطکاک و سرعت لغزشی سیال روی دیواره می‌باشد [۱۵].

¹ Slip length

علاوه بر این، نیروهای چسبندگی^۱ که توسط کشش سطحی^۲ مایعات تعیین می‌شوند، روی ارتفاع تضعیف^۳ مایعات تأثیر دارد و هرچه کشش سطحی مایع کمتر باشد، ارتفاع تضعیف آن کمتر است. در نتیجه مایع راحت‌تر داخل حفره‌های سطح آب‌گریز نفوذ کرده و از حجم هوای به دام افتاده در آن‌ها و در نتیجه طول لغزش کاسته می‌شود. زیرا در حقیقت، طول لغزش متناسب با ارتفاع زبری‌های روی دیواره می‌باشد.

بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود، خواص سطح تأثیر زیادی در لغزش مایعات دارد و به این ترتیب نیروی چسبندگی و لزجت سیال دو عامل مهم در لغزش مایعات می‌باشند [۱۶].

۳-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده

در این بخش به بررسی و مرور برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی بعضی از سیالات غیرنیوتونی از جمله بینگهام و هم‌چنین سایر پژوهش‌های مرتبط با انتقال حرارت و تولید آنتروپی در سیالات مختلف پرداخته می‌شود.

مین^۴ و همکارانش [۱۷] در یک لوله به‌طور عددی به بررسی سیال بینگهام در ناحیه‌ی در حال توسعه‌ی هیدرودینامیکی و حرارتی پرداختند و مشاهده کردند که هرچه تنش تسلیم مربوط به سیال بینگهام بزرگ‌تر باشد، ضخامت ناحیه‌ی تسلیم نشده بزرگ‌تر می‌باشد. علاوه بر این، توزیع سرعت و توزیع دمای مربوطه به ناحیه‌ی توسعه‌یافته را نیز برای حالت عدم لغزش سیال روی دیواره برای حالات مختلف شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ^۵ به‌صورت عددی تحلیل نمودند.

اما همان‌طور که عنوان شد با توجه به این‌که اندازه‌ی میکروکانال‌ها در مقطع در حد میکرون می‌باشد، گرادیان سرعت سیال در نزدیکی دیواره بالا بوده و باعث بالا رفتن تنش روی دیواره می‌شود که به این دلیل فرض عدم لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال‌ها چندان منطقی نبوده و سیال به

¹ Adhesive force

² Surface tension

³ Sagging height

⁴ T. Min

⁵ Dimensionless radius of the plug flow region

دیواره نچسبیده و روی دیواره می‌لغزد و به این ترتیب جریان لغزشی^۱ به وجود می‌آید [۱۸]. حرکت سیالات غیرنیوتونی نیز از این پدیده مستثنی نبوده و لغزش در مورد این سیالات نیز رخ می‌دهد. محققان زیادی لغزش مایعات در میکروکانال‌ها را در نظر گرفته و به تحلیل نتایج سرعت و دما پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

در بررسی‌های دمایی سیالات مختلف، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت^۲ مانند یک منبع گرما می‌باشد که اثر زیادی روی توزیع دمای مربوط به سیالات دارد. با این وجود باز هم در بسیاری از تحلیل‌های دمایی از در نظر گرفتن این اثر صرف‌نظر می‌شود. در واقع اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت در جریان آرام هنوز هم به‌طور کامل و دقیق توسط محققان بررسی نشده است. در جریان سیالات با لزجت زیاد و ضریب هدایت حرارتی کم، عدم در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت باعث خطاهای قابل توجه در تحلیل دمایی می‌شود که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

گفتنی است در این بخش سعی شده است به مرور تحلیل‌های دمایی مربوط به مایعات پرداخته شود و از آوردن مراجع مرتبط با تحلیل دمایی گازها صرف‌نظر شده است.

مورینی^۳ [۱۹] تحلیل جامعی بر روی اثر تلفات لزجت در سطح مقاطع مختلف میکروکانال‌ها انجام داد و مشاهده کرد که در کانال‌های با قطر هیدرولیکی بسیار کوچک، گرمای تولیدی ناشی از تلفات لزجت می‌تواند تأثیر زیادی روی افزایش دمای سیال داشته باشد؛ اگرچه دیواره آدیاباتیک نیز باشد. علاوه بر این، او نتیجه گرفت که این گرمای تولیدی می‌تواند باعث تغییر خواص سیال در مقاطع ورودی و خروجی شود و در بررسی‌های آزمایشگاهی باید به این نکته توجه شود.

کو و کلینسترور^۴ [۲۰] نیز با در نظر گرفتن سه سیال عامل آب، متانول و ایزوپروپانول به بررسی اثر تلفات لزجت روی توزیع دمای مربوط به سیال عامل پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با کاهش قطر هیدرولیکی کانال، تلفات ناشی از لزجت سیال به سرعت افزایش یافته و مانند یک منبع گرما

¹ Slip flow

² Viscous dissipation

³ G. L. Morini

⁴ J. Ko & C. Kleinstreuer

داخل سیال عمل می‌کند که در حقیقت از تبدیل انرژی جنبشی سیال به انرژی حرارتی ایجاد شده و باعث بروز تغییرات در توزیع دما می‌شود.

آنها همچنین دریافته‌اند که عدم در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت باعث کاهش دقت بررسی‌های عددی و اندازه‌گیری ضریب اصطکاک سیالات مختلف در میکروکانال‌ها می‌شود.

آیدین^۱ [۲۱] با در نظر گرفتن سیال نیوتونی داخل لوله، به بررسی تحلیلی توزیع دما و تعیین عدد ناسلت^۲ بر حسب عدد برینکمن^۳ پرداخت و عنوان کرد پارامتر نشان دهنده‌ی اثرات تلفات لزجت در معادله‌ی انرژی، عدد برینکمن می‌باشد. او همچنین در بررسی خود نشان داد که برای مقادیر زیاد عدد برینکمن ($Br > 0.1$)، اثر تلفات لزجت روی تغییر توزیع دمای سیال زیاد است. در حالی که برای مقادیر ناچیز تلفات لزجت، این اثر قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

همچنین خطیر^۴ و همکارانش [۲۲] نیز با در نظر گرفتن اثرات تلفات لزجت داخل کانال مدور برای سیال بینگهام در حالت عدم وجود لغزش سیال به تحلیل دمایی این نوع سیال با شرط مرزی دیواره‌ی دما ثابت پرداخته و مشاهده نمودند که عدد ناسلت در این حالت تابع عدد برینکمن و شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ می‌باشد.

علاوه بر این‌ها، چن و تسو^۵ [۲۳] با بررسی عددی سیال غیر نیوتونی پاورلا^۶ در داخل کانال مدور با محیط متخلخل^۷ مشخص کردند که توزیع دمای سیال ارتباط نزدیکی با توزیع سرعتش دارد.

آنها همچنین به مقایسه‌ی سیالات نیوتونی و غیر نیوتونی پرداخته و نشان دادند که با افزایش عدد برینکمن، عدد ناسلت سیالات نیوتونی بزرگ‌تر از سیالات غیرنیوتونی می‌باشد.

برخورداری^۸ [۲۴] با فرض جریان آرام، پایدار و تراکم ناپذیر برای سیال غیرنیوتونی پاورلا به

¹ O. Aydın

² Nusselt number

³ Brinkman number

⁴ R. Khatyr

⁵ G.M. Chen & C.P. Tso

⁶ Power-law fluid

⁷ Porous medium

⁸ M. Barkhordari

بررسی جریان سیال با فرض وجود لغزش روی دیواره‌ی میکروکانال مدور پرداختند. نتایج آن‌ها مشخص کرد که با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره، ضریب اصطکاک و سرعت سیال در مرکز میکروکانال کاهش یافته و عدد ناسلت سیال افزایش می‌یابد.

نگوما^۱ [۲۵] به بررسی عددی جریان سیال نیوتونی بین دو صفحه‌ی موازی با فرض وجود لغزش سیال و عدم وجود شرط پرش دمایی^۲ برای سیال روی دیواره پرداخته و اثرات ضریب لغزش سیال روی اختلاف دمای دیواره و سیال عامل و همچنین عدد ناسلت را مورد تحلیل قرار داد.

یزدی^۳ و همکارانش [۲۶] به حل تشابهی جریان لغزشی سیال روی سطح آزاد پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن سرعت لغزش گاز و مایع روی دیواره و همچنین شرط مرزی پرش دمایی برای گاز و عدم پرش دمایی برای مایع روی دیواره به تحلیل نتایج پرداخته و مشخص کردند که با توجه به نزدیک بودن فاصله‌ی بین مولکول‌ها در حالت مایع، پرش دمایی در مایعات رخ نمی‌دهد.

افزایش آگاهی از محدودیت منابع انرژی، امروزه جوامع علمی را بر آن داشته تا در پی راه‌کاری برای کاهش اتلاف انرژی از سیستم‌ها باشند. یکی از روش‌هایی که در مورد سیستم‌های انرژی به‌طور گسترده به کار برده می‌شود، بررسی سیستم‌ها از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک و سعی در کاهش میزان بازگشت ناپذیری^۴ آن‌ها می‌باشد. بازگشت ناپذیری عاملی است که باعث افزایش کار هدر رفته^۵ و کاهش کار مفید^۶ و پتانسیل انجام کار می‌شود [۲۷].

از آن‌جا که میزان تولید آنتروپی بیان‌گر میزان بازگشت ناپذیری سیستم می‌باشد، به‌وسیله قانون دوم ترمودینامیک بر روی سیستم‌ها می‌توان با کمینه کردن تولید آنتروپی، افت‌های اصطکاکی و حرارتی را به حداقل رساند [۲۸].

¹ G. D. Ngoma

² Temperature jump condition

³ M.H. Yazdi

⁴ Irreversibility

⁵ Work loss

⁶ Useful work

اکثر فرآیندهای انتقال حرارت جابجایی شامل دو نوع بازگشت ناپذیری می‌شوند که یکی در ارتباط با ترم اصطکاکی و تلفات لزجت سیال و دیگری متناسب با میزان انتقال حرارت به واسطه‌ی یک اختلاف دمای محدود می‌باشد [۲۹].

بیژن^۱، گام‌های اساسی در زمینه بررسی تولید آنتروپی را به‌طور دقیق مدون نموده است [۳۰]. او در یکی از آخرین آثارش، به‌طور اجمالی بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی تولید آنتروپی در سیستم‌های انرژی مروری کرده است و می‌توان آن را مرجع کاملی در این زمینه دانست [۳۱].

تان و چن^۲ [۳۲]، هانگ^۳ [۳۳] و محمود و فریسر^۴ [۳۴] به بررسی انتقال حرارت و تولید آنتروپی در جریان سیال غیر نیوتونی پاورلا در بین دو صفحه‌ی موازی و میکروکانال مدور با وجود تلفات لزجت و شرط عدم لغزش سیال روی دیواره پرداختند. آن‌ها بررسی اثر تلفات لزجت سیال بر روی تولید آنتروپی و تحلیل تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت و عدد بیژن^۵ را در پژوهش‌های خود انجام دادند و نتیجه گرفتند که نادیده گرفتن اثر تلفات لزجت در معادله‌ی انرژی باعث بروز خطا در تحلیل تولید آنتروپی می‌شود.

هم‌چنین هانگ [۳۵] با مقایسه‌ی تولید آنتروپی در دو حالت وجود و عدم وجود تلفات لزجت سیال در میکروکانال مدور با فرض عدم لغزش سیال نیوتونی روی دیواره، به بررسی کمی مقدار خطای ایجاد شده پرداخت و مشاهده کرد خطای ایجاد شده برای آنتروپی کلی و عدد بیژن در دو حالت وجود و عدم وجود تلفات لزجت به ترتیب به بیش از ۴۰٪ و ۶۰٪ می‌رسد که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

ماه^۶ و همکارانش [۳۶] نیز با در نظر گرفتن نانو سیال در یک میکروکانال مدور در جریان آرام در حالت عدم وجود لغزش سیال روی دیواره، به‌طور تحلیلی به بررسی اثر تلفات لزجت سیال روی تولید

¹ A. Bejan

² L. Y. Tan & G. M. Chen

³ Y. M. Hung

⁴ S. Mahmud & R. A. Fraser

⁵ Bejan number

⁶ W. H. Mah

آنتروپی پرداخته و مشاهده کردند که مقادیر متوسط تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت با افزایش اثر تلفات لزجت، روند رو به رشدی داشته و باعث افزایش انرژی هدر رفته می‌شود.

به تازگی شجاعیان^۱ [۳۷] در بررسی خود برای جریان لغزشی بین دو صفحه‌ی موازی، اثرات ضریب لغزش را روی پارامترهای انتقال حرارت و تولید آنتروپی بررسی کرده است. او همچنین نشان داد که در مایعات شرط پرش دمایی سیال روی دیواره وجود نداشته و این شرط مرزی تنها برای گازها معتبر می‌باشد. او بررسی تحلیلی خود را برای سیالات نیوتونی و پاورلا انجام داد و نتیجه گرفت که با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره، عدد ناسلت سیال افزایش یافته، درحالی‌که مقدار تولید آنتروپی کاهش می‌یابد.

همچنین هومن^۲ [۳۸] نیز با بررسی تحلیلی جریان لغزشی گاز داخل میکروکانال، اثر پارامترهای مختلف از قبیل ضریب لغزش و پرش دمایی گاز روی دیواره، وجود تلفات لزجت و نوع سطح مقطع میکروکانال را روی انتقال حرارت و نرخ تولید آنتروپی تحلیل نموده است.

امروزه تحلیل تولید آنتروپی در جریان‌های مختلفی فراگیر شده است و محققان زیادی در این زمینه به بحث و بررسی پرداخته‌اند. به تازگی اسکاندون^۳ [۳۹] و شمشیری^۴ [۴۰] و همکارانشان در جریان الکترواسموتیک^۵ برای سیال غیرنیوتونی پاورلا بین دو صفحه‌ی موازی و میکروکانال مدور نیز به بررسی تولید آنتروپی و تحلیل انواع آن پرداخته و اثرات پارامترهای مرتبط را در تولید آنتروپی بررسی نموده‌اند.

در بخش بعد به اهداف مورد نظر در این پژوهش و فرضیات در نظر گرفته شده برای حل مسئله اشاره خواهد شد.

¹ M. Shojaeian

² K. Hooman

³ J. Escandón

⁴ M. Shamshiri

⁵ Electroosmotic flow

۱-۳-۱ فرضیات و اهداف پژوهش

همان‌گونه که پیش‌تر عنوان شد، سیال خنک کننده در هیت سینک‌ها معمولاً آب یا هوا بوده که راندمان حرارتی بالایی نداشته و در صورت استفاده از مواد دیگر از جمله نانوسیالات به‌عنوان خنک کننده، می‌توان راندمان حرارتی هیت سینک‌ها را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش داد تا امر خنک کاری بهتر صورت پذیرد.

در این پژوهش قصد داریم با در نظر گرفتن یک میکروکانال با سطح مقطع دایروی از یک هیت سینک که تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد، به بررسی انتقال حرارت و تولید آنتروپی سیال غیر نیوتونی بینگهام در آن پرداخته و نتایج حاصل را با نتایج سیالات نیوتونی مقایسه کرده تا مشخص شود بهبود انتقال حرارت و همچنین بازده ترمودینامیکی مربوط به هیت سینک با توجه به مقدار تولید آنتروپی در کدام نوع از این سیالات بیشتر می‌باشد.

از جمله فرضیات مورد استفاده در این پژوهش می‌توان به جریان آرام، پایدار، تراکم ناپذیر و توسعه یافته‌ی هیدرودینامیکی و حرارتی، وجود تلفات لزجت روی دیواره، وجود و عدم وجود لغزش سیال روی دیواره و همچنین خواص ثابت سیال اشاره کرد.

در فصل بعد ابتدا به بررسی معادلات و پارامترهای حاکم بر مسئله پرداخته و روابط مورد نیاز برای تحلیل مسئله را استخراج خواهیم نمود. سپس در دو فصل به‌طور مجزا به تحلیل نتایج در دو حالت وجود و عدم وجود لغزش سیال روی دیواره خواهیم پرداخت. در انتها نیز به نتیجه‌گیری از پژوهش و ارائه‌ی پیشنهادات برای ادامه‌ی بررسی‌ها در این زمینه پرداخته خواهد شد.

فصل دوم

معادلات حاکم و شرایط مرزی

- میدان سرعت
- میدان دما
- تولید آنتروپی

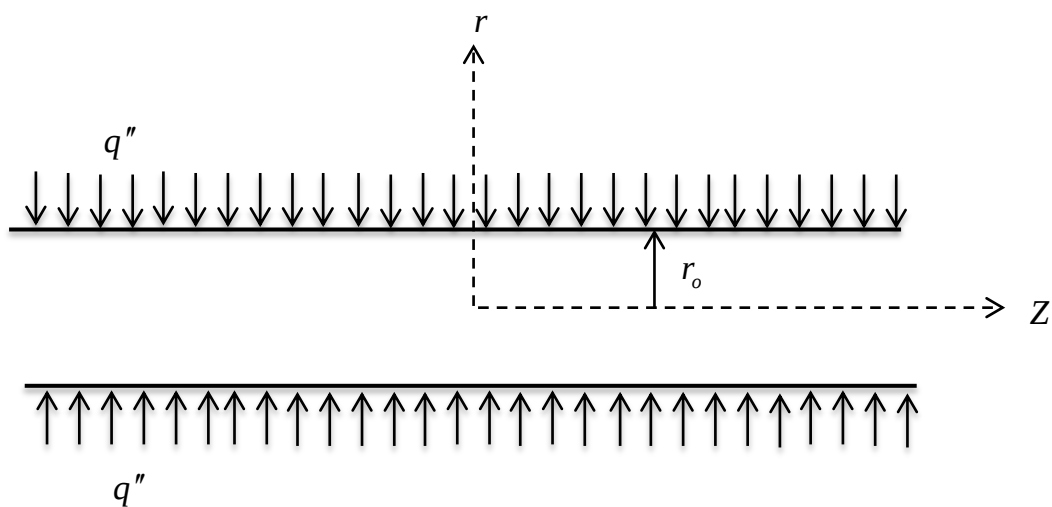
یکی از مهم‌ترین موارد بررسی هر سیالی، تحلیل میدان سرعت مسئله است که در واقع بررسی سایر مشخصات نیز به‌طور مستقیم به آن بستگی دارد.

در این فصل به معرفی و ساده سازی روابط حاکم بر مسئله و معرفی پارامترهای بی بعد پرداخته و به استخراج روابطی برای میدان‌های سرعت، دما و هم‌چنین تولید آنتروپی خواهیم پرداخت. به این منظور، ابتدا به استخراج روابط در حالت عدم لغزش سیال روی دیواره پرداخته و پس از آن با در نظر گرفتن سرعت لغزشی سیال روی دیواره به تحلیل مسئله پرداخته خواهد شد.

۱-۲ میدان سرعت

در این فصل، با فرض جریان آرام، پایدار و تراکم ناپذیر سیال غیر نیوتونی بینگهام با خواص ثابت در یک میکروکانال مدور در ناحیه کاملاً توسعه یافته که تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد، با فرض وجود گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال روی دیواره به بررسی روابط مربوط به میدان سرعت و دما و تحلیل تولید آنتروپی ناشی از این سیال در دو حالت وجود و عدم وجود لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال پرداخته شده است.

شماتیکی از هندسه مورد بررسی با شرایط مرزی در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۲: شماتیکی از هندسه‌ی مسئله‌ی مورد بررسی

۱-۱-۲ ساده سازی معادلات حاکم

برای تعیین میدان سرعت سیال داخل میکروکانال، ابتدا به ساده سازی معادلات پیوستگی و مومنتوم پرداخته می شود. با نوشتن معادله ی پیوستگی در مختصات استوانه ای خواهیم داشت:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (۱-۲)$$

واضح است که با توجه به شرط توسعه یافتگی جریان و همچنین تقارن محوری، به ترتیب

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} \text{ و } \frac{\partial}{\partial \theta} \text{ صفر می باشند.}$$

بنابراین با ساده سازی معادله ی پیوستگی به عبارت $rV_r = cte$ خواهیم رسید که با توجه به

این که در $r = r_o$ مقدار $V_r = 0$ می باشد، در نتیجه با استفاده از این شرط مرزی برای جریان داخل

میکروکانال $V_r = 0$ خواهد بود.

به این ترتیب با نوشتن معادلات کلی مومنتوم در راستاهای r و θ به صورت زیر، خواهیم داشت

[۴۱]:

$$\rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zr}) - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right] \quad (۲-۲)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta\theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{z\theta}) + \frac{\tau_{\theta r} - \tau_{r\theta}}{r} \right] \quad (۳-۲)$$

حال با ساده سازی معادلات مومنتوم با توجه به شرایط مذکور در معادله ی پیوستگی و همچنین

اعمال تنش به سیال فقط در صفحه rz ($\tau_{rz} \neq 0$) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0 \quad (۴-۲)$$

به این ترتیب نتیجه می‌شود که اختلاف فشار داخل میکروکانال تابعی از مختصات r و θ نبوده و بنابراین $P = P(z)$ خواهد بود.

حال با نوشتن معادله‌ی مومنوم در راستای محور میکروکانال (z) داریم:

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta z}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zz}) \right] \quad (۵-۲)$$

که با ساده سازی این معادله به رابطه‌ی زیر می‌رسیم:

$$\frac{d}{dr} (r \tau_{rz}) = -r \frac{dP}{dz} \quad (۶-۲)$$

با انتگرال‌گیری از این رابطه می‌توان به عبارت زیر دست یافت:

$$\tau_{rz} = -\frac{r}{2} \frac{dP}{dz} \quad (۷-۲)$$

همچنین قابل ذکر است ثابت به دست آمده پس از انتگرال‌گیری جهت جلوگیری از شرایط ایجاد تکینگی^۱ شدن جریان باید صفر باشد.

همان‌طور که در فصل اول نیز عنوان شد برای سیال بینگهام عبارت تنش برشی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} |\tau_{rz}| = \tau_0 + \mu_B |\dot{\gamma}_{rz}| & \text{for } |\tau_{rz}| \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma}_{rz} = 0 & \text{for } |\tau_{rz}| < \tau_0 \end{cases} \quad (۸-۲)$$

¹ Singularity

که در آن $\dot{\gamma}_{rz}$ نرخ برش^۱ می باشد که در مختصات استوانه ای به صورت زیر تعریف می شود [۴۱]:

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} = \frac{dV_z}{dr} \quad (۹-۲)$$

لازم به ذکر است که با توجه به معادله (۷-۲) و منفی بودن اختلاف فشار در جریان سیال داخل میکروکانال، مقدار عبارت تنش باید مثبت باشد و بنابراین علامت قدر مطلق در معادله (۸-۲) بدون تغییر علامت عبارت داخل آن برداشته می شود. همچنین باید توجه داشت با توجه به منفی بودن نرخ برش (کاهش سرعت سیال با افزایش شعاع و نزدیک شدن به دیواره)، قدر مطلق مربوط به این عبارت با در نظر گرفتن علامت منفی برای پارامتر دخیل آن قابل برداشتن است و بنابراین معادله (۸-۲) و در واقع عبارت تنش سیال بینگهام در ناحیه تسلیم شده به صورت زیر قابل نوشتن خواهد بود:

$$\tau_{rz} = \tau_0 - \mu_B \frac{dV_z}{dr} \quad (۱۰-۲)$$

در بخش بعد، ابتدا به معرفی پارامترهای بی بعد^۲ مسئله پرداخته و سپس با بی بعد سازی معادله تنش مربوط به سیال بینگهام با توجه به شرایط مرزی حاکم، به تعیین میدان سرعت مسئله در دو حالت وجود و عدم وجود لغزش سیال روی دیواره ی میکروکانال خواهیم پرداخت.

۲-۱-۲ بررسی پارامترهای بی بعد مسئله در حالت عدم لغزش

برای ساده سازی روش حل، ابتدا به تعریف تعدادی پارامتر بدون بعد پرداخته و با توجه به این پارامترها، معادلات حاکم را بی بعد خواهیم نمود.

به این منظور برای بی بعد سازی مختصات استوانه ای و شعاع ناحیه ی جریان پلاگ با استفاده از شعاع میکروکانال و برای سرعت محوری با استفاده از سرعت متوسط جریان سیال داخل میکروکانال، خواهیم داشت:

^۱ Shear rate

^۲ Dimensionless parameters

$$R = \frac{r}{r_o}, \quad Z = \frac{z}{r_o}, \quad \phi = \frac{r_p}{r_o}, \quad V = \frac{V_z}{V_m} \quad (11-2)$$

و برای بی بعد سازی پارامترهای فشار و تنش از قطر هیدرولیکی میکروکانال، سرعت متوسط جریان سیال داخل میکروکانال و هم‌چنین لزجت سیال بینگهام به صورت زیر استفاده خواهیم نمود.

$$P^* = \frac{PD_h}{\mu_B V_m}, \quad \tau^* = \frac{\tau D_h}{\mu_B V_m} \quad (12-2)$$

اما مهم‌ترین پارامتر در مسئله‌ی سیال بینگهام، عدد بینگهام می‌باشد که به صورت زیر تعریف شده و نسبت اثر تسلیم سیال به اثر اینرسی جریان می‌باشد که در بخش ۲-۱-۶ به شرح کامل این عدد خواهیم پرداخت.

$$Bi = \frac{\tau_0 D_h}{\mu_B V_m} \quad (13-2)$$

هم‌چنین قابل ذکر است که پارامترهای بی بعد مربوط به حالت لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال در بخش مربوطه (۲-۱-۶) بیان خواهند شد.

۲-۱-۳ تعیین توزیع سرعت جریان سیال در حالت عدم لغزش

اکنون می‌توان با توجه به پارامترهای بی بعد تعریف شده، به بی بعد سازی معادلات حاکم پرداخت. با بی بعد سازی معادله (۲-۶) خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dR} (R \tau_{rz}^*) = -R \frac{dP^*}{dZ} \quad (14-2)$$

هم‌چنین معادله (۲-۱۰) نیز به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\tau_{rz}^* = Bi - 2 \frac{dV}{dR} \quad (15-2)$$

بنابراین می‌توان با جای‌گذاری عبارت (۱۵-۲) در معادله (۱۴-۲) به عبارت زیر دست یافت:

$$\frac{d}{dR} \left(R \left(Bi - 2 \frac{dV}{dR} \right) \right) = -R \frac{dP^*}{dZ} \quad (۱۶-۲)$$

با تعریف شرایط مرزی بی بعد مسئله به صورت زیر که یکی عدم لغزش سیال روی دیواره و دیگری تقارن توزیع سرعت سیال در مرکز میکروکانال می‌باشد، داریم:

$$V(R=1)=0, \quad \frac{dV}{dR}(R=0)=0 \quad (۱۷-۲)$$

اکنون با دو بار انتگرال‌گیری از معادله (۱۶-۲) و استفاده از شرایط مرزی مذکور، توزیع سرعت سیال بینگهام داخل میکروکانال به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{cases} V_1(R) = \frac{1}{8} \frac{dP^*}{dZ} (\phi^2 - 1) + \frac{Bi}{2} (\phi - 1) & 0 \leq R \leq \phi \\ V_2(R) = \frac{1}{8} \frac{dP^*}{dZ} (R^2 - 1) + \frac{Bi}{2} (R - 1) & \phi \leq R \leq 1 \end{cases} \quad (۱۸-۲)$$

باید توجه داشت با توجه به توضیحات بخش (۱-۲-۱)، سیال بینگهام دارای دو بخش هسته‌ی تسلیم شده و تسلیم نشده است که در شعاع ناحیه‌ی جریان پلاگ دارای نقطه اشتراک هستند و در معادله (۱۸-۲) عبارت دوم، توزیع سرعت جریان در ناحیه تسلیم شده می‌باشد که ناحیه تسلیم نشده نیز دارای سرعت برابر سرعت ناحیه تسلیم شده در شعاع ناحیه‌ی جریان پلاگ است که در فصول آینده نیز به این موضوع اشاره خواهد شد.

حال برای از بین بردن تغییرات فشار، به صورت زیر از متوسط‌گیری استفاده خواهیم نمود. با توجه به تعریف سرعت متوسط سیال داخل میکروکانال به صورت زیر:

$$V_m = \frac{Q}{A} = \frac{\int_A V_z dA}{A} = \frac{V_m \int_A dA}{A} \quad (۱۹-۲)$$

که با ساده سازی معادله (۱۹-۲) خواهیم داشت:

$$\int_0^1 V R dR = \int_0^\phi V_1 R dR + \int_\phi^1 V_2 R dR = \frac{1}{2} \quad (20-2)$$

بنابراین با استفاده از معادله (۱۸-۲) و انتگرال گیری از معادله (۲۰-۲) داریم:

$$\frac{dP^*}{dZ} = \frac{16 + \frac{8}{3} Bi (1 - \phi^3)}{\phi^4 - 1} \quad (21-2)$$

اکنون با جای گذاری تغییرات فشار در معادله (۱۸-۲)، توزیع سرعت بی بعد مسئله به صورت زیر

تعیین می شود:

$$\begin{cases} V_1(R) = m(1 - \phi^2) + \frac{Bi}{2}(\phi - 1) & 0 \leq R \leq \phi \\ V_2(R) = m(1 - R^2) + \frac{Bi}{2}(R - 1) & \phi \leq R \leq 1 \end{cases} \quad (22-2)$$

که در آن عبارت m مطابق زیر تعریف می شود:

$$m = \frac{2 + \frac{1}{3} Bi (1 - \phi^3)}{1 - \phi^4} \quad (23-2)$$

۲-۱-۴ تعیین ضریب اصطکاک

برای تعیین ضریب اصطکاک سیال بر روی دیواره مطابق [۴۲] به صورت زیر عمل می کنیم:

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho_B V_m^2} = \frac{2\tau_0}{\phi \rho_B V_m^2} \quad (24-2)$$

با توجه به پارامترهای بی بعد تعریف شده، پس از ساده سازی عبارت فوق، ضریب اصطکاک را

برای جریان سیال داخل میکروکانال در حالت عدم لغزش می توان به صورت زیر تعیین نمود:

$$f = -\frac{1}{\text{Re}_B} \left[\frac{16 + \frac{8}{3} Bi (1 - \phi^3)}{\phi^4 - 1} \right] \quad (25-2)$$

که در آن $\text{Re}_B = \frac{\rho_B V_m D_h}{\mu_B}$ عدد رینولدز^۱ مربوط به سیال بینگهام می‌باشد که در ادامه با تعیین عدد پوازی^۲ به بررسی آن خواهیم پرداخت.

۵-۱-۲ تعیین عدد پوازی

در این بخش به تعیین عدد پوازی پرداخته می‌شود که در واقع نشان دهنده‌ی اثرات اصطکاک سیال روی دیواره بوده [۴۳] و مطابق [۴۲] به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Po = f \cdot \text{Re}_B = \frac{16 + \frac{8}{3} Bi (1 - \phi^3)}{1 - \phi^4} \quad (26-2)$$

به این ترتیب در فصل آینده به تحلیل این پارامتر و در واقع تغییرات ضریب اصطکاک سیال روی دیواره در حالت عدم لغزش پرداخته خواهد شد.

۶-۱-۲ بررسی پارامترهای بی بعد مسئله در حالت وجود لغزش

همان‌طور که در فصل اول نیز به‌طور مفصل به آن پرداخته شد، امروزه در نظر گرفتن شرط عدم لغزش سیالات روی دیواره میکروکانال‌ها، کمی از واقعیت دور بوده و بررسی‌ها نشان داده‌اند در مقیاس‌های میکرو و کوچک‌تر برای دقت بیشتر لازم است تا لغزش سیال روی دیواره در میکروکانال‌ها به‌عنوان یک شرط مرزی مهم در نظر گرفته شود.

در این بخش به توضیح برخی شرایط مرزی رایج در مورد لغزش سیالات روی دیواره پرداخته می‌شود، هرچند گفتنی است موارد زیادی برای سرعت لغزش سیال روی دیواره توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است:

¹ Reynolds number

² poiseuillennumber

✓ یکی از این شرایط، تعریف بر اساس تنش برشی می‌باشد [۱۴]، که مطابق این شرط، سرعت لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال به صورت $V_s = \beta \tau_{xy}$ تعریف می‌شود که این شرط به‌طور عمده برای سیالات نیوتونی صادق است که در آن τ_{xy} تنش وارده به سیال از طرف دیواره بوده و β نیز به‌عنوان ضریب لغزش^۱ تعریف می‌شود که پس از بی بعد سازی این شرط، دیمانسیون مربوط به این پارامتر برابر $\left(\frac{m^2 s}{kg}\right)$ خواهد بود.

✓ شرط دیگر که می‌توان آن را برای تمامی سیالات نیز به‌کار برد و در حقیقت شرط مرزی غیر خطی^۲ می‌باشد، به صورت زیر تعریف شده و در واقع طبق این شرط، لغزش سیال روی دیواره از ابتدای میکروکانال شروع نشده و پس از رسیدن سیال روی دیواره به تنش بحرانی مشخص، لغزش سیال روی دیواره آغاز خواهد شد [۴۴].

$$u_w = \begin{cases} K_{H1} \sinh(\mp K_{H2} \tau_{xy,w} - \tau_c) & , \quad |\tau_{xy}| \geq \tau_c \\ 0 & , \quad |\tau_{xy}| \leq \tau_c \end{cases} \quad (2-27)$$

که در آن τ_c تنش بحرانی می‌باشد که در این حالت، با رسیدن به این تنش، سیال دارای لغزش روی دیواره خواهد بود. هم‌چنین ضرایب K_H به‌عنوان ضرایب اصطکاک دیواره مورد نظر می‌باشند که در بررسی‌های عددی می‌توان از این شرط بهره برد.

✓ اما شرط دیگر که یک شرط مرزی عمومی^۳ برای سرعت لغزش سیال روی دیواره میکروکانال‌ها می‌باشد و برای تمامی سیالات از جمله نیوتونی و غیر نیوتونی صادق می‌باشد، تعریف بر اساس نرخ برش می‌باشد که در این‌جا برای میکروکانال مدور به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_s - V_w = -l \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} \right)_{r=r_o} \quad (2-28)$$

¹ Slip coefficient

² Non-linear boundary condition

³ General boundary condition

که در آن V_s و V_w به ترتیب سرعت لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال و سرعت دیواره می‌باشد. همچنین l نیز طول لغزش می‌باشد که در واقع همان‌طور که در فصل اول نیز ذکر شد، به‌عنوان فاصله مجازی از دیواره‌ی میکروکانال تا مکانی است که سرعت در آن نقطه صفر می‌باشد. گفتنی است در این مسئله از این شرط مرزی عمومی به‌عنوان شرط حاکم برای سرعت لغزش سیال روی دیواره میکروکانال استفاده شده است که با توجه به ثابت بودن دیواره‌ی میکروکانال، مقدار عبارت V_w صفر می‌باشد.

همچنین در این مسئله پارامتر β به‌عنوان ضریب لغزش تعریف شده و به صورت زیر، نسبت سرعت لغزش سیال روی دیواره به سرعت متوسط جریان سیال داخل میکروکانال می‌باشد:

$$\beta = \frac{V_s}{V_m} \quad (29-2)$$

همچنین طول لغزش بی بعد نیز به صورت نسبت طول لغزش به شعاع میکروکانال تعریف شده است:

$$L = \frac{l}{r_o} \quad (30-2)$$

بنابراین با توجه به این پارامترهای بی بعد تعریف شده، معادله‌ی بی بعد سرعت لغزش سیال روی دیواره به‌دست می‌آید:

$$\beta = -L \left(\frac{dV}{dR} \right)_{R=1} = \frac{L \left[\frac{Bi}{6} (1 - 4\phi^3 + 3\phi^4) + 4 \right]}{1 - \phi^4 + 4L} \quad (31-2)$$

اکنون می‌توان مانند حالت عدم لغزش به تعیین توزیع سرعت جریان سیال بینگهام داخل میکروکانال پرداخت.

۷-۱-۲ تعیین توزیع سرعت جریان سیال در حالت وجود لغزش

در این قسمت نیز می‌توان با دو بار انتگرال‌گیری از معادله (۲-۱۴) و اعمال شرایط مرزی زیر به تعیین توزیع سرعت جریان پرداخت.

$$V(R=1) = \beta, \quad \frac{dV}{dR}(R=0) = 0 \quad (۲-۳۲)$$

بنابراین با اعمال شرایط مرزی، توزیع سرعت را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\begin{cases} V_1(R) = \frac{1}{8} \frac{dP^*}{dZ} (\phi^2 - 1) + \frac{Bi}{2} (\phi - 1) + \beta & 0 \leq R \leq \phi \\ V_2(R) = \frac{1}{8} \frac{dP^*}{dZ} (R^2 - 1) + \frac{Bi}{2} (R - 1) + \beta & \phi \leq R \leq 1 \end{cases} \quad (۲-۳۳)$$

که در این جا نیز توزیع سرعت دومی مربوط به ناحیه تسلیم شده و توزیع سرعت اول مربوط به ناحیه تسلیم نشده جریان می‌باشد که در شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) برابر می‌باشند. در این حالت نیز برای از بین بردن تغییرات فشار مانند حالت قبل از سرعت متوسط استفاده کرده و خواهیم داشت:

$$\frac{dP^*}{dZ} = \frac{16(1-\beta) + \frac{8}{3} Bi (1-\phi^3)}{\phi^4 - 1} \quad (۲-۳۴)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره، تغییرات فشار علاوه بر شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) به ضریب لغزش (β) نیز وابسته می‌باشد. بنابراین توزیع سرعت سیال غیرنیوتونی بینگهام در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} V_1(R) = m'(1-\phi^2) + \frac{Bi}{2} (\phi - 1) + \beta & 0 \leq R \leq \phi \\ V_2(R) = m'(1-R^2) + \frac{Bi}{2} (R - 1) + \beta & \phi \leq R \leq 1 \end{cases} \quad (۲-۳۵)$$

که در آن m' مطابق عبارت زیر تعریف می‌شود:

$$m' = \frac{2(1-\beta) + \frac{1}{3}Bi(1-\phi^3)}{1-\phi^4} \quad (36-2)$$

۸-۱-۲ تعیین ضریب اصطکاک

در این بخش نیز مانند حالت عدم لغزش سیال، می‌توان ضریب اصطکاک سیال را برای حالت وجود لغزش روی دیواره با توجه به پارامترهای بی بعد تعریف شده پس از ساده سازی به صورت زیر تعیین نمود:

$$f' = -\frac{1}{Re_B} \left[\frac{16(1-\beta) + \frac{8}{3}Bi(1-\phi^3)}{\phi^4 - 1} \right] \quad (37-2)$$

به این ترتیب می‌توان در بخش بعد با تعریف عدد پوازی به تحلیل ضریب اصطکاک سیال در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره پرداخت.

۹-۱-۲ تعیین عدد پوازی

در این قسمت نیز می‌توان با تعریف عدد پوازی به صورت زیر، تغییرات ضریب اصطکاک سیال روی دیواره را بررسی نمود.

$$Po' = f' \cdot Re_B = \frac{16(1-\beta) + \frac{8}{3}Bi(1-\phi^3)}{1-\phi^4} \quad (38-2)$$

بنابراین در فصل چهارم به تحلیل عدد پوازی و در حقیقت تغییرات ضریب اصطکاک سیال روی دیواره در حالتی که سیال دارای لغزش روی دیواره باشد، پرداخته خواهد شد.

۲-۱-۱۰ بررسی عدد بینگهام در حالت عدم لغزش

همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد عدد بینگهام به صورت اثر تسلیم سیال به اثر اینرسی جریان تعریف می‌شود که برای ساده‌تر شدن تحلیل این نوع جریان ضروری است تا این عدد را بر حسب شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) به دست آورد. به این منظور ابتدا به تعیین عبارات τ_0 و V_m که در تعریف این عدد به کار رفته‌اند پرداخته می‌شود.

با توجه به معادله (۷-۲) و عبارت دوم معادله (۸-۲) و در نظر گرفتن این نکته که تنش اعمالی به سیال در شعاع r_p برابر تنش تسلیم (τ_0) می‌باشد، خواهیم داشت:

$$\tau_0 = -\frac{1}{2} r_p \frac{dP}{dz} \quad (۳۹-۲)$$

برای به دست آوردن سرعت متوسط نیز به صورت زیر عمل خواهیم نمود:

$$V_m = \frac{\int_0^{r_p} V_{z_1} dA_c + \int_{r_p}^{r_o} V_{z_2} dA_c}{A_c} \quad (۴۰-۲)$$

به این ترتیب باید ابتدا به تعیین عبارت سرعت محوری سیال بینگهام داخل میکروکانال (V_z) در دو ناحیه تسلیم شده و تسلیم نشده جریان پرداخت.

با انتگرال‌گیری از معادله (۶-۲) با توجه به رابطه‌ی تنش (۱۰-۲) و استفاده از شرایط مرزی حاکم یعنی عدم لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال ($V_z(r=r_0)=0$) و همچنین شرط تقارن توزیع سرعت جریان سیال در مرکز میکروکانال ($\left(\frac{dV_z}{dr}(r=0)=0\right)$)، توزیع سرعت سیال بینگهام مربوط به ناحیه تسلیم شده جریان به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$V_{z_1} = -\frac{r_o^2}{4\mu_B} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right) - \frac{\tau_0 r_o}{\mu_B} \left(1 - \frac{r}{r_o} \right) \quad (۴۱-۲)$$

قابل توجه است، برای به دست آوردن توزیع سرعت مربوط به ناحیه تسلیم نشده جریان، کافی

است در توزیع سرعت ناحیه تسلیم شده، شعاع r_p را به جای شعاع r جایگزین نمود. به این ترتیب با ساده سازی معادله (۴۱-۲) خواهیم داشت:

$$V_{z_2} = -\frac{r_o^2}{4\mu_B} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(1 - \frac{r_p}{r_o} \right)^2 \quad (42-2)$$

اکنون می توان با توجه به معادله (۴۰-۲) و انتگرال گیری از آن، توزیع سرعت متوسط را با توجه به عبارات توزیع سرعت محوری به دست آمده، به صورت زیر تعیین نمود:

$$V_m = -\frac{r_o^2}{8\mu_B} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(1 - \frac{4}{3}\phi + \frac{1}{3}\phi^4 \right) \quad (43-2)$$

به این ترتیب می توان عدد بینگهام را بر حسب پارامتر شعاع بی بعد ناحیه ی جریان پلاگ (ϕ) به صورت زیر تعریف نمود که در فصول آینده برای بررسی میداین سرعت و دما از این پارامتر استفاده خواهد شد.

$$Bi = \frac{\tau_0 D_h}{\mu_B V_m} = \frac{\left(-\frac{1}{2} r_p \frac{dP}{dz} \right) D_h}{\mu_B \left(-\frac{r_o^2}{8\mu_B} \right) \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(1 - \frac{4}{3}\phi + \frac{1}{3}\phi^4 \right)} = \frac{24\phi}{3 - 4\phi + \phi^4} \quad (44-2)$$

لازم به ذکر است، نتایج به دست آمده مربوط به میدان سرعت برای سیال غیر نیوتونی بینگهام، در صورتی که مقدار مربوط به شعاع بی بعد ناحیه ی جریان پلاگ برابر صفر قرار داده شود ($\phi = 0$) برای سیالات نیوتونی نیز به خوبی صادق می باشد.

۱-۲-۱۱ بررسی عدد بینگهام در حالت وجود لغزش

در این حالت با توجه به تغییر توزیع سرعت جریان سیال، رابطه ی عدد بینگهام با شعاع بی بعد ناحیه ی جریان پلاگ (ϕ) تفاوت داشته و به ضریب لغزش (β) نیز وابسته خواهد بود.

به این منظور ابتدا به تعیین توزیع سرعت جریان محوری سیال در حالت وجود لغزش سیال روی

دیواره خواهیم پرداخت.

به این ترتیب با انتگرال گیری از معادله (۲-۶) با توجه به رابطه (۲-۱۰) و استفاده از شرایط مرزی سرعت لغزش سیال روی دیواره میکروکانال $(V_z(r=r_0)=V_s)$ و همچنین تقارن توزیع سرعت جریان سیال در مرکز لوله $\left(\frac{dV_z}{dr}(r=0)=0\right)$ ، توزیع سرعت محوری مربوط به ناحیه تسلیم شده جریان به صورت زیر تعیین می شود:

$$V_{z_1} = -\frac{r_o^2}{4\mu_B} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right) - \frac{\tau_0 r_0}{\mu_B} \left(1 - \frac{r}{r_o} \right) + V_s \quad (۲-۴۵)$$

در این جا نیز برای به دست آوردن توزیع سرعت مربوط به ناحیه تسلیم نشده جریان، کافی است در توزیع سرعت ناحیه تسلیم شده، از شعاع r_p به جای شعاع r استفاده نماییم. به این ترتیب با ساده سازی عبارت (۲-۴۵) خواهیم داشت:

$$V_{z_2} = -\frac{r_o^2}{4\mu_B} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(1 - \frac{r_p^2}{r_o^2} \right) + V_s \quad (۲-۴۶)$$

در این جا نیز می توان با توجه به معادله (۲-۴۰) و انتگرال گیری از آن، توزیع سرعت متوسط سیال داخل میکروکانال را با توجه به عبارات توزیع سرعت محوری به دست آمده، تعیین نمود:

$$V_m = -\frac{r_o^2}{8\mu_B} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(1 - \frac{4}{3}\phi + \frac{1}{3}\phi^4 \right) + V_s \quad (۲-۴۷)$$

اکنون می توان عدد بینگهام را به صورت زیر برای حالت لغزش سیال روی دیواره میکروکانال بر حسب شعاع بی بعد ناحیه ی جریان پلاگ (ϕ) و همچنین ضریب لغزش (β) تعیین نمود که در فصل چهارم از آن استفاده خواهد شد.

$$Bi = \frac{\tau_0 D_h}{\mu_B V_m} = \frac{\left(-\frac{1}{2} r_p \frac{dP}{dz}\right) D_h}{\mu_B \left(\left(-\frac{r_o^2}{8\mu_B}\right) \left(\frac{dP}{dz}\right) \left(1 - \frac{4}{3}\phi + \frac{1}{3}\phi^4\right) + V_s \right)} =$$

$$\left(\frac{\frac{8}{3}\beta\phi(\phi^3-1) + \frac{2}{3}\phi(8-5\phi^3) - 2}{+ \left[\left[2 - \frac{2}{3}\phi(8-5\phi^3) - \frac{8}{3}\beta\phi(\phi^3-1) \right]^2 + \frac{64}{9}\phi(1-\phi^3)(3-4\phi+\phi^4)(1-\beta) \right]^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (48-2)$$

$$\frac{2}{9}(1-\phi^3)(3-4\phi+\phi^4)$$

در این جا نیز قابل ذکر است تمام نتایج به دست آمده برای حالت وجود لغزش سیال روی دیواره با قرار دادن ضریب لغزش (β) برابر صفر، با نتایج مربوط به حالت عدم لغزش سیال برابری خواهند نمود.

۲-۲ میدان دما

امروزه انتقال گرما در حقیقت موضوعی است که مرتبط با سایر علوم بوده و تنها بخشی از علوم مهندسی نمی باشد. پدیده های انتقال گرما در بسیاری از مسائل صنعتی و محیطی نقش مهمی را ایفا می کنند و هیچ کاربردی نیست که به طریقی با انتقال گرما سر و کار نداشته باشد. در تولید انرژی الکتریکی، شکافت یا جوش هسته ای، احتراق سوخت های فسیلی، فرآیندهای مربوط به منابع انرژی زمین گرمایی و بسیاری از کاربردهای دیگر، مسائل انتقال گرمای متعددی وجود دارد که باید حل شده و مورد تحلیل قرار گیرند. یکی از نکات مهم در این زمینه، تعیین توزیع دما می باشد که می توان از این طریق به تحلیل مسئله پرداخت.

در این بخش نیز پس از ساده سازی معادلات حاکم و تعریف پارامترهای بی بعد مسئله، به تعیین توزیع دمای مسئله پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۲ ساده سازی معادلات حاکم

برای تعیین توزیع دمای مربوط به مسئله‌ی سیال غیر نیوتونی بینگهام، ابتدا به معرفی و ساده سازی معادله‌ی کلی انرژی پرداخته می‌شود. مطابق [۴۱] معادله‌ی کلی انرژی در مختصات استوانه‌ای مطابق زیر بیان می‌شود:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r'') + \frac{1}{r} \frac{\partial q_\theta''}{\partial \theta} + \frac{\partial q_z''}{\partial z} \right] - (\tau : \nabla V) \quad (۴۹-۲)$$

با توجه به پایا بودن جریان $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \right)$ و همچنین سرعت محوری سیال $(V_r = V_\theta = 0)$ و از آن جا که شار وارد شده به دیواره در جهت r می‌باشد $\left(q_r'' = -k \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ ، با ساده سازی معادله (۴۹-۲) خواهیم داشت:

$$\rho c_p \left(V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - (\tau : \nabla V) \quad (۵۰-۲)$$

همچنین عبارت دوم سمت راست معادله (۵۰-۲)، مربوط به تلفات لزجت می‌باشد که مطابق [۴۱] پس از ساده سازی به صورت زیر تعریف شده و برای سیال بینگهام خواهیم داشت:

$$(\tau : \nabla V) = \tau_{rz} \left(-\frac{dV_z}{dr} \right) = \left(\tau_0 - \mu_B \frac{dV_z}{dr} \right) \left(-\frac{dV_z}{dr} \right) \quad (۵۱-۲)$$

برای حل معادله‌ی انرژی ابتدا به تعریف پارامترهای بی بعد مسئله در بخش بعد خواهیم پرداخت.

۲-۲-۲ بررسی پارامترهای بی بعد میدان دما

در این قسمت برای ساده سازی روش حل، ابتدا به تعریف پارامترهای بی بعد حاکم بر مسئله دمایی پرداخته و سپس با بی بعد سازی معادلات حاکم، به حل آن‌ها خواهیم پرداخت.

مهم‌ترین پارامتر بی بعد در این قسمت، θ می‌باشد که با توجه به شار ثابت بودن مسئله مطابق

زیر به صورت نسبت اختلاف دمای دیواره و سیال عامل به اختلاف دمای ناشی از شار وارد شده روی دیواره تعریف می‌شود:

$$\theta = \frac{T - T_w}{\frac{q'' D_h}{k}} \quad (52-2)$$

با توجه به در نظر گرفتن ترم تلفات لزجت در معادله‌ی انرژی، پارامتر مهمی به نام عدد برینکمن تعریف می‌شود که با توجه فرض شار ثابت در مسئله‌ی دمایی به صورت زیر تعریف شده و بیان‌گر نسبت گرمای تولیدی در اثر اصطکاک سیال روی دیواره به گرمای رسیده به سیال ناشی از شار ثابت در دیواره می‌باشد که در بخش ۲-۲-۷ به شرح کامل این عدد پرداخته خواهد شد.

$$Br = \frac{\mu_B V_m^2}{q'' D_h} \quad (53-2)$$

۲-۲-۳ تعیین توزیع دمای سیال در حالت عدم لغزش

با توجه به معادله (۵۰-۲)، ابتدا به تعیین پارامتر گرادیان دمای محوری $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$ خواهیم پرداخت. با توجه به شار ثابت بودن گرمای وارد شده به دیواره و مطابق [۴۵] به سادگی ثابت می‌شود که در این نوع شرط مرزی گرمایی، گرادیان دمای محوری سیال با گرادیان دمای محوری متوسط سیال برابر است و خواهیم داشت:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{dT_m}{dz} \quad (54-2)$$

بنابراین اکنون به تعیین $\frac{dT_m}{dz}$ خواهیم پرداخت. همان‌طور که مشخص است، دمای متوسط سیال در یک میکروکانال با مقطع مدور مطابق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود [۴۵]:

$$T_m = \frac{2}{V_m r_o^2} \int_0^{r_o} V_z T r dr \quad (55-2)$$

برای تعیین گرادیان دمای محوری متوسط سیال $\left(\frac{dT_m}{dz}\right)$ مطابق زیر، ابتدا از معادله (۵۰-۲) در راستای شعاع میکروکانال انتگرال گیری نموده و خواهیم داشت [۳۶]:

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{r_o} V_z T r dr = \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right)_0^{r_o} + \int_0^{r_o} \left[\mu_B \left(\frac{dV_z}{dr} \right)^2 - \tau_o \left(\frac{dV_z}{dr} \right) \right] r dr \quad (56-2)$$

بنابراین پس از ساده سازی و با توجه به معادله (۵۴-۲)، گرادیان دمای محوری متوسط سیال به دست خواهد آمد:

$$\frac{dT_m}{dz} = \frac{2}{\rho c_p V_m r_o^2} \left[q'' r_o + \mu_B V_m^2 \left(m^2 (1 - \phi^4) - \frac{m}{3} Bi (1 - \phi^3) \right) \right] \quad (57-2)$$

اکنون می توان با توجه به پارامترهای بی بعد تعریف شده در مسئله و همچنین معادله (۵۴-۲) به بی بعد سازی معادله انرژی (۵۰-۲) پرداخت و در نتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) = \alpha V - Br \left(\left(\frac{dV}{dR} \right)^2 - \frac{1}{2} Bi \left(\frac{dV}{dR} \right) \right) \quad (58-2)$$

که در آن پارامتر α مطابق عبارت زیر تعریف می شود:

$$\alpha = 1 + 2Br \left(m^2 (1 - \phi^4) - \frac{m}{3} Bi (1 - \phi^3) \right) \quad (59-2)$$

حال با توجه به دو ضابطه ای بودن توزیع سرعت جریان سیال، نیاز است تا معادله ی انرژی در دو مرحله و در هر مرحله با توزیع سرعت و گرادیان سرعت مربوطه حل شود. به این ترتیب برای حل معادله (۵۸-۲) نیاز به چهار شرط مرزی داریم که در این جا به تحلیل شرایط مرزی پرداخته می شود. به طور کلی، شرایط مرزی گرمایی مسئله مطابق زیر می باشند که به شرح هر کدام از آنها خواهیم پرداخت.

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_2(1) = 0 \\ \frac{\partial \theta_1}{\partial R}(0) = 0 \\ \frac{\partial \theta_1}{\partial R}(\phi) = \frac{\partial \theta_2}{\partial R}(\phi) \\ \theta_1(\phi) = \theta_2(\phi) \end{array} \right. \quad (۶۰-۲)$$

اولین شرط مرزی مربوط به این فرض است که با توجه به مستقیم بودن میکروکانال، دمای سیال چسبیده به دیواره با دمای دیواره در هر مقطع از میکروکانال برابر می‌باشد. باید توجه داشت اگر چه گرادیان دما در راستای شعاع میکروکانال در حال تغییر است، اما می‌توان فرض کرد در هر مقطع از میکروکانال دمای سیال چسبیده به دیواره با دمای دیواره برابر است.

دومین شرط مرزی نیز مربوط به تقارن توزیع دمای سیال در مرکز میکروکانال می‌باشد.

اما سومین و چهارمین شرط مرزی گرمایی با توجه به خاصیت سیال بینگهام تعریف می‌شوند. با توجه به این که در شعاع ناحیه‌ی جریان پلاگ که محل اتصال نواحی تسلیم شده و تسلیم نشده جریان می‌باشد، شار وارد شده در این نقطه به هر دو ناحیه یکسان است، شرط مرزی سوم تعریف شده و از آن جا که سرعت سیال در شعاع ناحیه‌ی جریان پلاگ مربوط به هر دو ناحیه تسلیم شده و تسلیم نشده یکسان است، بنابراین با توجه به یکسان بودن شار وارد شده به این دو ناحیه در این نقطه، شرط مرزی چهارم نیز بدیهی می‌باشد.

بنابراین با اعمال شرایط مرزی مذکور، می‌توان توزیع دمای مربوط به سیال بینگهام در ناحیه تسلیم نشده را با توجه به توزیع سرعت مربوطه و شرایط مرزی دوم و چهارم و توزیع دمای مربوط به ناحیه تسلیم شده را با استفاده از توزیع سرعت مربوطه و شرایط مرزی اول و سوم به صورت زیر تعیین نمود:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_1(R) &= \alpha \left[\begin{aligned} &\left[m(1-\phi^2) + \frac{Bi}{2}(\phi-1) \right] \frac{R^2}{4} \\ &+ \frac{m\phi^4}{4} \left(\frac{3}{4} - \ln(\phi) \right) \\ &+ \frac{Bi}{12} \left(\phi^3 \ln(\phi) + \frac{5}{6}(1-\phi^3) \right) - \frac{3}{16}m \end{aligned} \right] \\ &+ Br \left[\frac{m^2}{4} (1-\phi^4(1-4\ln(\phi))) - \frac{m}{9} Bi (1-\phi^3(1-3\ln(\phi))) \right] \\ \theta_2(R) &= \alpha \left[\begin{aligned} &m \left(\frac{R^2}{4} - \frac{R^4}{16} - \frac{3}{16} \right) + \frac{Bi}{2} \left(\frac{1}{9}R^3 - \frac{1}{4}R^2 + \frac{1}{6}\phi^3 \ln(R) + \frac{5}{36} \right) \\ &- \frac{m\phi^4}{4} \ln(R) \end{aligned} \right] \\ &+ Br \left[\frac{m^2}{4} (1-R^4) - \frac{m}{9} Bi (1-R^3) + m\phi^3 \left(m\phi - \frac{1}{3}Bi \right) \ln(R) \right] \end{aligned} \right. \quad (61-2)$$

در این جا نیز لازم به ذکر است که نتایج دمایی به دست آمده مربوط به سیال غیرنیوتونی بینگهام، در صورتی که مقدار شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ برابر صفر قرار داده شود ($\phi=0$)، برای سیالات نیوتونی نیز به خوبی صادق خواهند بود.

۴-۲-۲ تعیین توزیع دمای سیال در حالت وجود لغزش

برای تعیین توزیع دمای سیال در این حالت نیز با توجه به دو ضابطه‌ای بودن توزیع سرعت مسئله، نیاز است تا معادله‌ی انرژی در دو مرحله به طور جداگانه حل شود.

به این منظور در این جا نیز نیاز به چهار شرط مرزی داریم که یکی از موارد مطرح شده در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره، وجود و یا عدم وجود شرط پرش دمایی مایعات روی دیواره میکروکانال‌ها می‌باشد که در بخش ۵-۲-۲ به شرح کامل این موضوع خواهیم پرداخت که با توجه به

توضیحات آن بخش، چهار شرط مرزی دمایی در این حالت مانند حالت عدم لغزش می‌باشند.

بنابراین در این حالت نیز با توجه به توزیع سرعت دو ضابطه‌ای به دست آمده در معادله (۳۵-۲)

برای حالت وجود لغزش سیال روی دیواره، در دو مرحله به حل معادله‌ی انرژی پرداخته می‌شود.

در مرحله‌ی اول با توجه به ضابطه‌ی اول توزیع سرعت معادله (۳۵-۲) و استفاده از شرایط مرزی

دوم و چهارم مذکور در رابطه‌ی (۶۰-۲) و در مرحله‌ی دوم با توجه به ضابطه‌ی دوم توزیع سرعت

معادله (۳۵-۲) و استفاده از شرایط مرزی اول و سوم رابطه‌ی (۶۰-۲) به ترتیب به تعیین توزیع دما در

نواحی تسلیم نشده و تسلیم شده جریان خواهیم پرداخت و توزیع دمای سیال بینگهام در این نواحی

به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1(R) = \alpha' \left[\begin{array}{l} \left[m'(1-\phi^2) + \frac{Bi}{2}(\phi-1) + \beta \right] \frac{R^2}{4} \\ + \frac{m'\phi^4}{4} \left(\frac{3}{4} - \ln(\phi) \right) \\ + \frac{Bi}{12} \left(\phi^3 \ln(\phi) + \frac{5}{6}(1-\phi^3) \right) - \frac{3}{16}m' - \frac{\beta}{4} \end{array} \right] , \quad (0 \leq R \leq \phi) \\ + Br \left[\frac{m'^2}{4} (1-\phi^4(1-4\ln(\phi))) - \frac{m'}{9} Bi (1-\phi^3(1-3\ln(\phi))) \right] \\ \theta_2(R) = \alpha' \left[\begin{array}{l} m' \left(\frac{R^2}{4} - \frac{R^4}{16} - \frac{3}{16} \right) + \frac{Bi}{2} \left(\frac{1}{9}R^3 - \frac{1}{4}R^2 + \frac{1}{6}\phi^3 \ln(R) + \frac{5}{36} \right) \\ - \frac{m'\phi^4}{4} \ln(R) + \frac{\beta}{4}(R^2-1) \end{array} \right] , \quad (\phi \leq R \leq 1) \\ + Br \left[\frac{m'^2}{4} (1-R^4) - \frac{m'}{9} Bi (1-R^3) + m'\phi^3 \left(m'\phi - \frac{1}{3}Bi \right) \ln(R) \right] \end{array} \right. \quad (62-2)$$

که در آن α' مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha' = 1 + 2Br \left(m'^2 (1 - \phi^4) - \frac{m'}{3} Bi (1 - \phi^3) \right) \quad (۶۳-۲)$$

در این جا نیز شایان ذکر است تمام نتایج دمایی به دست آمده برای حالت وجود لغزش سیال روی دیواره میکروکانال با قرار دادن ضریب لغزش (β) برابر صفر، با نتایج مربوط به حالت عدم لغزش برابری می کنند.

۲-۲-۵ بررسی شرط مرزی عدم پرش دمایی در مایعات

همان طور که پیش تر ذکر شد، عدم وجود لغزش سیال روی دیواره در مقیاس های میکرو و نانو کمی نامعتبر به نظر می رسد. بنابراین باید شرط مرزی سرعت لغزش و پرش دمایی برای سیالات برای این مقیاس ها را در نظر گرفت.

اما با توجه به این که سیالات به دو دسته ی گازها و مایعات تقسیم بندی می شوند، اعمال شرط مرزی پرش دمایی برای آن ها تفاوت دارد. با توجه به متفاوت بودن فاصله ی بین مولکول های گاز در حالات مختلف، پارامتری به نام عدد نادسن برای گازها تعریف می شود که بیان گر نسبت فاصله ی بین مولکول های گاز (λ) به طول مشخصه ای از هندسه مورد بررسی (D_h) بوده و به صورت زیر تعیین می شود:

$$Kn = \frac{\lambda}{D_h} \quad (۶۴-۲)$$

با توجه به بازه های مختلف تعریف شده برای این پارامتر می توان شرط لغزش و یا عدم لغزش برای گازها روی دیواره را در هر مسئله ای تعیین نمود و با توجه به روابط تعیین شده برای سرعت لغزش و پرش دما در هندسه مورد نظر به تحلیل مسئله پرداخت [۴۶، ۴۷].

اما نکته حائز اهمیت این است که عدد نادسن برای مایعات تعریف نشده و این پارامتر فقط برای گازها معتبر می باشد. زیرا با توجه به نزدیکی مولکول ها در مایعات، می توان مایعات را محیطی پیوسته در نظر گرفت که اگرچه می توانند با توجه به خصوصیات دیواره روی آن لغزش داشته باشند، اما با

توجه به نزدیکی مولکول‌ها و پیوستگی محیط، دمای سیال چسبیده به دیواره را می‌توان با دمای دیواره برابر فرض کرد و به این ترتیب شرط پرش دمایی برای مایعات اعتبار چندانی نداشته و به کار نمی‌رود [۲۶].

اگرچه قابل ذکر است محققان هم‌اکنون در حال بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی این موضوع و یافتن رابطه‌ای معتبر برای پرش دمایی در مایعات نیز می‌باشند.

به تازگی [۱۲] در بررسی‌های خود نشان دادند در صورتی که دیواره مورد نظر آب گریز باشد، می‌توان بین دمای مایع چسبیده به دیواره و دمای دیواره تفاوت قائل شد. آن‌ها در بررسی‌های خود نشان دادند که در صورتی که دیواره، خاصیت مذکور را داشته باشد می‌توان برای بررسی‌های عددی با توجه به عدد پرنتل^۱ (Pr) در نظر گرفته برای هر مایع خاص، از این شرط مرزی استفاده کرد که در رابطه‌ی زیر عنوان شده است:

$$T_f - T_w = l_k \left(\frac{\partial T}{\partial x_n} \right) \quad (۶۵-۲)$$

که در آن T_f و T_w به ترتیب دمای مایع چسبیده به دیواره و دمای دیواره می‌باشد و l_k طول مقاومت حرارتی سطحی دیواره^۲ یا طول کاپیتزا^۳ نامیده می‌شود که به صورت نسبت طول لغزش به عدد پرنتل تعریف شده و بیان‌گر فاصله‌ی بین خلل و فرج روی دیواره جامد بوده که باعث تفاوت بین دمای سیال روی دیواره و دمای دیواره می‌شود:

$$l_k \approx \frac{l}{Pr} \quad (۶۶-۲)$$

بنابراین در بررسی‌های عددی برای مایعات، در صورت تفاوت قائل شدن بین دمای مایع چسبیده به دیواره و دیواره می‌توان از رابطه (۶۵-۲) به عنوان شرط مرزی تعمیم یافته استفاده کرد و واضح است

^۱ Prandtl number

^۲ Interfacial thermal resistance length

^۳ Kapitza length

که در صورتی که سیال دارای عدد پرنتل بالایی باشد اثر این شرط مرزی قابل چشم‌پوشی بوده و بنابراین می‌توان با فرض قابل قبولی، دمای مایع روی دیواره با دمای دیواره را برابر دانست [۱۲].

۶-۲-۲ بررسی گرادیان دمای سیال

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل گرمایی، بررسی گرادیان دمای شعاعی بی بعد سیال $\left(\frac{\partial \theta}{\partial R}\right)$ می‌باشد تا مشخص شود اثر شار رسیده به سیال از طرف دیواره در چه نقاطی بیشتر و در چه نقاطی کمتر می‌باشد.

با مشتق‌گیری از توزیع دمای به‌دست آمده در رابطه (۶۱-۲)، گرادیان دمای شعاعی بی بعد سیال برای هر دو ناحیه تسلیم شده و تسلیم نشده در حالت عدم وجود لغزش سیال روی دیواره به صورت زیر به‌دست خواهد آمد که در فصل آینده به تحلیل آن خواهیم پرداخت.

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_1}{\partial R}(R) = \alpha \left[\left[m(1-\phi^2) + \frac{Bi}{2}(\phi-1) \right] \frac{R}{2} \right], & (0 \leq R \leq \phi) \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial R}(R) = \alpha \left[m \left(\frac{R}{2} - \frac{R^3}{4} \right) + \frac{Bi}{2} \left(\frac{R^2}{3} - \frac{R}{2} \right) + \phi^3 \left(\frac{Bi}{12} - \frac{m\phi}{4} \right) \frac{1}{R} \right], & (\phi \leq R \leq 1) \\ + Br \left[-m^2 R^3 + \frac{Bi}{3} m R^2 + m \phi^3 \left(m \phi - \frac{Bi}{3} \phi \right) \frac{1}{R} \right] \end{cases} \quad (۶۷-۲)$$

علاوه بر این برای حالت وجود لغزش روی دیواره نیز با مشتق‌گیری از رابطه (۶۲-۲) می‌توان گرادیان دمای شعاعی بی بعد را به صورت زیر تعیین کرد که در فصل چهارم به تحلیل آن خواهیم پرداخت.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \theta_1}{\partial R}(R) &= \alpha' \left[\left[m'(1-\phi^2) + \frac{Bi}{2}(\phi-1) \right] \frac{R}{2} \right], \quad (0 \leq R \leq \phi) \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial R}(R) &= \alpha' \left[m' \left(\frac{R}{2} - \frac{R^3}{4} \right) + \frac{Bi}{2} \left(\frac{R^2}{3} - \frac{R}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \phi^3 \left(\frac{Bi}{12} - \frac{m'\phi}{4} \right) \frac{1}{R} + \frac{\beta}{2} R \right], \quad (\phi \leq R \leq 1) \\ &\quad + Br \left[-m'^2 R^3 + \frac{Bi}{3} m' R^2 + m' \phi^3 \left(m'\phi - \frac{Bi}{3} \phi \right) \frac{1}{R} \right] \end{aligned} \right. \quad (68-2)$$

همچنین باید ذکر شود که با توجه به شرط مرزی شار ثابت روی دیواره، مقدار گرادیان دمای شعاعی بی بعد سیال بر روی دیواره برای تمام حالات برابر 0.5 می باشد که در نمودارهای ترسیمی مربوط به این پارامتر در فصول آینده این نکته به خوبی مشاهده می شود. این موضوع با استفاده از پارامتر بی بعد تعریف شده θ در رابطه (۵۲-۲) به صورت زیر قابل تحقیق می باشد.

$$q'' = -k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} \rightarrow \left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right)_{R=1} = \frac{1}{2} \quad (69-2)$$

۷-۲-۲ بررسی عدد برینکمن

همان طور که پیش تر عنوان شد، در حالت فرض دمایی شار ثابت، عدد برینکمن به صورت معادله (۵۳-۲) تعریف می شود که معرف اثرات ناشی از تلفات لزجت سیال روی دیواره به گرمای رسیده به سیال ناشی از شار وارد بر روی دیواره می باشد.

در واقع در حالت وجود تلفات لزجت روی دیواره، با تبدیل انرژی جنبشی سیال به انرژی حرارتی، این اثر مانند یک منبع گرما عمل می کند که باعث افزایش گرمای رسیده به سیال و در نتیجه افزایش دمای متوسط آن خواهد شد. همچنین با توجه به این که اثر این گرما در نزدیکی دیواره اهمیت دارد، دمای دیواره نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به ترم تلفات لزجت در معادله انرژی، به خوبی مشاهده می شود که مقادیر گرمای تولیدی روی دیواره در اثر لزجت برای سیال بینگهام بیشتر از سیالات نیوتونی بوده و این باعث می شود در مقادیر بالای عدد برینکمن، گرمای بیشتری ناشی از تلفات لزجت

به سیال برسد، که در فصول آینده به تحلیل نتایج دمایی با افزایش عدد برینکمن خواهیم پرداخت. هم‌چنین گفتنی است، در حالتی که شار سرمایشی به دیواره وارد شود و یا به عبارت دیگر گرما از سیال به دیواره منتقل شود، مقادیر این عدد منفی خواهد بود که این حالت عدد برینکمن نیز در فصول بعدی شرح داده شده است.

۸-۲-۲ بررسی عدد ناسلت

یکی دیگر از پارامترهای مهم در تحلیل گرمایی، عدد ناسلت می‌باشد که معرف نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی می‌باشد. این پارامتر در حقیقت معرف شیب دمای بی بعد روی دیواره بوده و معیاری برای انتقال حرارت جابجایی روی دیواره می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم، ضریب انتقال حرارت در انتقال حرارت جابجایی اجباری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h = \frac{q''}{T_w - T_m} \quad (۷۰-۲)$$

با تعریف دمای بی بعد متوسط به صورت زیر، داریم:

$$\theta_m = \frac{T_m - T_w}{\frac{q'' D_h}{k}} = \frac{1}{V_m A_c} \int_{A_c} V \theta dA_c \quad (۷۱-۲)$$

بنابراین با توجه به تعریف عدد ناسلت و استفاده از روابط مذکور، این عدد به صورت زیر تعیین خواهد شد که در فصول بعد به تحلیل نتایج مربوطه در دو حالت وجود و عدم وجود لغزش سیال روی دیواره خواهیم پرداخت.

$$Nu = \frac{h D_h}{k} = -\frac{1}{\theta_m} = -\frac{1}{2 \int_0^1 V \theta R dR} = -\frac{1}{2 \left(\int_0^\phi V_1 \theta_1 R dR + \int_\phi^1 V_2 \theta_2 R dR \right)} \quad (۷۲-۲)$$

۲-۳ بررسی تولید آنتروپی

به طور کلی باید عنوان نمود که تولید آنتروپی بر اثر وجود بازگشت ناپذیری‌ها در سیستم روی می‌دهد که باعث می‌شود تا کار مفیدی که به هر طریقی قابل دریافت از سیستم می‌باشد، کاهش یابد. فرآیندهایی مانند اصطکاک، انبساط‌های غیر مقید و هم‌چنین انتقال حرارت در اثر اختلاف دمای معین می‌توانند تولید آنتروپی داخلی نمایند.

برای حالت جریان داخلی سیال، تولید آنتروپی می‌تواند ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت باشد که در این بخش به تحلیل آن‌ها پرداخته خواهد شد.

نرخ تولید آنتروپی در یک سیال با انتقال حرارت جابجایی به صورت زیر می‌باشد [۲۹].

$$\dot{S}_{gen}''' = \dot{S}_{HT}''' + \dot{S}_{FF}''' = \frac{k}{T^2} (\nabla T)^2 + \frac{\tau_{rz} \left(-\frac{dV_z}{dr} \right)}{T} = \quad (۷۳-۲)$$

$$\frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 \right] + \frac{1}{T} \left[\mu_B \left(\frac{dV_z}{dr} \right)^2 - \tau_0 \left(\frac{dV_z}{dr} \right) \right]$$

همان‌طور که از معادله (۷۳-۲) مشاهده می‌شود، تولید آنتروپی به صورت مجموع آنتروپی‌های اصطکاکی و حرارتی می‌باشد. ترم تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت، نشان دهنده‌ی اثرات انتقال حرارت هدایت محوری و شعاعی می‌باشد. هم‌چنین ترم تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک نیز، سهم اثرات لزجت سیال را در تولید آنتروپی نشان می‌دهد.

با بی بعد سازی معادله (۷۳-۲)، آنتروپی کلی بی بعد یا در واقع عدد آنتروپی کلی به صورت زیر قابل نوشتن خواهد بود:

$$N_s = \frac{\dot{S}_{gen} r_o^2}{k} = \left(\frac{\psi}{1+\psi\theta} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right)^2 + \frac{4 \left(1 + 2Br \left(m^2 (1-\phi^4) - \frac{m}{3} Bi (1-\phi^3) \right) \right)^2}{Pe} \right] \quad (۷۴-۲)$$

$$+ Br \left(\frac{\psi}{1+\psi\theta} \right) \left[\left(\frac{dV}{dR} \right)^2 - \frac{1}{2} Bi \left(\frac{dV}{dR} \right) \right]$$

که در آن Pe معرف عدد پکلت^۱ بوده و به صورت $Pe = \frac{\rho c_p V_m D_h}{k}$ تعریف شده و به بیان

نفوذ گرمایی سیال می‌پردازد. همچنین، پارامتر ψ نیز به عنوان شار حرارتی بی بعد^۲ می‌باشد که به

$$\text{صورت } \psi = \frac{q'' D_h}{k T_w} \text{ تعریف می‌شود.}$$

گفتنی است در این پژوهش برای تحلیل مسئله در فصول آینده، مقدار شار حرارتی بی بعد و عدد

پکلت به ترتیب برابر ۰/۰۵ و ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

۲-۳-۱ بررسی تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک

همان‌طور که عنوان شد، سهمی از تولید آنتروپی در جریان داخلی سیال، ناشی از لزجت سیال و

تولید اصطکاک نزدیک دیواره می‌باشد. در واقع با تبدیل انرژی جنبشی سیال به انرژی حرارتی، انرژی

به فرمی تبدیل شده است که ارزش تولید کار مفید را ندارد.

در عبارت زیر، تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک بی بعد یا در واقع عدد آنتروپی اصطکاکی مشاهده

می‌شود.

$$N_{FF} = Br \left(\frac{\psi}{1+\psi\theta} \right) \left[\left(\frac{dV}{dR} \right)^2 - \frac{1}{2} Bi \left(\frac{dV}{dR} \right) \right] \quad (۷۵-۲)$$

^۱ Peclet number

^۲ Dimensionless heat flux

با توجه به معادله (۷۵-۲) مشاهده می‌شود که مقدار تولید آنتروپی اصطکاکی وابستگی شدیدی به گرادیان سرعت بی بعد سیال داشته و به این ترتیب باید روی دیواره، مقدار تولید این آنتروپی بیشترین مقدار باشد. همچنین گفتنی است در سیالات بینگهام، با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) گرادیان سرعت سیال روی دیواره افزایش می‌یابد و بنابراین مقدار تلفات تولیدی ناشی از لزجت افزایش یافته و در نتیجه تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک نیز زیاد می‌شود که در فصول آینده در مورد آن به‌طور مفصل بحث خواهد شد.

۲-۳-۲ بررسی تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت

علاوه بر اصطکاک سیال نزدیک دیواره که باعث تولید آنتروپی در جریان سیال می‌شود، وجود انتقال حرارت در اثر اختلاف دما نیز باعث بروز تولید آنتروپی در سیال شده و به این ترتیب از انرژی سیال در جهت تولید کار مفید کاسته خواهد شد.

در عبارت زیر، تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت بی بعد یا در واقع عدد آنتروپی حرارتی مشاهده می‌شود.

$$N_{HT} = \left(\frac{\psi}{1 + \psi\theta} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial\theta}{\partial R} \right)^2 + 4 \left(\frac{1 + 2Br \left(m^2 (1 - \phi^4) - \frac{m}{3} Bi (1 - \phi^3) \right)}{Pe} \right)^2 \right] \quad (۷۶-۲)$$

با توجه به این که عدد پکلت مربوط به سیالات در میکروکانال‌ها در محدوده‌ی مقدار 10^3 و 10^4 می‌باشد، بنابراین سهم انتقال حرارت هدایت محوری در تولید آنتروپی حرارتی ناچیز بوده و سهم عمده‌ی آن ناشی از هدایت در راستای شعاع می‌باشد که در فصول آینده نیز به این نکته اشاره خواهد شد.

۳-۳-۲ بررسی عدد بیژن

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل تولید آنتروپی، عدد بیژن می باشد که معرف نسبت تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت به تولید آنتروپی کلی می باشد که به صورت زیر تعریف می شود.

$$Be = \frac{N_{HT}}{N_s} = \frac{\left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right)^2 + \left(\frac{\psi}{1 + \psi \theta} \right)^2 \frac{1 + 2Br \left(m^2 (1 - \phi^4) - \frac{m}{3} Bi (1 - \phi^3) \right)}{Pe} \right]}{\left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right)^2 + \left(\frac{\psi}{1 + \psi \theta} \right)^2 \frac{1 + 2Br \left(m^2 (1 - \phi^4) - \frac{m}{3} Bi (1 - \phi^3) \right)}{Pe} + Br \left(\frac{\psi}{1 + \psi \theta} \right) \left[\left(\frac{dV}{dR} \right)^2 - \frac{1}{2} Bi \left(\frac{dV}{dR} \right) \right] \right]} \quad (۷۷-۲)$$

در واقع محققان در زمینه های گوناگون نیازمند دانستن این نسبت در نقاط مختلف جریان مورد نظر خود می باشند که نشان دهنده ی سهم آنتروپی اصطکاکی و حرارتی در نقاط مختلف جریان بوده و رشد آنتروپی حرارتی و اصطکاکی را با افزایش پارامترهای مختلف نشان می دهد که در فصول آینده در این مورد نیز به طور مفصل بحث خواهد شد.

۴-۳-۲ بررسی مقادیر متوسط آنتروپی کلی و عدد بیژن

با توجه به نیاز به دانستن مقادیر متوسط آنتروپی کلی و عدد بیژن توسط محققان مختلف، این دو پارامتر در این بخش معرفی خواهند شد.

در حقیقت محققان با بررسی مقادیر متوسط پارامترهای مختلف، به درک مفید و کاملی از

تغییرات آن‌ها خواهند رسید و نیاز مبرمی به دانستن تغییرات مکانی آن‌ها ندارند.

در عبارت زیر، مقدار متوسط تولید آنتروپی کلی مشاهده می‌شود:

$$\bar{N}_s = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} N_s dA_c = 2 \int_0^1 N_s R dR \quad (78-2)$$

با توجه به معادله (78-2) برای بررسی مقدار متوسط آنتروپی کلی نیاز به انتگرال‌گیری از توزیع آنتروپی کلی در راستای شعاع می‌باشد که برای سیال بینگهام با توجه به متفاوت بودن این توزیع در نواحی تسلیم شده و تسلیم نشده، نیاز به انتگرال‌گیری از هر ناحیه به صورت جداگانه می‌باشد. علاوه بر این برای تعیین مقدار متوسط عدد بیژن نیز به صورت زیر عمل خواهیم نمود:

$$\overline{Be} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} Be dA_c = 2 \int_0^1 Be R dR \quad (79-2)$$

در این جا نیز با توجه به معادله (79-2) اقدام به انتگرال‌گیری از توزیع عدد بیژن نموده و با توجه به متفاوت بودن توزیع عدد بیژن در دو ناحیه‌ی تسلیم شده و تسلیم نشده، انتگرال‌گیری در هر ناحیه به صورت مجزا انجام می‌شود که نتایج آن در فصول آینده مورد بررسی جامع قرار خواهند گرفت. به این ترتیب با استفاده از میداین سرعت و دما که برای دو حالت وجود و عدم وجود لغزش سیال روی دیواره به دست آمد، با استفاده از روابط استخراج شده، در فصول آینده به بررسی اثر پارامترهای مختلف روی میداین سرعت، میداین دما و تولید آنتروپی پرداخته خواهد شد.

فصل سوم

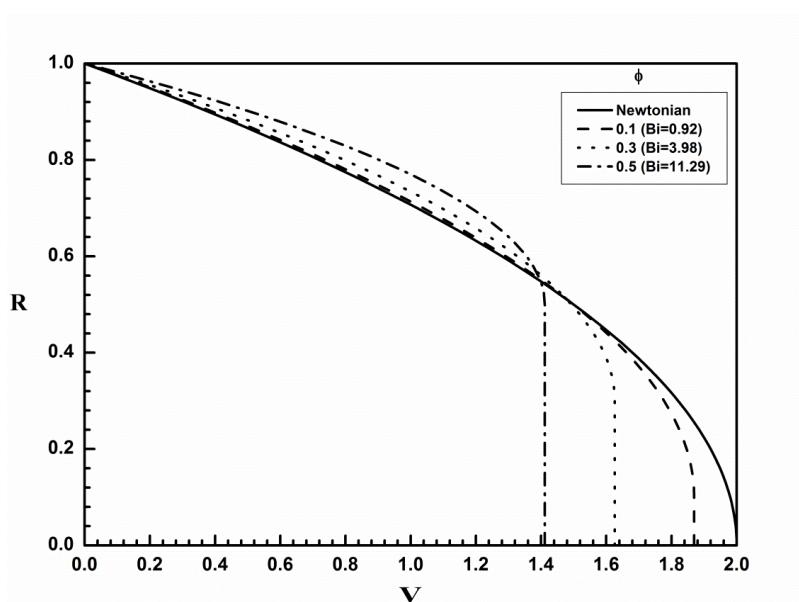
بررسی نتایج کلی در حالت عدم وجود لغزش سیال روی دیواره

- بررسی میدان سرعت
- بررسی میدان دما
- بررسی تولید آنتروپی

شرط عدم لغزش مایعات روی دیواره‌ی میکروکانال‌ها با توجه به تراکم ناپذیر بودن آن‌ها هنوز هم در بسیاری از تحلیل‌ها به کار می‌رود که در فصل اول به برخی از کارهای انجام شده در این زمینه اشاره شد. در این فصل، با توجه به نتایج به دست آمده در فصل گذشته، به تحلیل نتایج میدان سرعت و دما و همچنین تولید آنتروپی سیال بینگهام پرداخته و مقایسه‌ای بین رفتار این سیالات با سیالات نیوتونی انجام شده است.

۱-۳ بررسی میدان سرعت

با توجه به نتایج به دست آمده در فصل گذشته، اکنون به بررسی میدان سرعت بی بعد مسئله در حالت عدم لغزش سیال روی دیواره پرداخته می‌شود. در نمودار زیر، توزیع سرعت بی بعد سیال برای حالت نیوتونی و مقادیر مختلف عدد بینگهام مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۳: نمودار توزیع سرعت بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام

همان‌طور که از شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، ماکزیمم مقدار سرعت سیال که در مرکز میکروکانال رخ می‌دهد، برای سیال نیوتونی بزرگ‌تر از سایر حالات بوده و با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به توضیحات مربوط به فصل گذشته، برای هر سیال با

مقدار ϕ مشخص، از مرکز میکروکانال تا شعاع بی بعد ϕ ، مقدار سرعت ثابت است که مربوط به ناحیه تسلیم نشده بوده و در حقیقت مانند حرکت یک جسم جامد در میکروکانال (جریان پلاگ) می‌باشد.

گفتنی است در حالت عدم لغزش سیال روی دیواره، افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) به مفهوم استفاده از سیالی با تنش تسلیم بالاتر است که می‌توان برای هر جریان با مقدار ϕ مشخص، با توجه به شعاع میکروکانال و اختلاف فشار اعمالی با استفاده از معادله (۲-۳۹) مقدار تنش تسلیم سیال مربوطه را به دست آورد.

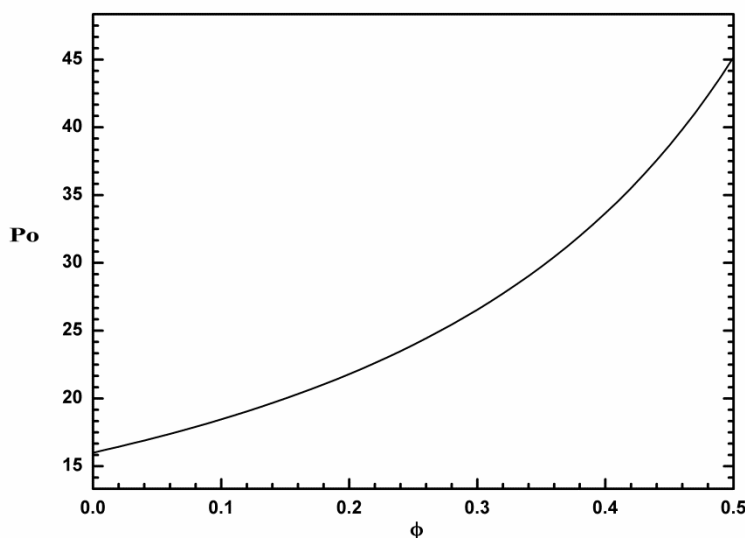
هم‌چنین شایان ذکر است که با توجه به فرض دبی ثابت بودن جریان که در فصل پیش به آن اشاره شد، به منظور ثابت ماندن سطح زیر نمودار توزیع سرعت بی بعد که بیان‌گر دبی جریان سیال می‌باشد، برای تمام حالات در یک شعاع خاص از میکروکانال، با افزایش ϕ ، مقدار سرعت مربوط به ناحیه‌ی تسلیم شده بیشتر است. در حالی که همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، سرعت ماکزیمم سیال در مرکز میکروکانال با افزایش ϕ ، کاهش می‌یابد که این موضوع در تحلیل انتقال حرارت جابجایی و هدایت این نوع سیالات در مرکز میکروکانال و نزدیک دیواره دارای اهمیت زیادی می‌باشد که در بخش تحلیل میدان دما به آن اشاره خواهد شد.

علاوه بر این مشاهده می‌شود که گرادیان سرعت بی بعد سیال روی دیواره $\left(\left(\frac{dV}{dR} \right)_{R=1} \right)$ با

افزایش مقدار شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) افزایش می‌یابد که این نکته در مبحث مربوط به تلفات لزجت روی دیواره در بخش میدان دما مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت. زیرا با افزایش مقدار ϕ و در واقع افزایش عدد بینگهام، اثرات تسلیم مربوط به سیال افزایش یافته و سیال به تنش بیشتری برای جاری شدن نیاز دارد. بنابراین در این حالت، لایه‌های سیال با سرعت کمتری روی هم لغزیده و گرادیان سرعت بیشتری روی دیواره ایجاد می‌شود.

۳-۱-۱ بررسی عدد پوازی

در این بخش به تحلیل مقادیر عدد پوازی که در واقع نشان دهنده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک سیال روی دیواره است، پرداخته شده که نمودار آن در شکل زیر ترسیم شده است.



شکل ۳-۲: نمودار تغییرات عدد پوازی در برابر تغییرات شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ

همان‌طور که از شکل ۳-۲ مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) مقدار اصطکاک سیال روی دیواره افزایش می‌یابد که باعث تولید گرمای بیشتر ناشی از اصطکاک خواهد شد که در بخش آینده به آن اشاره خواهد شد.

بنابراین همان‌گونه که مشخص است سیالات نیوتونی به مراتب، تولید اصطکاک کمتری روی دیواره نسبت به سیالات بینگهام خواهند داشت.

۳-۲ بررسی میدان دما

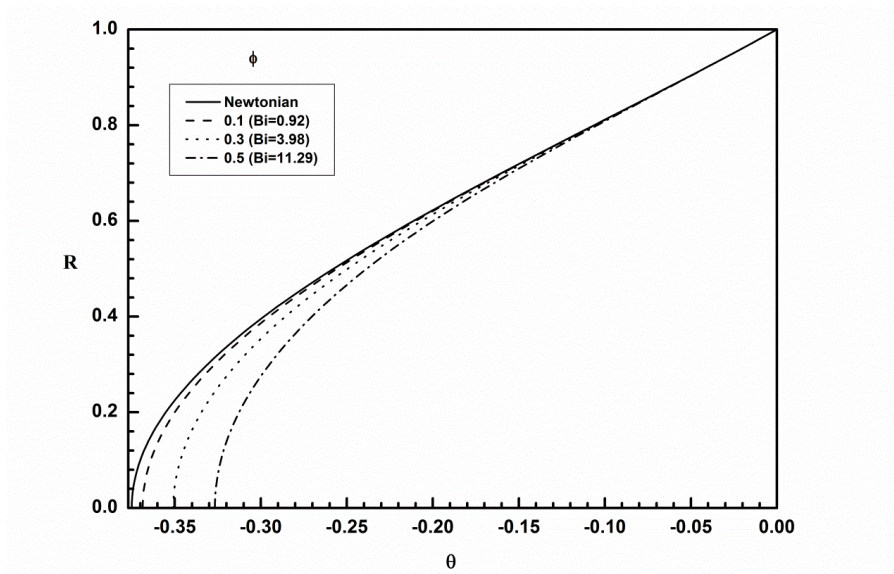
همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، بررسی میدان دما یکی از مهم‌ترین موارد تحلیل ویژگی‌های سیالات می‌باشد که در این بخش به بررسی میدان دمایی مسئله مورد نظر در دو حالت گرمایش و سرمایش دیواره پرداخته خواهد شد.

همان گونه که در ادامه بحث خواهد شد، اعداد برینکمن مثبت مربوط به حالت گرمایش دیواره (انتقال گرما از دیواره به سیال) و اعداد برینکمن منفی مربوط به حالت سرمایش دیواره (انتقال سرما از دیواره به سیال و یا در حقیقت انتقال گرما از سیال به دیواره) می باشد.

۱-۲-۳ بررسی میدان دما در حالت گرمایش

برای بررسی میدان دمای مسئله، ابتدا به تحلیل میدان دما در حالت عدم وجود تلفات لزجت روی دیواره ($Br = 0$) پرداخته شده است که این حالت مستقل از گرمایش یا سرمایش دیواره بوده و سپس با افزایش عدد برینکمن به تحلیل نمودارهای مربوطه پرداخته خواهد شد.

در زیر، نمودار توزیع دمای بی بعد مسئله برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0$ مشاهده می شود.



شکل ۳-۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0$

با توجه به شکل ۳-۳، اولین نکته این است که با توجه به تعریف پارامتر بی بعد $\theta = \frac{T - T_w}{q'' D_h / k}$ ،

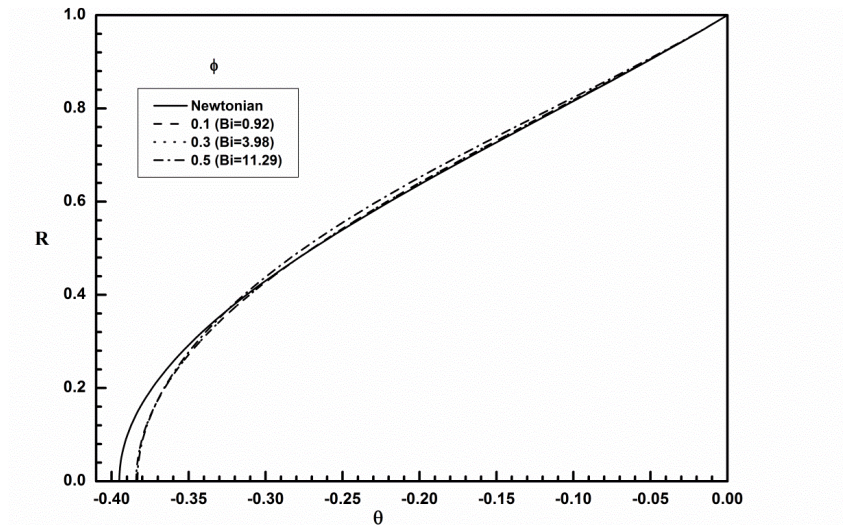
اگر شار وارد به دیواره گرمایشی باشد، دمای دیواره بیشتر از دمای سیال بوده و در واقع گرما از دیواره به سیال در حال انتقال است و با توجه به تعریف پارامتر بی بعد θ ، مقدار آن منفی خواهد بود. اما اگر

شار وارد به دیواره سرمایشی باشد، در این حالت دمای سیال بزرگ‌تر از دمای دیواره بوده و شار سرمایشی از دیواره به سیال در حال انتقال است و یا در حقیقت گرما از سیال به دیواره منتقل خواهد شد که با توجه به منفی در نظر گرفتن شار سرمایشی، مقدار پارامتر بی بعد θ در این حالت نیز منفی خواهد بود. بنابراین همان‌طور که ذکر شد در حالت عدم وجود تلفات لزجت سیال روی دیواره، نمودار توزیع دمای بی بعد مسئله، مستقل از نوع شار وارد به دیواره می‌باشد.

نکته‌ی دیگری که از این نمودار مشاهده می‌شود این است که مقدار قدر مطلق پارامتر بی بعد θ برای سیالات مختلف در نزدیکی دیواره برابر بوده و با نزدیک شدن به مرکز میکروکانال، برای سیال نیوتونی بزرگ‌تر از سیال بینگهام می‌باشد. زیرا با توجه به شکل ۳-۱، ماکزیمم سرعت محوری سیال نیوتونی بیشتر از سایر موارد می‌باشد که همین عامل باعث می‌شود تا انتقال حرارت جابجایی در مرکز میکروکانال در سیال نیوتونی بهتر صورت گیرد و در واقع حرارت ناشی از شار وارد بر دیواره که از طریق انتقال حرارت هدایت به سیال می‌رسد سریع‌تر پخش شده و سیال فرصت کافی برای دریافت گرمای (سرمای) بیشتر را نداشته و به این ترتیب مقدار قدر مطلق θ در مرکز میکروکانال برای سیال نیوتونی، که در واقع نشان دهنده‌ی اختلاف دمای دیواره و سیال است بیشتر از سایر موارد می‌باشد. اما همان‌طور که می‌دانیم در حالت جریان واقعی^۱ سیال، به دلیل گرمای تولیدی ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین سیال و دیواره‌ی میکروکانال، باید برای تحلیل واقعی مسئله به بررسی میدان دما در حالت وجود تلفات لزجت سیال روی دیواره پرداخت.

همان‌گونه که اشاره شد، عدد بی بعد برینکمن در واقع نشان دهنده اثر گرمای تولیدی ناشی از تلفات لزجت روی دیواره می‌باشد که با تغییر این عدد می‌توان شرایط مختلف دمایی را تحلیل نمود. ابتدا نمودار توزیع دمای بی بعد برای حالتی که اثر تلفات لزجت روی دیواره کم و قابل صرف نظر است، در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال در زیر، نمودار توزیع دمای بی بعد برای حالت $Br = 0.01$ رسم شده است.

¹ Real flow

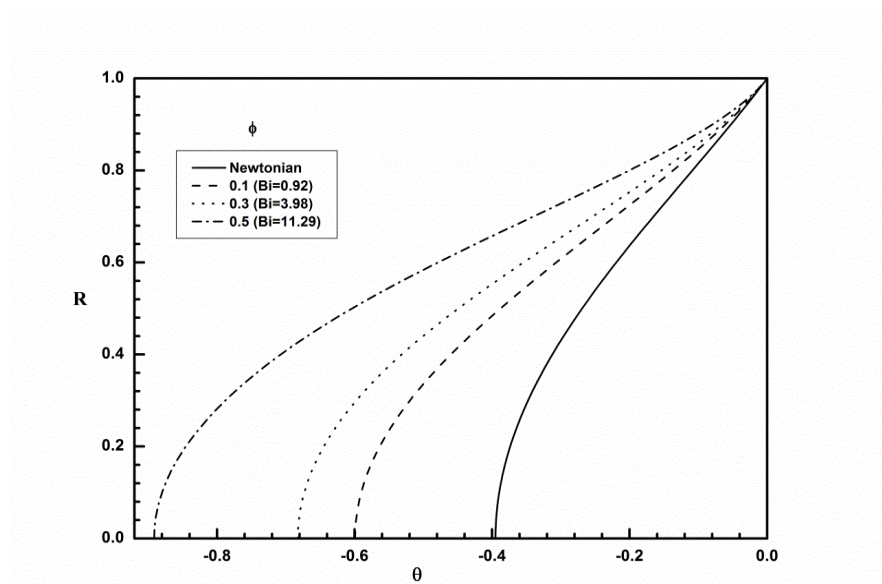


شکل ۳-۴: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.01$

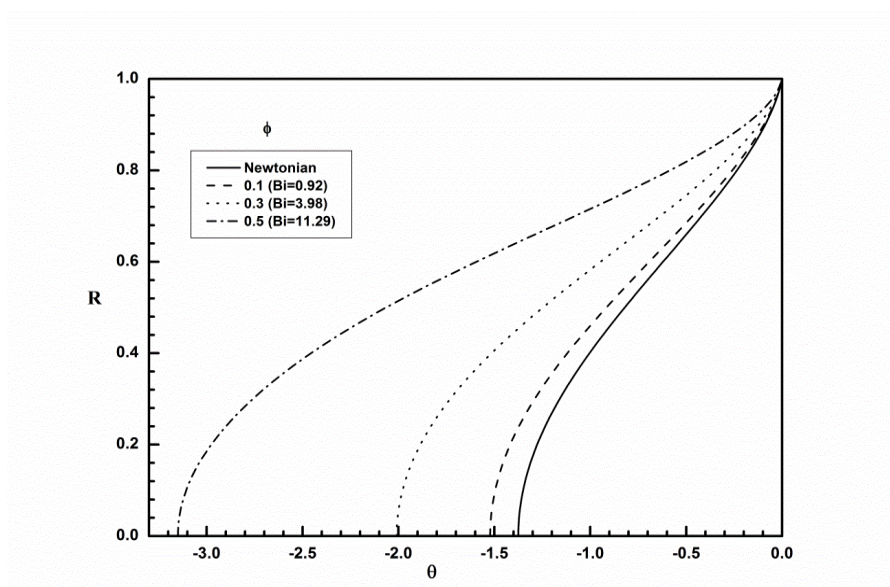
همان‌طور که از شکل ۳-۴ می‌توان مشاهده نمود، با در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت روی دیواره، مقدار قدر مطلق پارامتر بی بعد θ برای تمام حالات افزایش می‌یابد. در واقع این اثر مانند یک منبع گرما عمل می‌کند که باعث می‌شود دمای متوسط سیال افزایش یابد. به این ترتیب ظرفیت سیال برای دریافت گرمای ناشی از شار وارد به دیواره کاهش یافته و این عامل باعث افزایش اختلاف دمای دیواره و سیال عامل خواهد شد.

همان‌گونه که پیش‌تر نیز ذکر شد، با افزایش مقدار شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ)، گرادیان سرعت و در نتیجه مقدار تلفات لزجت روی دیواره افزایش یافته و همان‌طور که از مقایسه‌ی شکل ۳-۳ و شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، افزایش مقدار قدر مطلق θ برای سیالی که عدد بینگهام بزرگ‌تری دارد، بیشتر است. چرا که با افزایش مقدار ϕ یا در واقع افزایش عدد بینگهام، ترم تلفات لزجت افزایش پیدا کرده و باعث بیشتر شدن اختلاف دمای دیواره و سیال عامل خواهد شد.

در زیر، نمودارهای توزیع دمای بی بعد مربوط به حالات $Br = 0.1, 0.5$ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۵: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.1$

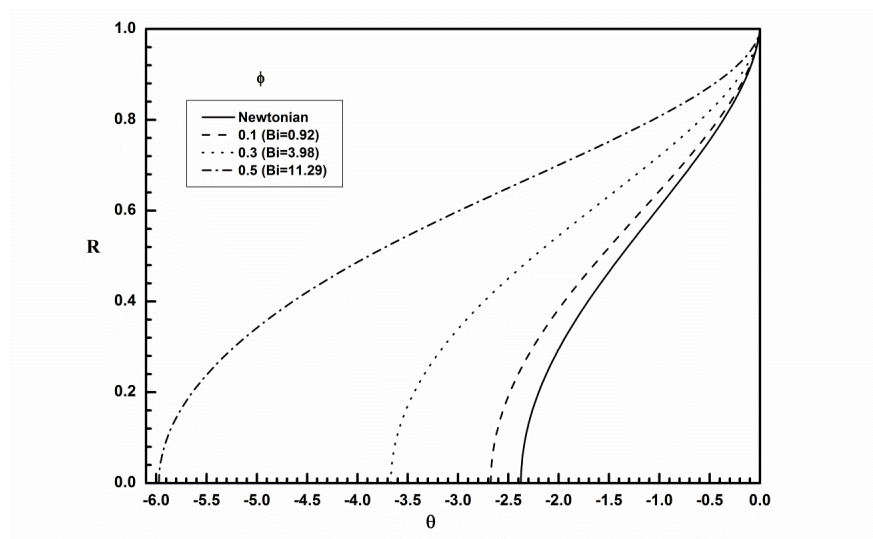


شکل ۳-۶: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.5$

بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد برینکمن (در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت بیشتر روی دیواره)، سیالی که دارای عدد بینگهام بیشتری می‌باشد و در واقع به تنش بیشتری برای جاری شدن نیاز دارد، تلفات لزجت بیشتری روی دیواره تولید کرده و دمای متوسط آن بیشتر از سایر سیالات افزایش می‌یابد. به این ترتیب ظرفیت کمتری برای جذب گرمای وارد بر دیواره داشته و در نهایت اختلاف دمای بیشتری بین دیواره و سیال عامل در نواحی مختلف میکروکانال ایجاد خواهد شد.

علاوه بر این گفتنی است افزایش دمای دیواره در اثر افزایش عدد برینکمن و افزایش تلفات لزجت سیال روی دیواره بیشتر از افزایش دمای متوسط سیال است که این نکته در مبحث مربوط به عدد ناسلت بیشتر بحث خواهد شد. بنابراین، این عامل نیز باعث افزایش اختلاف دمای محلی سیال و دیواره خواهد شد.

در نتیجه، در سیالات نیوتونی به دلیل تولید تلفات لزجت کمتر روی دیواره نسبت به سیالات بینگهام، دمای دیواره در این سیالات افزایش کمتری داشته و همچنین به دلیل ظرفیت بیشتر برای جذب گرما، با جذب درصد بیشتری از شار گرمایی وارد بر دیواره، اختلاف دمای کمتری با دیواره ایجاد کرده و در واقع در زمینه‌ی جذب گرمای وارد بر سطح موفق‌تر از سیالات بینگهام عمل خواهند کرد. همچنین همان‌طور که از نمودار زیر مشاهده می‌شود برای حالت $Br = 1$ با توجه به افزایش اثر تلفات لزجت تولیدی روی دیواره، اختلاف دمای دیواره و سیال عامل در نواحی مختلف میکروکانال به مراتب بیشتر از حالات قبل خواهد شد.

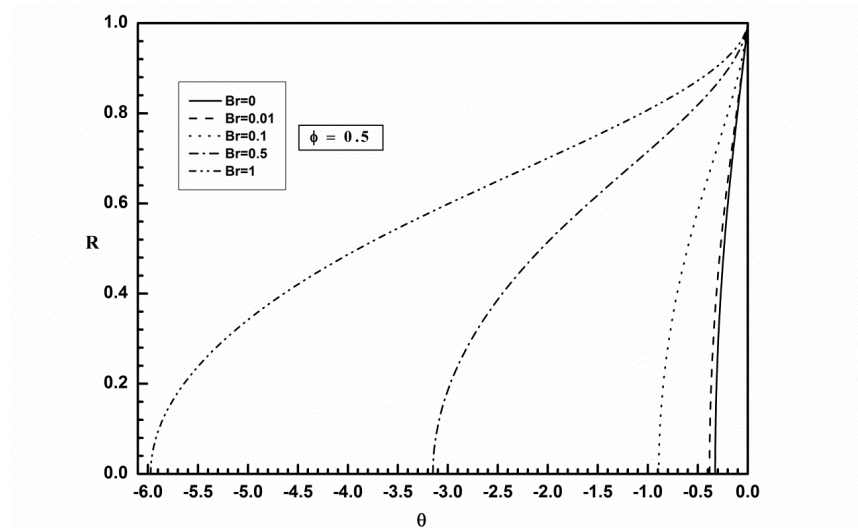


شکل ۳-۷: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 1$

در این‌جا باید به این نکته نیز اشاره شود که تأثیر افزایش عدد برینکمن روی توزیع دمای بی بعد در بررسی‌های آزمایشگاهی تا زمانی که دمای متوسط سیال با دمای دیواره برابر نشود وجود دارد، چرا

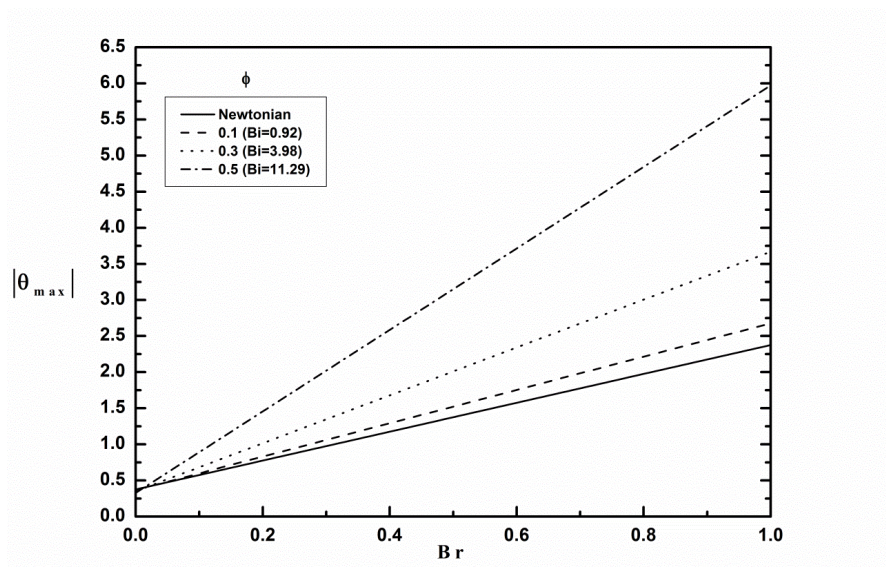
که در این حالت انتقال حرارت متوقف شده و پس از آن با افزایش عدد برینکمن، سیال ظرفیتی برای جذب گرمای دیواره نخواهد داشت. بنابراین در این پژوهش با افزایش عدد برینکمن از منظر ریاضیاتی به تحلیل مسئله پرداخته شده است که در این زمینه در بخش مربوط به عدد ناسلت، توضیحات تکمیلی عنوان خواهد شد.

علاوه بر این، در زیر، اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع دمای بی بعد برای یک ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع مشخص مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۸: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع دمای بی بعد برای یک ϕ مشخص

همان گونه که پیش تر نیز اشاره شد، با توجه به شکل ۳-۸ اثر افزایش عدد برینکمن و در حقیقت افزایش اثر تلفات لزجت روی دیواره، به منزله‌ی وجود یک منبع گرما است که باعث افزایش دمای دیواره و همچنین دمای متوسط سیال شده و به این ترتیب از ظرفیت سیال برای جذب گرمای ناشی از شار وارد بر دیواره کاسته شده و اختلاف دمای بیشتری بین دیواره و سیال عامل ایجاد خواهد شد. اما همان طور که از نمودارهای میدان دمای بی بعد مشاهده شد، از یک مقدار خاص عدد برینکمن به بعد، قدر مطلق ماکزیمم مقدار پارامتر بی بعد θ که مربوط به سیال نیوتونی بود با افزایش اثر تلفات لزجت تغییر کرد که این تغییرات را می‌توان در نموداری که در زیر رسم شده است، به خوبی مشاهده نمود.



شکل ۳-۹: تغییرات ماکزیمم اختلاف دمای دیواره و سیال عامل در حالت گرمایش دیواره

بنابراین همان‌گونه که از شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار عدد برینکمن، اختلاف دمای بین دیواره و سیال عامل افزایش خواهد یافت. بنابراین از آنجایی که در حالت جریان واقعی باید گرمای ناشی از تلفات لزجت تولیدی روی دیواره را در نظر گرفت، برای مواردی که نیاز است دیواره گرمای خود را از دست بدهد بهتر است تا از سیالی که تنش کمتری برای جاری شدن نیاز دارد (سیال با عدد بینگهام کوچک‌تر) استفاده شود تا مقدار بیشتری از گرمای وارد بر دیواره جذب شده و در واقع اختلاف دمای کمتری بین سیال عامل و دیواره به‌وجود آید.

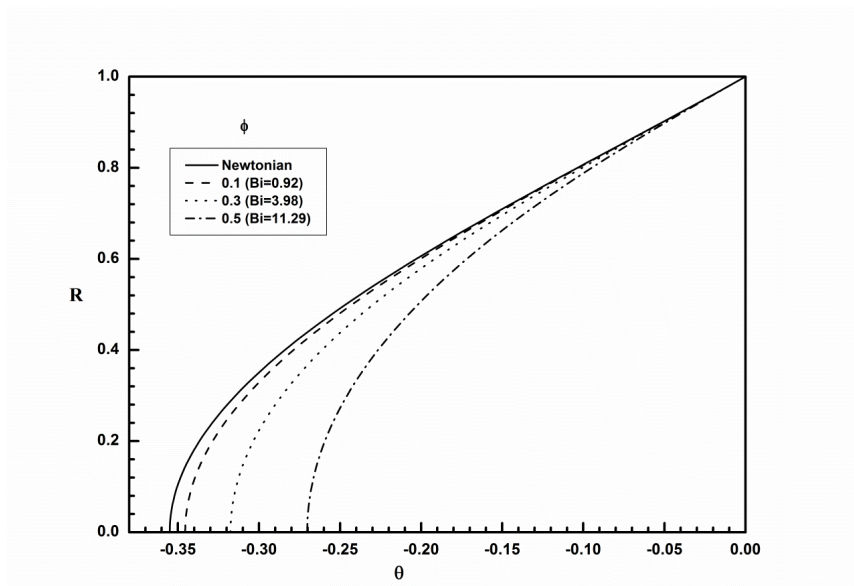
۳-۲-۲ بررسی میدان دما در حالت سرمایش

همان‌طور که پیش از این نیز عنوان شد، در مواردی که شار سرمایشی به دیواره وارد شود و یا در واقع دمای سیال عامل بیشتر از دمای دیواره‌ی میکروکانال باشد، مقادیر مربوط به عدد برینکمن با توجه به تعریف این عدد، منفی خواهد بود که در این بخش به تحلیل میدان دما در حالت سرمایش خواهیم پرداخت.

نکته‌ی قابل توجه در این حالت این است که شار سرمایشی وارد بر دیواره سعی در کاهش دمای متوسط سیال داشته و از طرف دیگر، گرمای ناشی از تلفات لزجت تولیدی روی دیواره باعث افزایش

دمای متوسط سیال خواهد شد. بنابراین در یک مقدار خاص از عدد برینکمن که معروف به عدد برینکمن بحرانی^۱ می‌باشد، این دو اثر با یکدیگر برابر شده و نقطه‌ی تکینی در نمودار ناسلت به وجود خواهد آمد که در بخش مربوطه به آن اشاره خواهد شد. علاوه بر این، با گذر از برینکمن بحرانی، گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال بر شار سرمایشی روی دیواره غالب شده و دمای متوسط سیال شروع به افزایش خواهد نمود [۲۱].

در بخش قبل ابتدا به تحلیل نمودار توزیع دمای بی بعد در حالت عدم وجود تلفات لزجت سیال روی دیواره پرداخته شد که مشاهده شد تغییرات دمای بی بعد در این حالت مستقل از نوع شار وارده می‌باشد. حال برای مقدار تلفات لزجت تولیدی کم و قابل صرف نظر در حالت سرمایش ($Br = -0.01$)، نمودار توزیع دمای بی بعد در زیر رسم شده است.



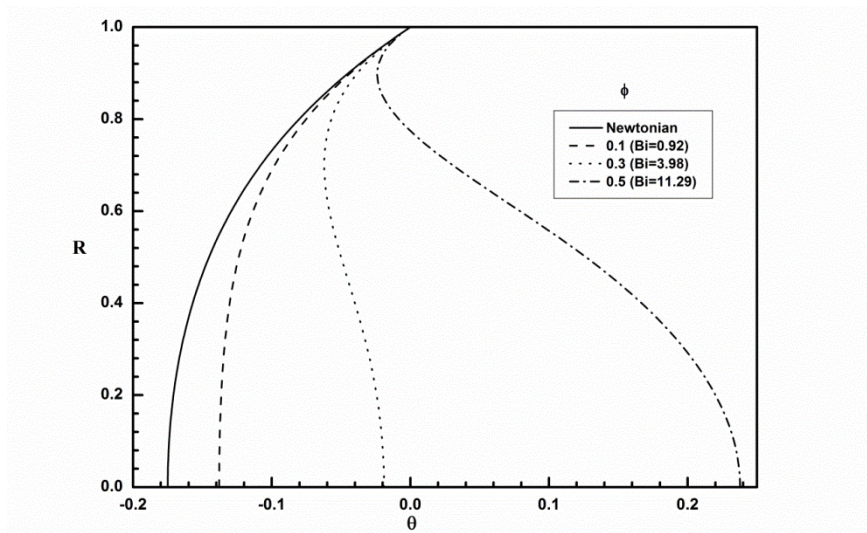
شکل ۳-۱۰: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.01$

همان گونه که از شکل ۳-۱۰ دریافت می‌شود، در این حالت با توجه به این که اثر تلفات لزجت روی دیواره مقدار کمی در نظر گرفته شده است، مقدار پارامتر θ برای تمام سیالات مورد بررسی مانند حالت شار گرمایشی روی دیواره، منفی می‌باشد. زیرا در حالت سرمایش، دمای سیال عامل بیشتر از دمای دیواره بوده و در واقع گرما از سیال به دیواره در حال انتقال است. بنابراین اختلاف

¹ Critical Brinkman number

دمای سیال عامل و دیواره مثبت است که با توجه به تعریف $\theta = \frac{T - T_w}{q'' D_h / k}$ ، صورت کسر مثبت بوده و با توجه به منفی بودن مخرج کسر به دلیل شار سرمایشی، مقدار θ در این مقدار از عدد برینکمن، منفی خواهد بود. بنابراین زمانی که اثر تلفات لزجت تولیدی روی دیواره قابل صرف نظر باشد، اثر شار سرمایشی بر گرمای ناشی از تلفات لزجت غلبه داشته و باعث کاهش دمای متوسط سیال خواهد شد که این موضوع نیز در نمودارهای مربوط به عدد ناسلت بحث خواهد شد. حال به افزایش مقدار عدد برینکمن در جهت منفی پرداخته و به تحلیل نتایج می پردازیم.

در زیر، نمودار توزیع دمای بی بعد برای حالت $Br = -0.1$ ترسیم شده است.



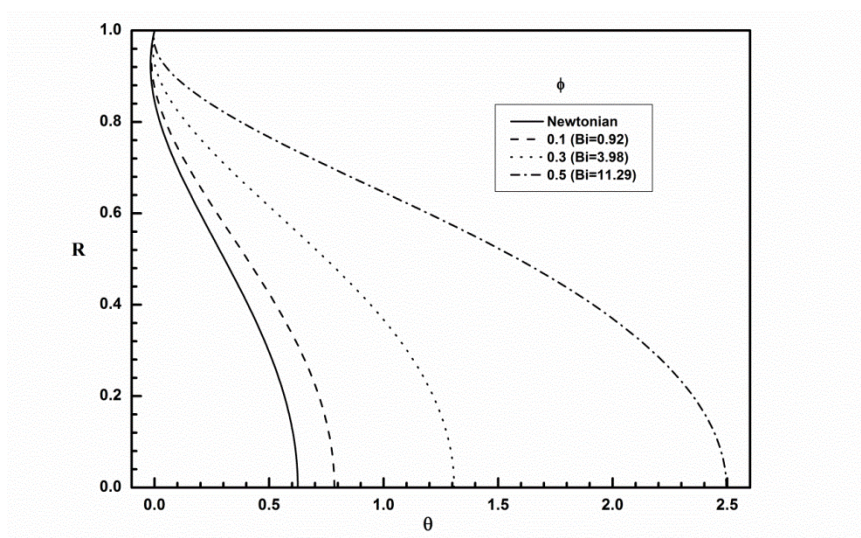
شکل ۳-۱۱: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.1$

با توجه به شکل ۳-۱۱ مشاهده می شود که در این مقدار از عدد برینکمن، برای مقادیر کم عدد بینگهام با توجه به کم بودن تلفات لزجت تولیدی روی دیواره و اعمال بار سرمایشی به آن، در این سیالات دمای سیال عامل همچنان بیشتر از دمای دیواره بوده که مانند حالت قبل باعث انتقال گرما از سیال به دیواره و منفی بودن مقدار θ در آن ها می شود. اما با افزایش مقدار ϕ یا در واقع افزایش عدد بینگهام، مقدار تلفات لزجت تولیدی روی دیواره بیشتر از سیالات دیگر بوده و هرچه از دیواره به سمت مرکز میکروکانال نزدیک می شویم، از آن جا که مقدار گرمای ناشی از تلفات لزجت، کمتر به

سیال می‌رسد، بنابراین دمای سیال عامل کمتر از دمای دیواره خواهد بود که باعث انتقال گرمای ناشی از تلفات لزجت به سیال و افزایش دمای متوسط آن خواهد شد که با توجه به تعریف پارامتر θ ، مقدار این پارامتر برای سیال در نواحی دور از دیواره مثبت خواهد بود.

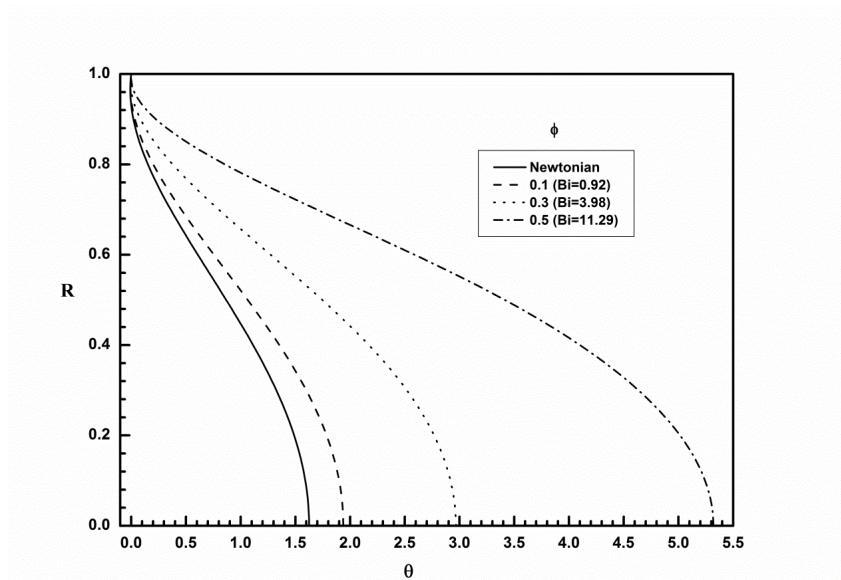
در نتیجه در هر سیالی در یک مقدار خاص از عدد برینکمن، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت بر اثر شار سرمایشی وارد بر دیواره غلبه کرده و باعث افزایش دمای متوسط سیال خواهد شد که این موضوع نیز در بخش مربوط به عدد ناسلت به آن اشاره خواهد شد. در این نمودار نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای یکی از حالات، عدد برینکمن از مقدار بحرانی عبور کرده است.

در زیر، نمودار مربوط به توزیع دمای بی بعد برای حالت $Br = -0.5$ رسم شده است که در این حالت نیز، از آن جا که مقدار تلفات لزجت تولیدی نسبت به حالت قبل بیشتر در نظر گرفته شده است، با توجه به این که هرچه به سمت مرکز میکروکانال نزدیک می‌شویم از مقدار گرمای تولیدی ناشی از تلفات که به سیال می‌رسد کاسته می‌شود، اختلاف دمای سیال عامل و دیواره منفی بوده و با توجه به توضیحات حالات قبل در مورد پارامتر θ ، این پارامتر دارای مقدار مثبت خواهد بود.



شکل ۳-۱۲: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.5$

علاوه بر این، با افزایش عدد برینکمن در جهت منفی، هرچه به سمت مرکز میکروکانال نزدیک می‌شویم، اختلاف دمای بیشتری بین سیال عامل و دیواره ایجاد می‌شود که باعث گسترده‌تر شدن توزیع دما در این حالت خواهد شد. نمودار توزیع دمای بی بعد برای حالتی که $Br = -1$ می‌باشد، در زیر رسم شده است.

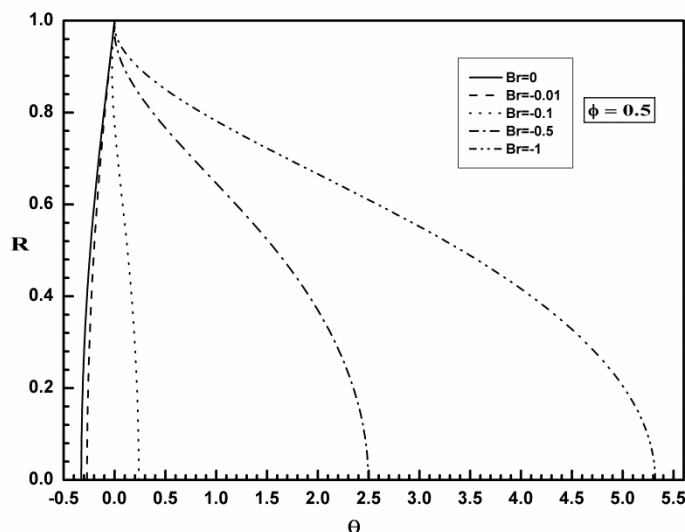


شکل ۳-۱۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -1$

گفتنی است نکته قابل توجه در نمودارهای توزیع دمای بی بعد مربوط به حالت سرمایش این است که مقدار پارامتر بی بعد θ برای تمام حالات عدد برینکمن، در نزدیک دیواره منفی است. چرا که در حالت سرمایش، دمای سیال نزدیک دیواره همیشه بیشتر از دمای دیواره می‌باشد. زیرا دیواره از یک طرف در معرض مستقیم شار سرمایشی بوده و از طرف دیگر در حال گرم شدن در اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت می‌باشد، اما سیال نزدیک دیواره در اثر گرمای ناشی از تلفات روی دیواره گرم شده و اثر کمتری از شار سرمایشی وارد بر دیواره به آن می‌رسد و با توجه به توضیحات مربوط به θ ، این پارامتر برای تمام حالات در نزدیک دیواره منفی خواهد بود.

همچنین در زیر، نمودار تغییرات توزیع دمای بی بعد برای یک ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع مشخص در برابر افزایش عدد برینکمن در جهت منفی مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است، با افزایش عدد برینکمن در جهت منفی و گذر از عدد برینکمن بحرانی، اثر گرمای ناشی از تلفات

لزجت بر اثر شار سرمایشی روی دیواره غلبه کرده و دمای متوسط سیال به جای کاهش شروع به افزایش می‌کند.

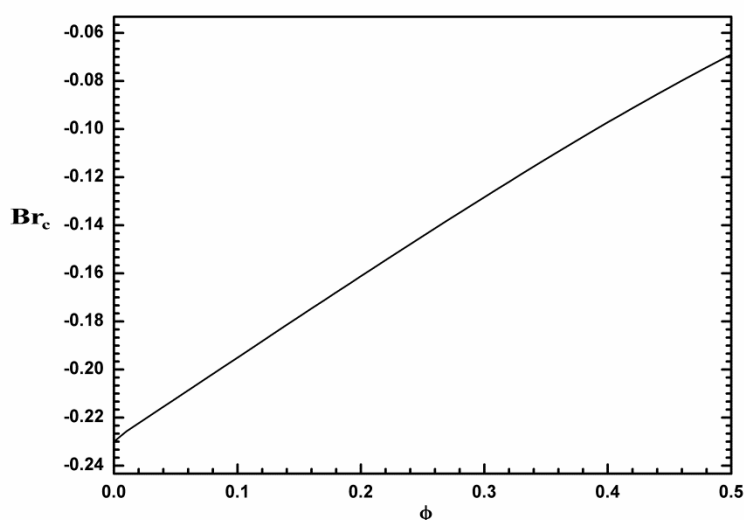


شکل ۳-۱۴: اثر افزایش عدد برینکمن در جهت منفی روی توزیع دمای بی بعد برای یک ϕ مشخص

همان‌طور که عنوان شد، در یک مقدار مشخص از عدد برینکمن که معروف به عدد برینکمن بحرانی می‌باشد، جهت انتقال حرارت معکوس شده و اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت بر شار سرمایشی وارد بر دیواره غلبه می‌کند.

در زیر، نمودار تغییرات مربوط به عدد برینکمن بحرانی در برابر افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) مشاهده می‌شود که مشخص است هر سیالی دارای یک برینکمن بحرانی مشخص است و با افزایش (ϕ) از آن‌جا که مقدار تلفات لزجت مربوط به سیال بیشتر می‌شود، برینکمن بحرانی دارای مقدار کمتری می‌باشد.

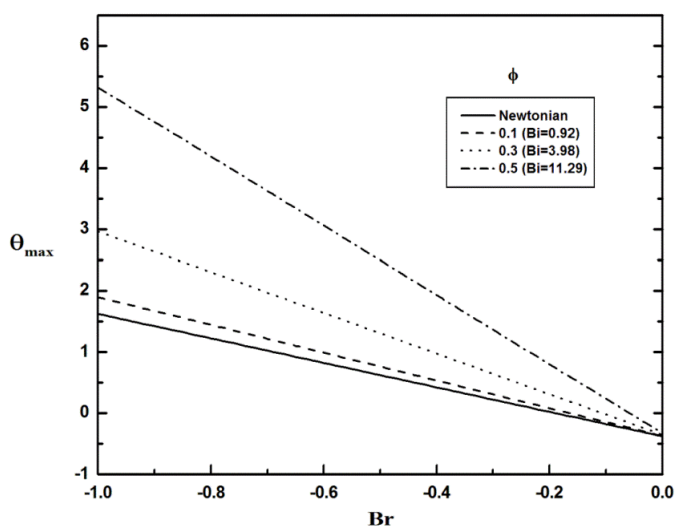
همان‌گونه که عنوان شد، این مقادیر برینکمن بحرانی باعث ایجاد نقطه‌ی تکین در نمودار ناسلت می‌شوند که در بخش مربوطه به آن پرداخته خواهد شد.



شکل ۳-۱۵: نمودار تغییرات عدد برینکمن بحرانی در برابر تغییرات شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ

هم‌چنین در این جا نیز تغییرات دمای بی بعد ماکزیمم بر حسب عدد برینکمن رسم شده است

که در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱۶: نمودار تغییرات ماکزیمم اختلاف دمای دیواره و سیال عامل در حالت سرمایش سطح

همان‌طور که از شکل ۳-۱۶ دریافت می‌شود، با افزایش عدد برینکمن در جهت منفی، سیالی که

تلفات لزجت بیشتری روی دیواره تولید می‌کند، اختلاف دمای بیشتری بین سیال عامل و دیواره در

مرکز میکروکانال در آن مشاهده می‌شود.

همچنین با گذر از مقدار برینکمن بحرانی، همان طور که مشاهده می شود مقدار ماکزیمم قدر مطلق θ از منفی به مثبت تغییر علامت داده و باعث افزایش دمای متوسط سیال به جای کاهش آن می شود.

بنابراین در بررسی های عددی و آزمایشگاهی جهت خنک کاری سیالات توسط شار سرمایشی وارد به دیواره باید توجه داشت تا مقدار تلفات لزجت تولیدی روی دیواره با توجه به انتخاب سیال مورد نظر، از یک مقدار مشخص بیشتر نباشد تا اثر شار سرمایشی بر گرمای ناشی از تلفات لزجت غلبه داشته و دمای متوسط سیال شروع به کاهش کند. هرچند در بررسی های آزمایشگاهی، افزایش عدد برینکمن در یک محدوده ی خاص می تواند باشد.

۳-۲-۳ بررسی گرادیان دما در حالت گرمایش

یکی از موارد مهم در تحلیل دمایی سیالات، اطلاع از تغییرات گرادیان دمای شعاعی بی بعد سیال می باشد که با توجه به پارامترهای بی بعد تعریف شده در این مسئله، مشخص می کند سیال در چه مناطقی تحت تأثیر انتقال حرارت هدایتی بوده و در چه مناطقی انتقال حرارت جابجایی حاکم می باشد. در این بخش به بحث در خصوص تغییرات گرادیان دمای شعاعی بی بعد در سیالات نیوتونی و بینگهام برای حالات مختلف عدد برینکمن پرداخته می شود.

به طور کلی باید عنوان نمود، گرادیان دمای شعاعی بی بعد با توجه به پارامترهای بی بعد تعریف شده، در حقیقت مشخص کننده ی اثر انتقال حرارت هدایتی ناشی از شار وارد به دیواره است که از طریق دیفیوژن^۱ به سیال نزدیک دیواره منتقل می شود. با توجه به وارد شدن شار به دیواره، اثر انتقال حرارت هدایتی با توجه به پایین بودن سرعت سیال در نزدیکی دیواره، در این نواحی بیشتر است و حرارت وارد به دیواره از طریق دیفیوژن به عمق سیال نفوذ می کند.

با دور شدن بیشتر از دیواره و رسیدن به مرکز میکروکانال، به تدریج سرعت محوری سیال افزایش یافته و در این نواحی انتقال حرارت جابجایی در سیال حاکم شده و از وقوع انتقال حرارت

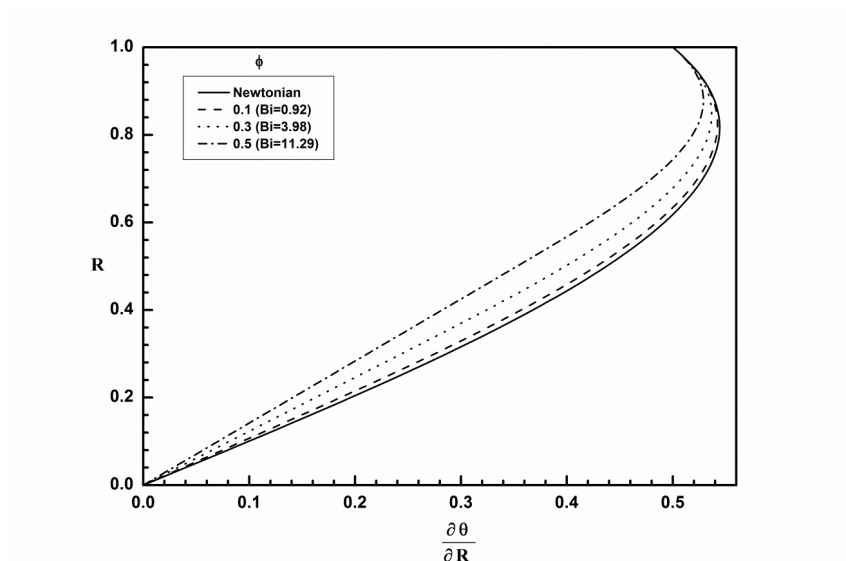
¹ Diffusion

هدایتی و دیفیوژن کاسته می‌شود.

به این ترتیب می‌توان برای هر سیالی نسبت وقوع انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی سیال در میکروکانال را مشخص کرد که این اثر توسط عدد ناسلت بیان می‌شود که در بخش مربوطه به آن پرداخته خواهد شد.

همان‌طور که اشاره شد، در حالت عدم وجود تلفات لزجت سیال روی دیواره، تنها گرمای ناشی از شار وارد به دیواره به سیال می‌رسد که نمودار گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای این حالت در زیر مشاهده می‌شود.

البته گفتنی است که مطابق توضیحات فصل قبل، با توجه به شرایط مرزی اعمال شده، مقدار گرادیان دمای شعاعی بی بعد روی دیواره و در مرکز میکروکانال برای تمام حالات به ترتیب دارای مقدار ۰/۵ و صفر می‌باشد.



شکل ۳-۱۷: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0$

همان‌طور که از مشاهده‌ی شکل ۳-۱۷ دریافت می‌شود، مطابق انتظار، انتقال حرارت هدایتی در نزدیکی دیواره حاکم است و با دور شدن از دیواره تا یک شعاع مشخص با توجه به افزایش حرکت جنبشی سیالات، انتقال حرارت از طریق دیفیوژن افزایش یافته و از این شعاع خاص تا مرکز میکروکانال، با افزایش سرعت محوری سیال، به تدریج انتقال حرارت جابجایی در سیال حاکم شده و

از حرارت رسیده به سیال ناشی از شار توسط هدایت کاسته شده تا جایی که این اثر در مرکز میکروکانال به صفر خواهد رسید.

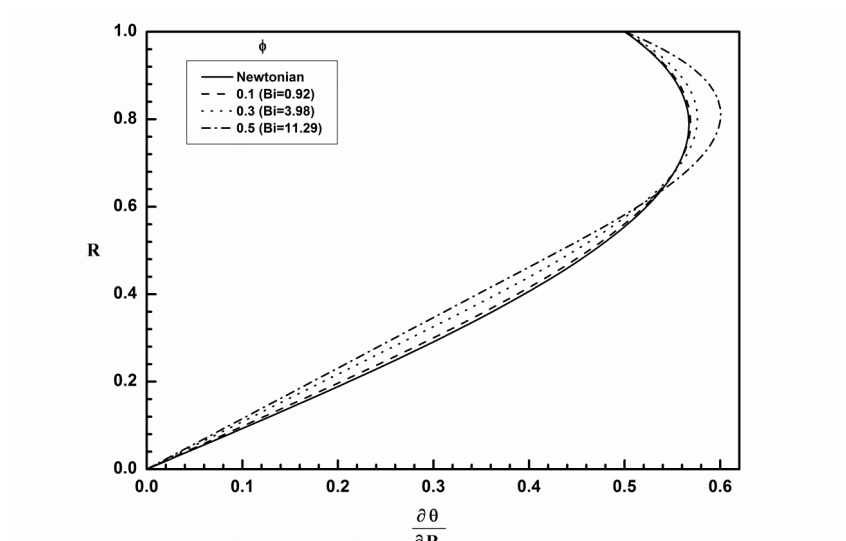
گفتنی است در شعاع مذکور که اثر انتقال حرارت هدایتی شروع به کاهش می‌کند، انحنای نمودار توزیع دمای بی بعد مربوطه نیز عوض می‌شود که می‌تواند بیان‌گر حاکم شدن انتقال حرارت جابجایی از این شعاع تا مرکز میکروکانال باشد که این انحنا در نمودارهای توزیع دمای بی بعد با وجود تلفات لزجت مشهودتر می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، این شعاع را می‌توان با مشتق‌گیری از گرادیان دمای بی بعد نسبت به شعاع بی بعد و برابر صفر قرار دادن عبارت به‌دست آمده تعیین نمود.

علاوه بر این مشاهده می‌شود که در حالت عدم وجود تلفات لزجت روی دیواره، انتقال حرارت هدایتی در سیالات نیوتونی در نزدیک دیواره بیشتر از سیالات بینگهام صورت می‌پذیرد. زیرا با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ)، سرعت سیال نزدیک دیواره بیشتر بوده و انتقال حرارت جابجایی سریع‌تر حاکم می‌شود.

گفتنی است از آن‌جا که انتقال حرارت جابجایی مجموع دو اثر دیفیوژن (پخش حرارت ناشی از حرکت جنبشی مولکول‌ها) در نزدیکی دیواره و ادوکشن¹ (انتقال حرارت ناشی از حرکت کپه‌ای سیال) در نواحی دور تر از دیواره می‌باشد، می‌توان توضیحات فوق را با توجه به این دو اثر نیز توضیح داد که در این پژوهش، از دیفیوژن به‌عنوان انتقال حرارت هدایتی و از ادوکشن به‌عنوان انتقال حرارت جابجایی یاد شده است.

اما همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، برای بررسی رفتار واقعی دمای سیال، باید اثر تلفات لزجت روی دیواره در نظر گرفته شود که در زیر، تغییرات گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای حالت $Br = 0.01$ مشاهده می‌شود.

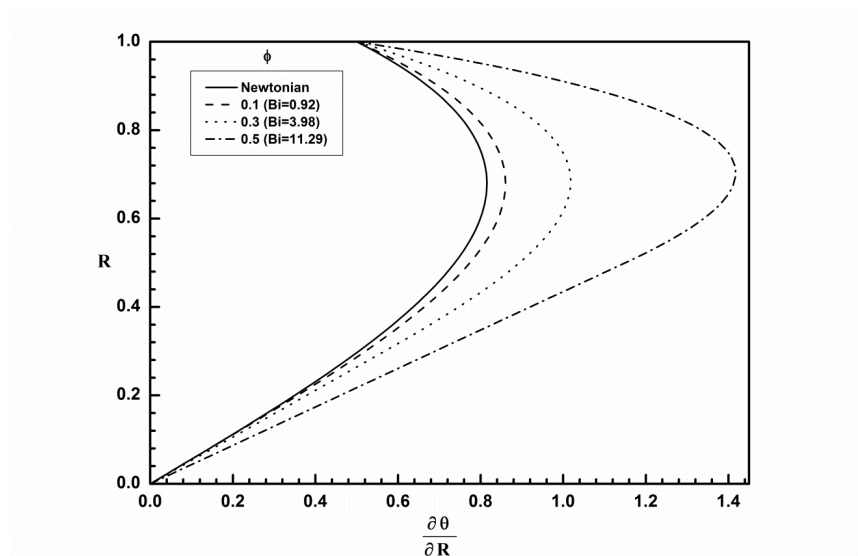
¹ Advection



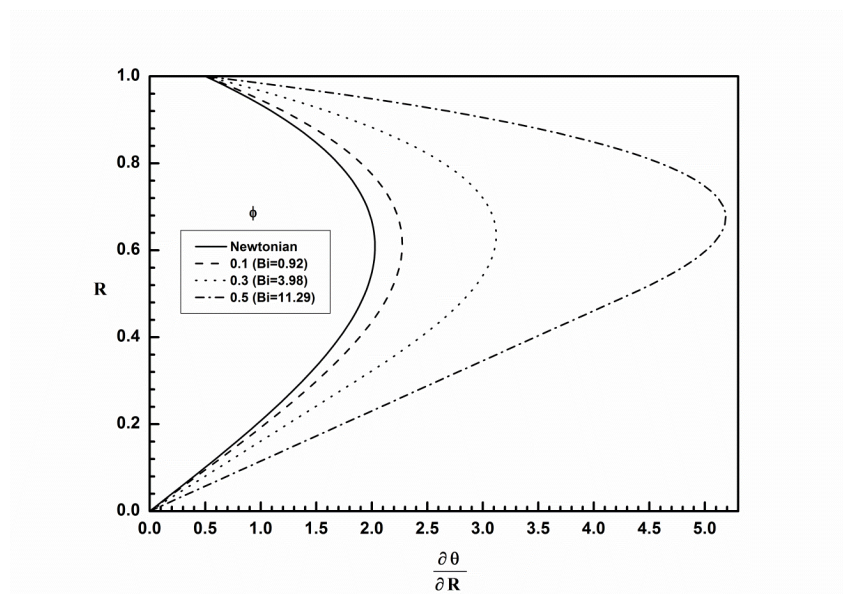
شکل ۳-۱۸: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.01$

با توجه به شکل ۳-۱۸ به خوبی مشاهده می‌شود که سیالی که دارای تولید گرمای ناشی از تلفات لزجت بیشتری نزدیک دیواره است، دارای انتقال حرارت هدایتی بیشتری نزدیک دیواره بوده که باعث بالا رفتن دمای دیواره و همچنین افزایش دمای متوسط سیال و کاهش ظرفیت آن برای جذب گرمای ناشی از شار وارد به دیواره می‌شود که در بخش گذشته به آن اشاره شد.

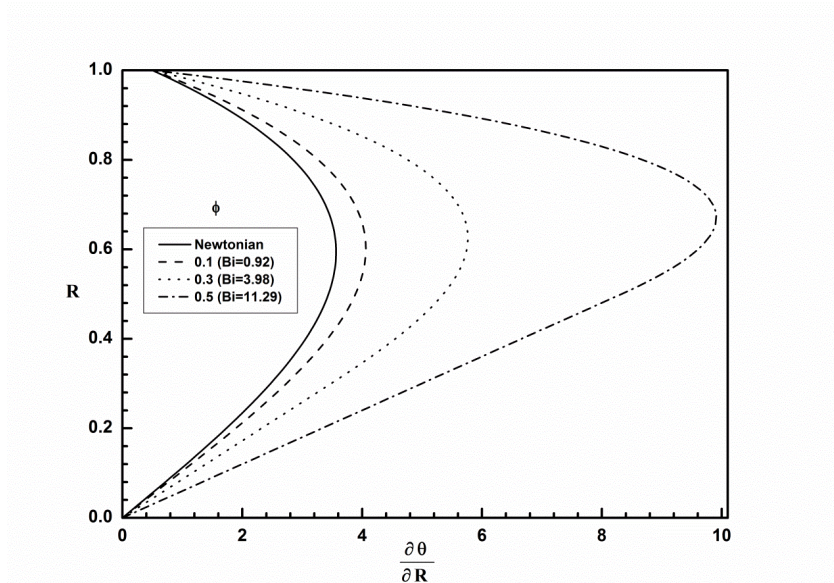
با افزایش بیشتر عدد برینکمن و در واقع افزایش گرمای ناشی از تلفات لزجت روی دیواره مشاهده می‌شود که هرچه سیال تلفات لزجت بیشتری روی دیواره داشته باشد، تولید گرمای بیشتری کرده و با اثرات شار حرارتی وارد بر دیواره ترکیب شده و به عمق سیال نفوذ می‌کند که در واقع نشان دهنده وقوع انتقال حرارت هدایتی با وجود تلفات لزجت سیال در نزدیکی دیواره‌ی میکروکانال است که در نمودارهای زیر که برای حالات $Br = 0.1, 0.5, 1$ می‌باشد، این اثر را می‌توان به خوبی مشاهده نمود.



شکل ۳-۱۹: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.1$



شکل ۳-۲۰: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.5$

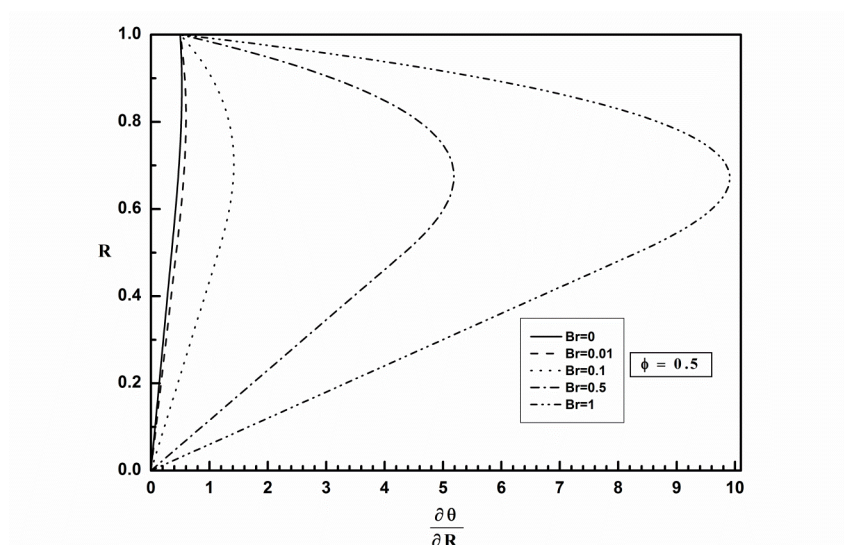


شکل ۳-۲۱: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 1$

همان گونه که مشاهده می شود در حالت انتقال حرارت هدایتی با وجود تلفات لزجت، شعاعی که در آن اثرات انتقال حرارت جابجایی بر میدان دمای سیال حاکم می شود به سمت مرکز میکروکانال نزدیک تر می شود که این تغییرات در نمودارهای توزیع دمای بی بعد سیال که پیش تر به آن اشاره شد و همچنین در نمودارهای عدد ناسلت مربوطه که در بخش آینده به آن اشاره خواهد شد نیز به خوبی قابل مشاهده می باشد.

در نمودار زیر نیز برای یک ناحیه ی جریان پلاگ با شعاع مشخص، تغییرات گرادیان دمای شعاعی بی بعد در اثر افزایش عدد برینکمن مشاهده می شود که نتیجه می شود با افزایش اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت روی دیواره، محدوده ای از سیال که در آن انتقال حرارت هدایتی رخ می دهد افزایش یافته و باعث بالا رفتن دمای متوسط سیال خواهد شد.

در واقع همان طور که عنوان شد، گرمای ناشی از تلفات لزجت روی دیواره مانند یک منبع انرژی عمل کرده که باعث افزایش دمای دیواره و همچنین افزایش دمای متوسط سیال عامل خواهد شد و در نتیجه سیال ظرفیت کمتری برای دریافت گرمای ناشی از شار وارد به دیواره داشته و اختلاف دمای بیشتری بین سیال عامل و دیواره ایجاد خواهد شد.

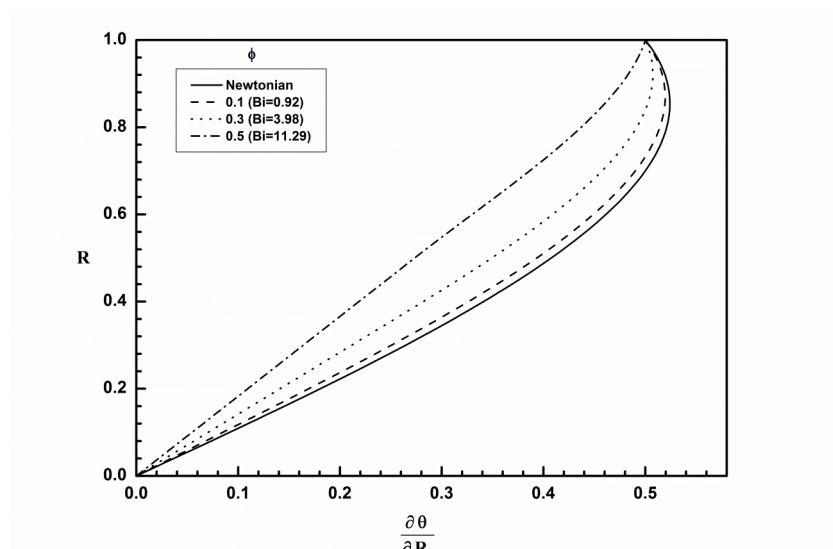


شکل ۳-۲۲: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای یک ϕ مشخص

بنابراین با توجه به شکل ۳-۲۲ نتیجه می‌شود که با افزایش مقدار تلفات لزجت، اثرات هدایت و تلفات لزجت در نزدیکی دیواره بیشتر ترکیب شده و حرارت بیشتری به سیال می‌رسد.

۳-۲-۴ بررسی گرادیان دما در حالت سرمایش

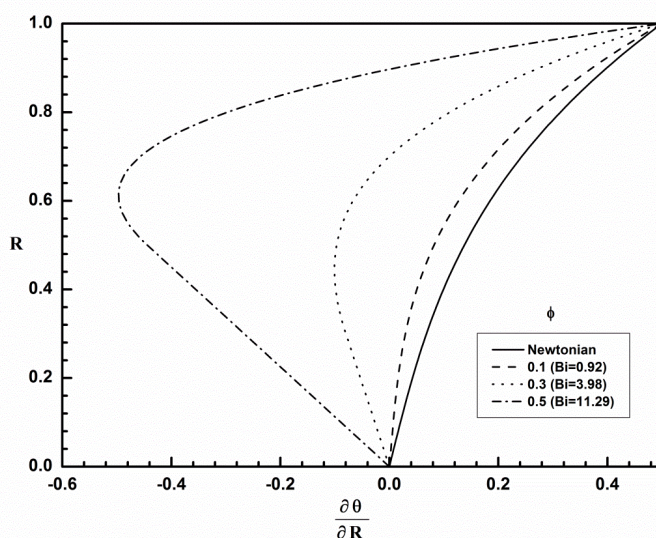
با توجه به توضیحات بخش قبل، همان‌طور که مشاهده شد در حالت سرمایش با افزایش عدد برینکمن در جهت منفی و رسیدن به یک مقدار بحرانی، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت بر اثر شار سرمایشی وارد بر دیواره غلبه کرده و دمای متوسط سیال به جای کاهش شروع به افزایش خواهد نمود. در این حالت، ابتدا به تحلیل گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر کوچک عدد برینکمن خواهیم پرداخت.



شکل ۳-۲۳: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.01$

با توجه به شکل ۳-۲۳، از آن جا که هیچ کدام از سیالات مورد بررسی در این حالت در محدوده‌ی برینکمن بحرانی مربوط به خود قرار ندارند (با توجه به شکل ۳-۱۵)، اثر شار سرمایشی وارد بر دیواره بر گرمای ناشی از تلفات لزجت غلبه داشته و دمای متوسط سیال در حال کاهش می‌باشد. با توجه به شرط مرزی تعریف شده روی دیواره، گرادیان دمای شعاعی بی بعد در این نقطه برابر $0/5$ بوده و اگر اثر شار سرمایشی بر اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت غلبه داشته باشد مقادیر این پارامتر مثبت و در حالت عکس منفی خواهد بود.

با افزایش بیشتر عدد برینکمن در جهت منفی در حالت $Br = -0.1$ ، با توجه به شکل ۳-۱۵ برخی از سیالات مورد بررسی در این حالت از برینکمن بحرانی عبور کرده و برخی دیگر در حال نزدیک شدن به این مقدار بحرانی می‌باشند که نمودار مربوطه در زیر مشاهده می‌شود.



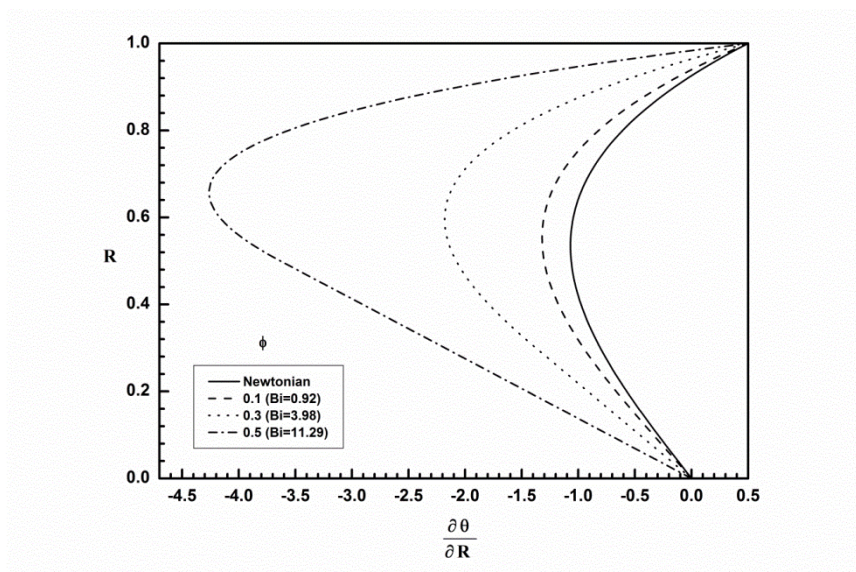
شکل ۳-۲۴: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.1$

با توجه به شکل ۳-۲۴، همان‌طور که مشاهده می‌شود سیال با $\phi = 0.5$ در این حالت از مقدار برینکمن بحرانی عبور کرده و گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای آن تغییر جهت داده و در جهت منفی در حال افزایش است.

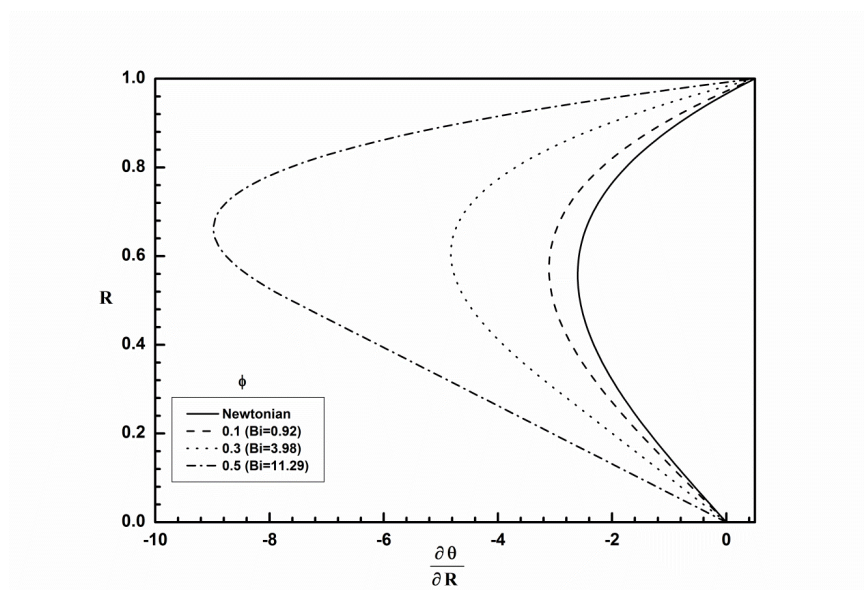
برای سیالات دیگر نیز با توجه به نزدیک شدن به مقادیر برینکمن بحرانی مربوطه، نمودار گرادیان دمای شعاعی بی بعد در حال تغییر جهت بوده و به سمت علامت منفی متمایل می‌شود که با مشاهده نمودارهای مربوط به توزیع دمای بی بعد مربوطه اثرات مذکور در آن‌جا نیز به‌خوبی قابل مشاهده می‌باشند.

زیرا در واقع با نزدیک شدن یا گذر از مقدار برینکمن بحرانی جهت انتقال حرارت معکوس شده و دمای متوسط سیال به‌جای کاهش شروع به افزایش می‌کند که تغییر جهت نمودارهای گرادیان دمای شعاعی بی بعد نیز به همین دلیل می‌باشد.

با افزایش بیشتر مقدار عدد برینکمن در جهت منفی، سیالات مورد نظر از عدد برینکمن بحرانی مربوطه عبور کرده و اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت به‌طور کامل بر اثر شار سرمایشی وارد بر دیواره غلبه می‌کند. در زیر، نمودارهای مربوط به گرادیان دمای شعاعی بی بعد در حالات $Br = -0.5, -1$ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۵: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.5$

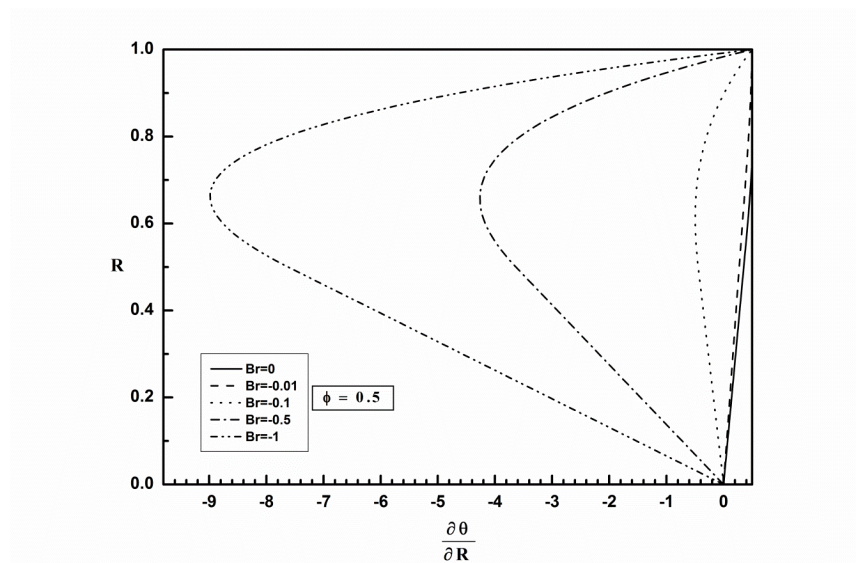


شکل ۳-۲۶: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -1$

در این جا نیز اثر هدایت ناشی از شار سرمایشی وارد بر دیواره و گرمای ناشی از تلفات لزجت در نزدیکی دیواره با یکدیگر ترکیب شده و به عمق سیال نفوذ می کنند که همان گونه که مشاهده شد با توجه به میزان در نظر گرفتن اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت، دمای متوسط سیال می تواند در حال کاهش یا افزایش باشد که در حالات مختلف مورد بحث قرار گرفت.

نکته قابل ذکر این است که با توجه به نمودارهای گرادیان دمای شعاعی بی بعد، مقدار این پارامتر در نزدیکی دیواره در تمام حالات مثبت است که مشخص کننده این موضوع است که دمای سیال نزدیک دیواره بیشتر از دمای دیواره بوده و دمای سیال در این منطقه در حال کاهش می باشد که در نمودارهای توزیع دمای بی بعد نیز به این نکته اشاره شد.

در نمودار زیر نیز، اثر افزایش عدد برینکمن در جهت منفی برای یک ناحیه ی جریان پلاگ با شعاع مشخص مشاهده می شود.



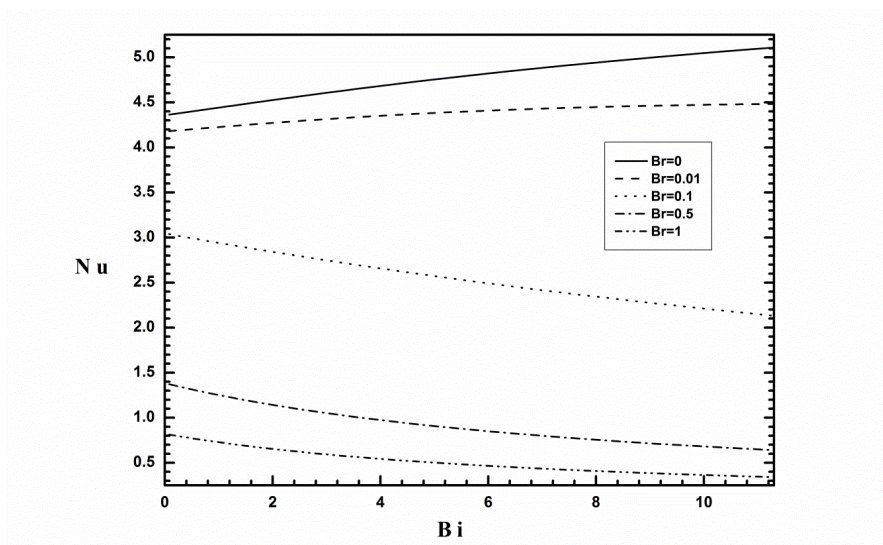
شکل ۳-۲۷: اثر افزایش عدد برینکمن در جهت منفی روی توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای یک ϕ مشخص

با توجه به شکل ۳-۲۷ مواردی که در تحلیل نمودارهای پیشین ذکر شد، از جمله غالب بودن اثر شار سرمایشی بر گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال در مقادیر کمتر از برینکمن بحرانی، عبور از مقدار برینکمن بحرانی و حاکم شدن اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال بر شار سرمایشی و همچنین محدوده ی وقوع انتقال حرارت هدایتی با وجود تلفات لزجت در آن مشاهده می شود.

۳-۲-۵ بررسی عدد ناسلت در حالت گرمایش

در این قسمت به تحلیل عدد ناسلت که بیان گر نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی است پرداخته می شود.

ابتدا به تحلیل تغییرات این عدد در برابر افزایش شعاع بی بعد ناحیه ی جریان پلاگ (ϕ) یا در حقیقت افزایش عدد بینگهام خواهیم پرداخت که نمودار مربوطه در زیر مشاهده می شود.



شکل ۳-۲۸: تغییرات عدد ناسلت در برابر عدد بینگهام برای مقادیر مختلف عدد برینکمن

همان گونه که از شکل ۳-۲۸ مشاهده می شود در حالات مختلف وجود اثر تلفات لزجت روی دیواره تحلیل متفاوتی وجود دارد که در مورد آن بحث خواهد شد.

همان طور که مشخص است محور افقی، تغییرات عدد بینگهام از بینگهام صفر مربوط به سیال نیوتونی تا عدد بینگهام مربوط به $\phi = 0.5$ را نشان می دهد.

در مقادیر کم و قابل صرف نظر مربوط به عدد برینکمن ($Br = 0, 0.01$)، از آن جا که اثر تلفات لزجت روی دیواره ناچیز است، مقدار مربوط به عدد ناسلت برای سیال نیوتونی کمتر از مقدار مربوط به سیال بینگهام بوده و با افزایش عدد بینگهام شاهد رشد عدد ناسلت می باشیم. زیرا در این حالات با توجه به تحلیل های مربوط به توزیع دمای بی بعد که در بخش گذشته به آن اشاره شد، با افزایش شعاع بی بعد ناحیه ی جریان پلاگ (ϕ)، سرعت محوری سیال کمتر بوده و انتقال حرارت جابجایی

ضعیف تر صورت گرفته و به این ترتیب سیال فرصت بیشتری برای جذب گرمای وارد بر دیواره دارد. بنابراین دمای متوسط آن بالا رفته و از اختلاف دمای متوسط سیال و دیواره کاسته می شود. از این رو

با توجه به تعریف عدد ناسلت $(Nu = -1/\theta_m)$ و دمای متوسط $\left(\theta_m = \frac{T_m - T_w}{q'' D_h / k} \right)$ عدد ناسلت

افزایش خواهد یافت. در واقع در این حالت با افزایش ϕ ، به دلیل قابل صرف نظر بودن گرمای ناشی از تلفات روی دیواره، دمای دیواره در اثر تلفات لزجت افزایش قابل توجهی نداشته و سیال با جذب درصد بیشتری از گرمای وارد بر دیواره، دمای متوسطش افزایش یافته و اختلاف کمتری بین دمای متوسط سیال عامل و دیواره ایجاد خواهد شد.

اما در جریان واقعی با افزایش عدد برینکمن، از آن جا که با افزایش ϕ اثر تلفات لزجت روی دیواره افزایش یافته و در واقع مانند یک منبع گرما باعث افزایش دمای متوسط سیال می شود، از ظرفیت سیال برای جذب گرمای وارد بر دیواره کاسته شده و دمای دیواره شروع به افزایش کرده و باعث وقوع اختلاف بیشتر بین دمای متوسط سیال و دیواره خواهد شد.

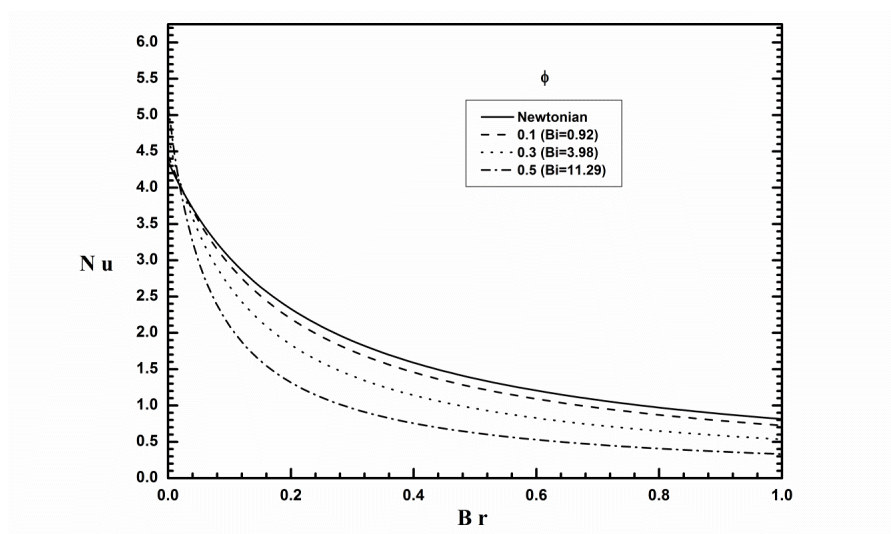
بنابراین با توجه به تعریف عدد ناسلت شاهد کاهش این پارامتر خواهیم بود که روند مورد انتظار در این حالت در شکل ۳-۲۸ مشاهده می شود.

در واقع در این حالت با افزایش اثر تلفات لزجت روی دیواره، اختلاف دمای متوسط سیال و دیواره افزایش یافته، به طوری که افزایش دمای دیواره بیشتر از افزایش دمای متوسط سیال می باشد و باعث کاهش عدد ناسلت خواهد شد.

علاوه بر این همان طور که در بخش تحلیل گرادیان دمای شعاعی بی بعد نیز عنوان شد، با توجه به درصد حاکم بودن اثرات انتقال حرارت هدایتی و جابجایی نیز می توان به تحلیل این نمودار پرداخت. در حالت عدم وجود و یا قابل صرف نظر بودن اثر تلفات لزجت روی دیواره، همان طور که از شکل ۳-۱۷ و شکل ۳-۱۸ مشاهده می شود، در این حالات با افزایش ϕ ، اثر انتقال حرارت جابجایی زودتر حاکم شده و از اثر انتقال حرارت هدایتی کاسته می شود که باعث افزایش عدد ناسلت می شود.

با افزایش عدد برینکمن نیز با توجه به افزایش اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت با افزایش ϕ که به اثر هدایت ناشی از شار افزوده می‌شود، باعث می‌شود تا وقوع انتقال حرارت هدایتی در سیال افزایش یافته و به این ترتیب باعث کاهش عدد ناسلت خواهد شد.

همچنین در نمودار زیر، تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات عدد برینکمن مربوط به سیال نیوتونی و بینگهام مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۹: تغییرات عدد ناسلت در برابر عدد برینکمن برای مقادیر مختلف عدد بینگهام

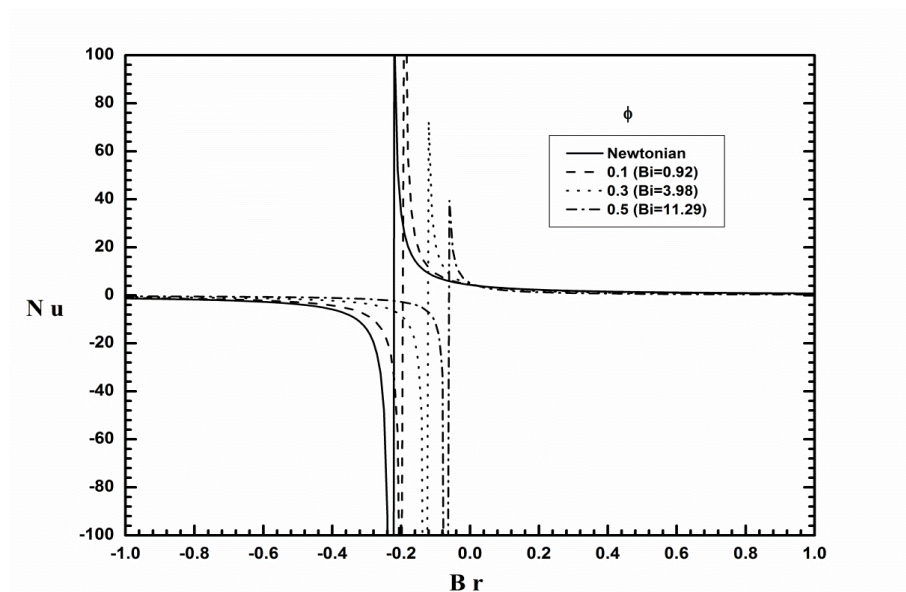
همان‌طور که از شکل ۳-۲۹ مشاهده می‌شود، با توجه به توضیحات مربوط به نمودار قبل، در مقادیر قابل صرف‌نظر تلفات لزجت روی دیواره، عدد ناسلت مربوط به سیال نیوتونی کوچک‌تر از سیال بینگهام بوده، اما با افزایش عدد برینکمن، این پارامتر برای سیالات نیوتونی بزرگ‌تر می‌باشد که مشخص‌کننده‌ی نسبت انتقال حرارت جابجایی به هدایتی بزرگ‌تر در این سیالات می‌باشد.

علاوه بر این همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، با افزایش بیشتر عدد برینکمن، اختلاف دمایی متوسط سیال و دیواره افزایش یافته و باعث کاهش عدد ناسلت خواهد شد. گفتنی است در حالت حدی با افزایش بیش از حد عدد برینکمن که فقط از نظر ریاضیاتی امکان پذیر می‌باشد، مقدار مجانبی عدد ناسلت برای تمام حالات به سمت صفر میل خواهد نمود.

۳-۲-۶ بررسی عدد ناسلت در حالت سرمایش

در این بخش به تحلیل عدد ناسلت در حالت سرمایش دیواره و یا در واقع انتقال گرما از سیال به دیواره خواهیم پرداخت. همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، تحلیل دمایی در حالت سرمایش با حالت گرمایش متفاوت بوده و نیاز به بررسی بیشتر دارد.

در زیر، نمودار تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات عدد برینکمن در دو حالت گرمایش و سرمایش دیواره مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۳۰: تغییرات عدد ناسلت در برابر عدد برینکمن در دو حالت گرمایش و سرمایش

با توجه به روند شکل ۳-۳۰، در حالت سرمایش ابتدا دمای متوسط سیال بزرگ‌تر از دمای دیواره بوده که باعث انتقال حرارت از سیال به دیواره می‌شود که در این وضعیت با توجه به تعریف عدد

$$\text{ناسلت} \left(Nu = -\frac{1}{\theta_m} \right) \text{ و دمای متوسط} \left(\theta_m = \frac{T_m - T_w}{q'' D_h / k} \right) \text{ و منفی بودن شار سرمایشی، مقدار}$$

ناسلت دارای علامت مثبت می‌باشد. با افزایش عدد برینکمن در جهت منفی، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت روی دیواره با اثر شار سرمایشی وارد بر دیواره برابر شده و به این ترتیب برای هر سیال با توجه به یک مقدار برینکمن بحرانی، دمای متوسط سیال با دمای دیواره برابر می‌شود که با توجه به تعریف

عدد ناسلت شاهد وقوع نقطه‌ی تکین در این مقدار از عدد برینکمن خواهیم بود. گفتنی است، نمودار مقادیر عدد برینکمن بحرانی برای سیالات نیوتونی و بینگهام در بخش توزیع دمای بی بعد در حالت سرمایش ترسیم شده است که مقادیر مربوطه در نمودار ناسلت با آن‌ها مطابقت دارد.

با افزایش بیشتر عدد برینکمن و گذر از مقدار بحرانی، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت بر شار سرمایشی غلبه کرده و باعث افزایش دمای متوسط سیال و در واقع انتقال گرما از دیواره به سیال عامل می‌شود که با توجه به منفی بودن شار سرمایشی و تعریف عدد ناسلت، این عدد در این حالت دارای مقدار منفی خواهد بود. در این‌جا نیز در حالتی که مقدار عدد برینکمن به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کند، مقادیر مجانبی عدد ناسلت برای تمام حالات به سمت صفر میل خواهد نمود.

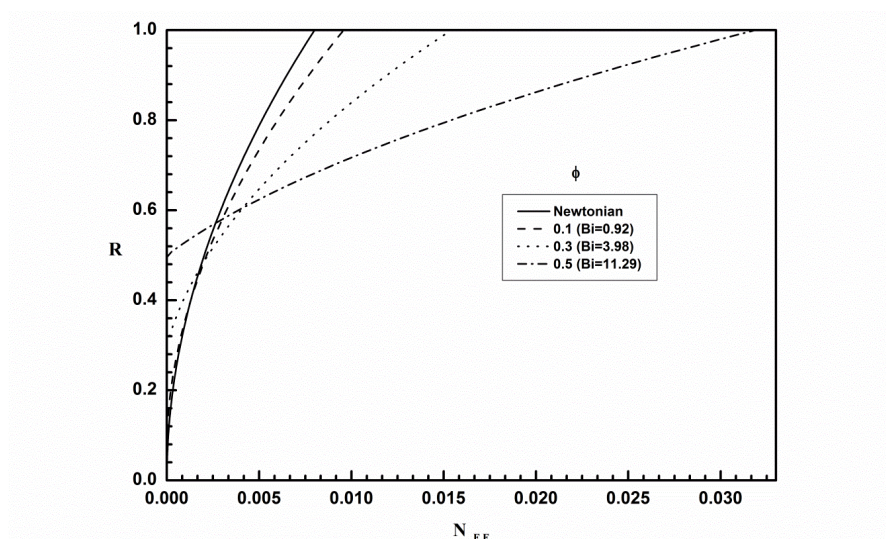
۳-۳ بررسی تولید آنتروپی

بررسی تولید آنتروپی به‌طور ساده می‌تواند بیان‌گر این موضوع باشد که بخشی از انرژی از فرم اولیه و مطلوب خود به‌جای تبدیل شدن به کار مفید به فرم دیگری از انرژی تبدیل می‌شود که دیگر ارزش و قابلیت تولید کار مفید را ندارد.

در این بخش به تحلیل نتایج مربوط به تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت در حالت عدم وجود لغزش سیال روی دیواره پرداخته شده و اثر پارامترهای مختلف را در تولید آنتروپی بررسی خواهیم کرد. هم‌چنین به مقایسه‌ی میزان تولید آنتروپی جریان سیال بینگهام نسبت به سیالات نیوتونی نیز پرداخته خواهد شد.

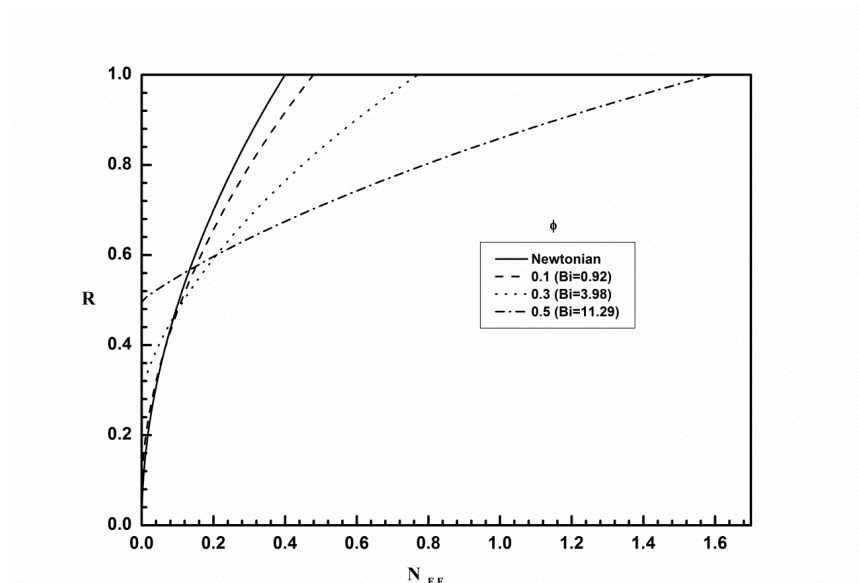
۳-۳-۱ بررسی تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک

در اثر لزجت سیال و اصطکاک آن با دیواره، مقداری از انرژی سیال که قابلیت تولید کار را داشته هدر رفته و در واقع به انرژی حرارتی تبدیل شده است که به آن، آنتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک سیال اطلاق می‌شود. در زیر، نمودار توزیع تولید آنتروپی اصطکاکی برای مقدار ناچیز تلفات لزجت سیال روی دیواره ($Br = 0.01$) مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۳۱: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.01$

با توجه به شکل ۳-۳۱ مشاهده می‌شود که در ناحیه‌ی جریان پلاگ که در واقع سیال به تنش تسلیم نرسیده و جاری نشده است، تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک وجود ندارد. همچنین با نزدیک شدن به دیواره، از آن‌جا که اثرات تلفات لزجت در این ناحیه اهمیت پیدا می‌کند، تولید آنتروپی اصطکاکی افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود که روی دیواره است، می‌رسد. با افزایش در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت روی دیواره، نمودار توزیع تولید آنتروپی اصطکاکی به صورت زیر می‌باشد.

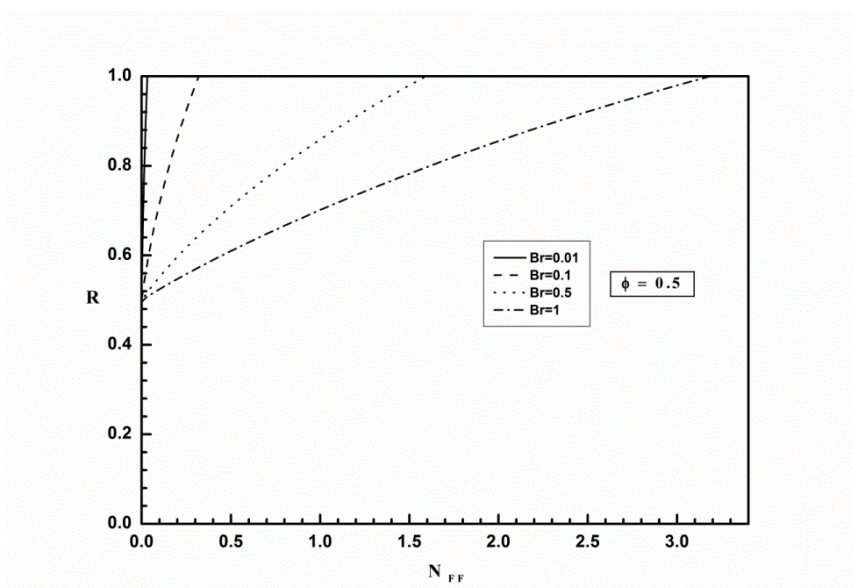


شکل ۳-۳۲: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.5$

در این حالت با مشاهده‌ی شکل ۳-۳۲ مشخص است که مقدار تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک روی دیواره و نزدیک به دیواره نسبت به حالت قبل افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است.

علاوه بر این با توجه به این که هر چه شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ بزرگ‌تر باشد، ترم تلفات لزجت سیال افزایش می‌یابد، بنابراین با افزایش ϕ ، اگرچه ناحیه‌ی جریان پلاگ بزرگ‌تری ایجاد می‌شود که در آن آنتروپی ناشی از اصطکاک وجود ندارد، اما روی دیواره آنتروپی بیشتری نسبت به حالات دیگر ایجاد خواهد شد.

علاوه بر این، برای یک ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع مشخص، تغییرات آنتروپی ناشی از اصطکاک با تغییر مقدار عدد برینکمن در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۳۳: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک برای یک ϕ مشخص

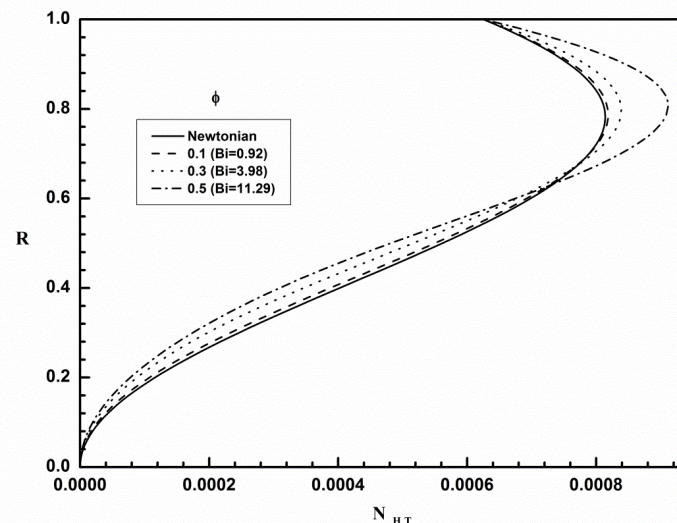
با افزایش عدد برینکمن و در واقع افزایش اثر تولید تلفات لزجت سیال در نزدیکی دیواره، انتظار می‌رود که تولید آنتروپی اصطکاکی در این ناحیه با افزایش مقدار عدد برینکمن افزایش یابد که این روند به‌خوبی در شکل ۳-۳۳ قابل مشاهده می‌باشد.

۳-۳-۲ بررسی تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت

در اثر وجود یک اختلاف دمای محدود در هر سیستم و مدلی، انتقال حرارت ایجاد می‌شود که این عامل باعث می‌شود تا مقداری از انرژی سیال که قابلیت تولید کار مفید داشته است، از دست رفته و در واقع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت وجود خواهد داشت.

به این ترتیب با وجود تولید آنتروپی ناشی از حرارت، از میزان قابلیت ایجاد کار مفید توسط سیستم کاسته شده و بازده ترمودینامیکی آن کاهش خواهد یافت.

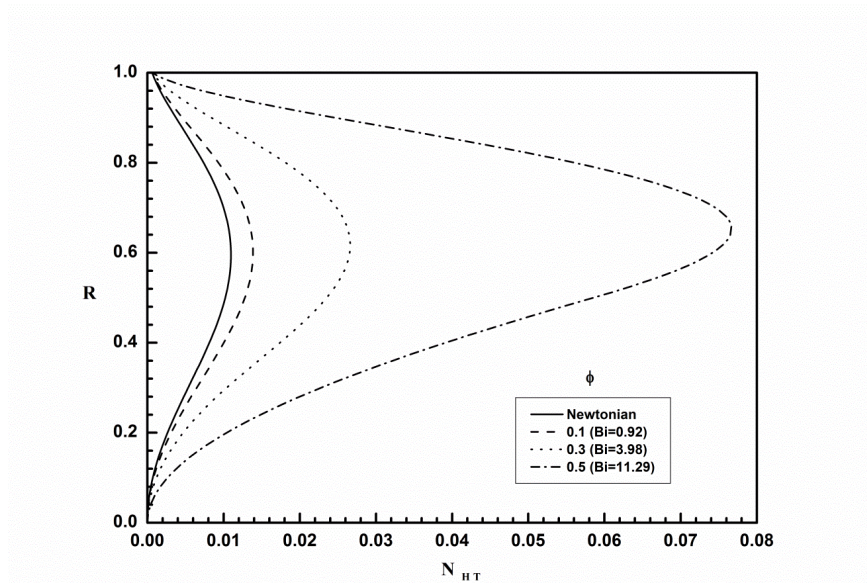
در این قسمت، ابتدا به تحلیل تولید آنتروپی حرارتی در مقادیر ناچیز تلفات لزجت سیال روی دیواره پرداخته می‌شود که در زیر برای مقدار $Br = 0.01$ این نمودار رسم شده است.



شکل ۳-۳۴: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.01$

با توجه به عبارت تولید آنتروپی حرارتی که در معادله (۲-۷۶) بیان شد، همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، آنتروپی تولیدی ناشی از حرارت وابستگی زیادی به گرادیان دمای شعاعی بی بعد سیال دارد که با توجه به شکل ۳-۳۴ و مشاهده نمودارهای توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد، این وابستگی به خوبی مشاهده می‌شود.

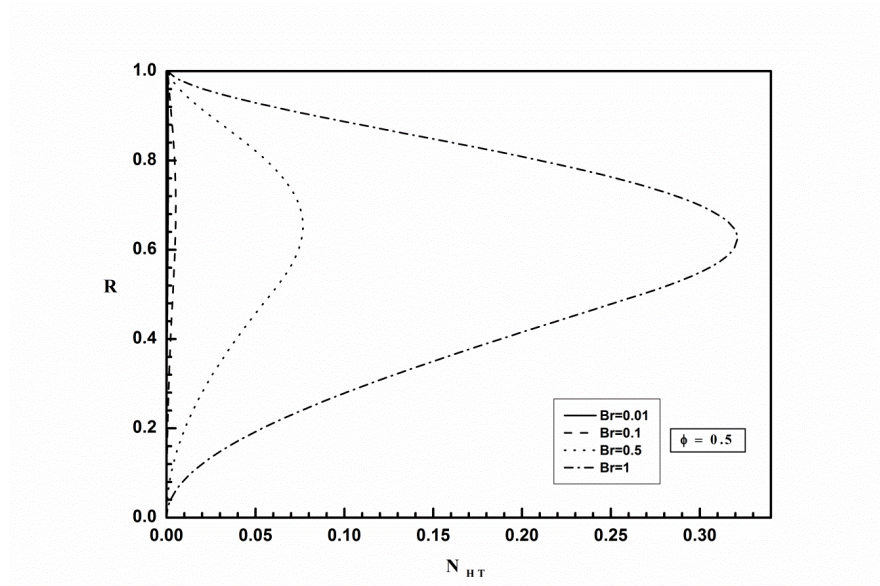
بنابراین بیشترین میزان تولید آنتروپی حرارتی در ناحیه‌ای است که گرادیان دمای شعاعی بی بعد سیال ماکزیمم است و با نزدیک شدن به مرکز کانال از مقدار تولید این آنتروپی کاسته می‌شود. همچنین با افزایش مقدار عدد برینکمن، آنتروپی حرارتی بیشتری تولید می‌شود که در نمودار زیر قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳-۳۵: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.5$

از آن جا که مقدار تلفات لزجت روی دیواره با افزایش مقدار عدد برینکمن افزایش می‌یابد، بنابراین اثرات انتقال حرارت هدایت و تلفات لزجت بیشتر ترکیب شده و باعث گسترده شدن گرادیان دمای شعاعی بی بعد سیال می‌شود که همین عامل باعث می‌شود تا آنتروپی حرارتی سیال نیز با توجه به شکل ۳-۳۵ افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

در نمودار زیر می‌توان اثر افزایش عدد برینکمن روی تولید آنتروپی حرارتی در یک مقدار ثابت از شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ را مشاهده کرد.



شکل ۳-۳۶: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت برای یک ϕ مشخص

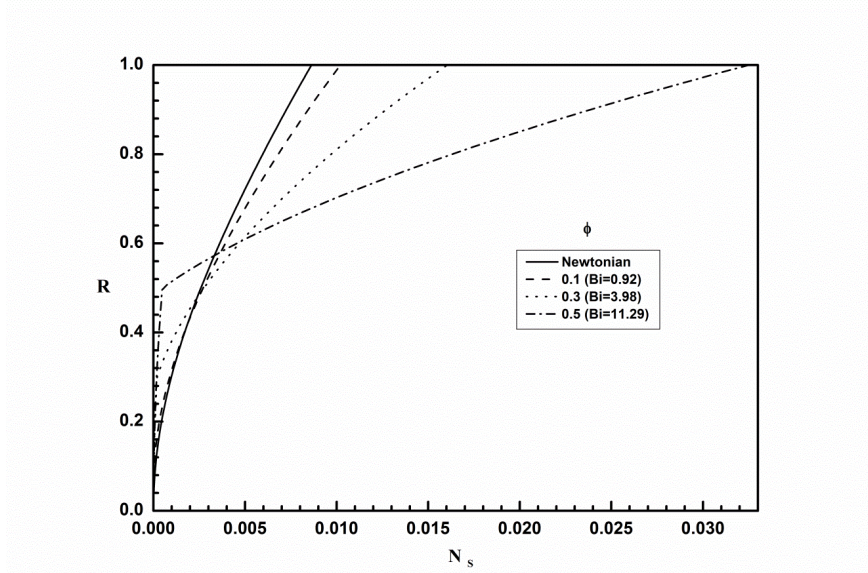
بنابراین همان گونه که مشاهده می شود با توجه به شکل ۳-۳۶، مقدار ماکزیمم تولید آنتروپی حرارتی به سمت مرکز میکروکانال متمایل می شود که نشان دهنده ی این است که ناحیه ی بیشتری از سیال تحت تأثیر تولید آنتروپی ناشی از حرارت واقع می شود.

۳-۳-۳ بررسی تولید آنتروپی کلی

در این بخش به تحلیل تولید آنتروپی کلی در جریان سیال که ناشی از تولید اصطکاک و انتقال حرارت می باشد، پرداخته و مناطقی از جریان که در آن میزان تولید آنتروپی حداکثر و یا حداقل است، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

همچنین تأثیر پارامترهای مختلف در افزایش میزان تولید آنتروپی مشاهده خواهد شد.

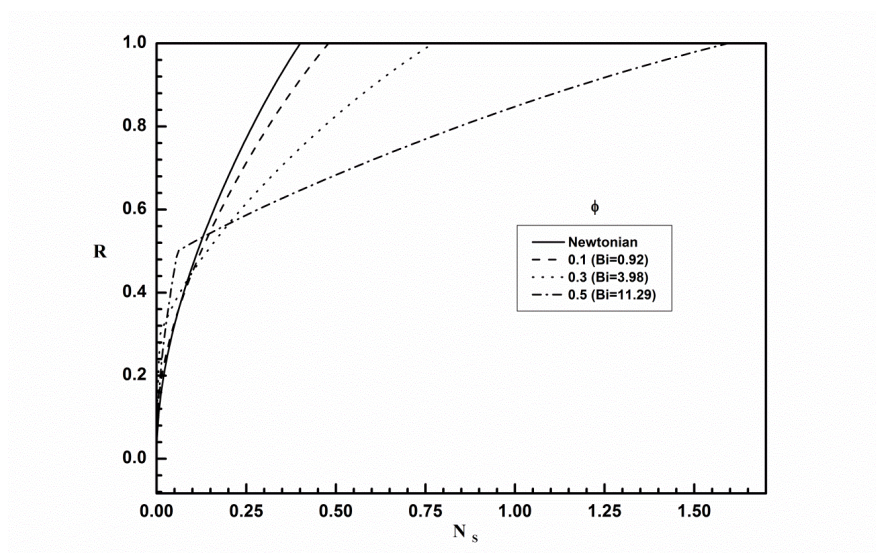
ابتدا به تحلیل آنتروپی کلی در حالت تلفات قابل صرف نظر روی دیواره پرداخته می شود که در زیر، توزیع آنتروپی کلی برای حالت $Br = 0.01$ مشاهده می شود.



شکل ۳-۳۷: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.01$

با توجه به شکل ۳-۳۷ مشاهده می‌شود که سهم عمده‌ای از آنتروپی کل تولیدی ناشی از اصطکاک سیال نزدیک دیواره می‌باشد که باعث شده است تا روند نمودار توزیع آنتروپی کل مانند توزیع آنتروپی ناشی از اصطکاک باشد.

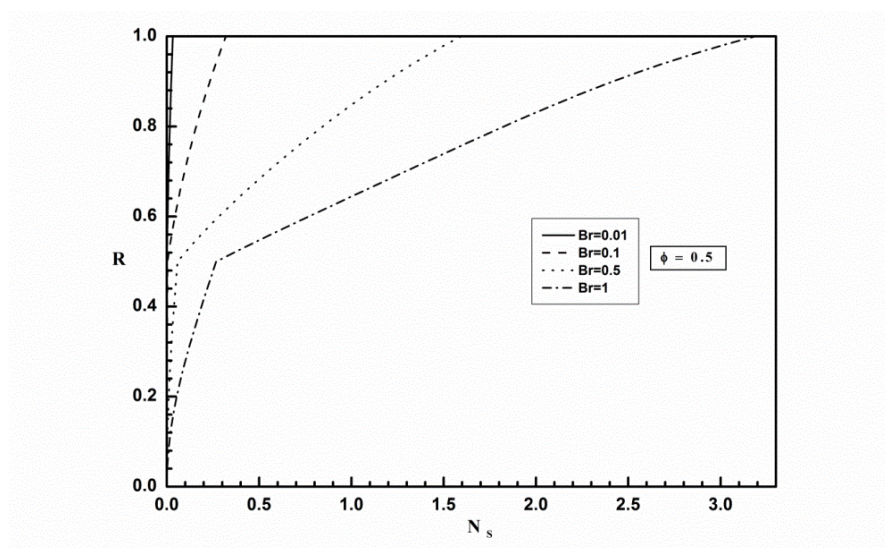
علاوه بر این، با افزایش مقدار عدد برینکمن همان‌طور که انتظار می‌رود، تولید آنتروپی کل افزایش می‌یابد که در نمودار زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۳۸: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.5$

بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به شکل ۳-۳۸، در جریان سیال داخل میکروکانال، نزدیک دیواره ناحیه‌ای است که تولید آنتروپی اهمیت داشته و با نزدیک شدن به مرکز میکروکانال از تولید آنتروپی کاسته می‌شود.

همچنین برای حالتی که شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ ثابت بماند، تغییرات آنتروپی کلی با افزایش عدد برینکمن مشاهده می‌شود.



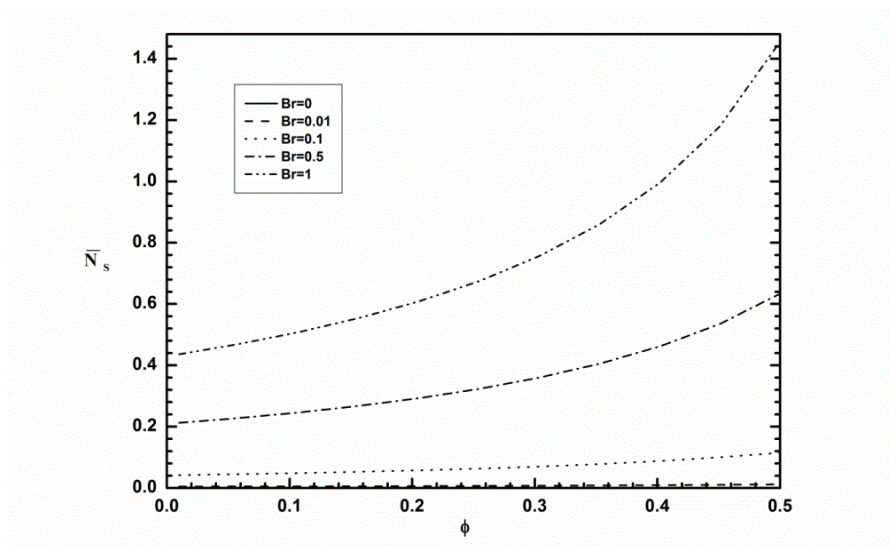
شکل ۳-۳۹: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع تولید آنتروپی کلی برای برای یک ϕ مشخص

بنابراین ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار عدد برینکمن، آنتروپی بیشتری در ناحیه‌ی نزدیک دیواره تولید می‌شود. علاوه بر این همان‌گونه که ذکر شد، با توجه به شکل ۳-۳۹، سهم عمده‌ی تولید آنتروپی ناشی از آنتروپی اصطکاکی می‌باشد.

اما گفتنی است درصد افزایش آنتروپی حرارتی با افزایش عدد برینکمن بیشتر از آنتروپی اصطکاکی است. زیرا وابستگی آنتروپی حرارتی به توزیع دما و در نتیجه عدد برینکمن بسیار بیشتر از آنتروپی اصطکاکی می‌باشد، که این موضوع در بخش مربوط به عدد بیژن به آن اشاره خواهد شد.

۴-۳-۳ بررسی آنتروپی کلی متوسط

همان‌طور که مشخص است، جهت تحلیل و بررسی یک کمیت بهتر است تا مقدار متوسط آن کمیت در هندسه‌ی مورد نظر بررسی شود. در این بخش به تحلیل تغییرات آنتروپی کلی متوسط با افزایش مقدار عدد برینکمن و شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) پرداخته می‌شود، که در شکل زیر نمودار این تغییرات مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۳: نمودار تغییرات آنتروپی کلی متوسط با افزایش عدد برینکمن

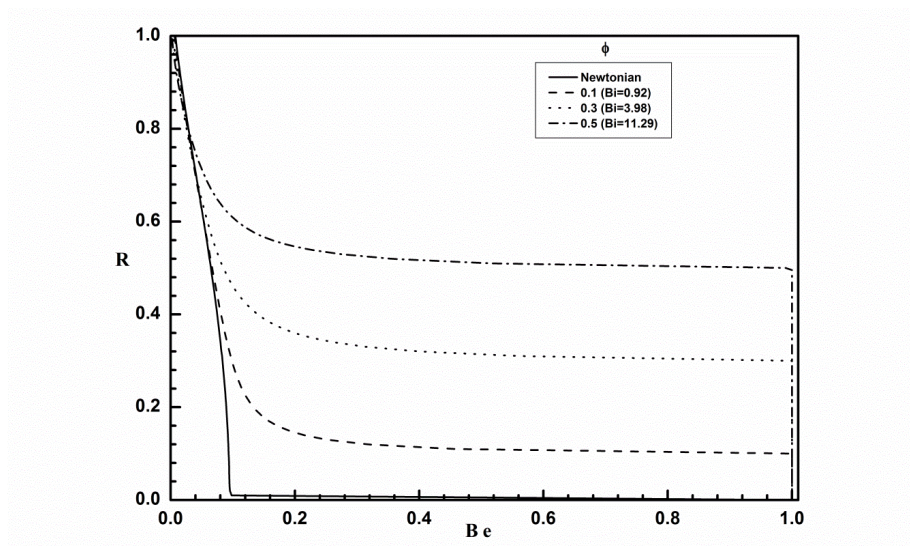
همان‌طور که از شکل ۴-۳ نتیجه می‌شود، با گسترش ناحیه‌ی جریان پلاگ و در واقع افزایش مقدار ϕ ، آنتروپی تولیدی در میکروکانال افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش تلفات لزجت سیال با افزایش مقدار ϕ می‌باشد.

علاوه بر این واضح است که با افزایش مقدار برینکمن در هر مقدار از شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ نیز، آنتروپی تولیدی داخل جریان سیال افزایش می‌یابد.

۵-۳-۳ بررسی عدد بیژن

یکی از پارامترهای مهم که در تحلیل‌های مهندسی در صنایع مختلف کاربرد زیادی دارد، بررسی نسبت آنتروپی‌های تولیدی ناشی از اصطکاک و حرارت می‌باشد. عدد بیژن همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، نشان دهنده‌ی نسبت آنتروپی تولیدی ناشی از حرارت به آنتروپی تولیدی کلی می‌باشد که در واقع نشان دهنده‌ی میزان اهمیت آنتروپی حرارتی در نواحی مختلف میکروکانال می‌باشد.

در نمودار زیر، تغییرات عدد بیژن برای حالت $Br = 0.1$ مشاهده می‌شود.

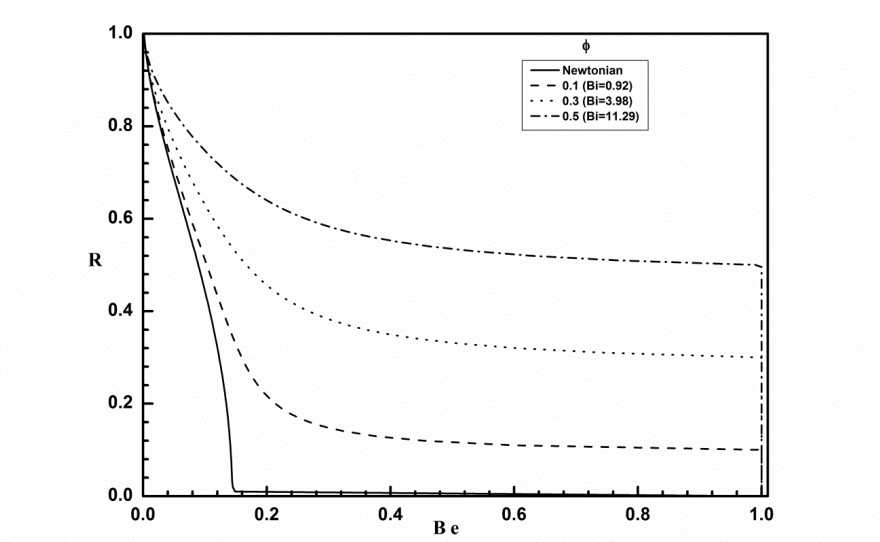


شکل ۴۱-۳: نمودار عدد بیژن در حالت $Br = 0.1$

همان‌طور که از شکل ۴۱-۳ مشاهده می‌شود، در ناحیه‌ی جریان پلاگ به دلیل عدم تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک، مقدار عدد بیژن با توجه به تعریف این پارامتر در این ناحیه برابر یک خواهد بود.

با نزدیک شدن به دیواره نیز، از آن‌جا که سهم تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در این ناحیه افزایش می‌یابد، عدد بیژن شروع به کاهش می‌کند.

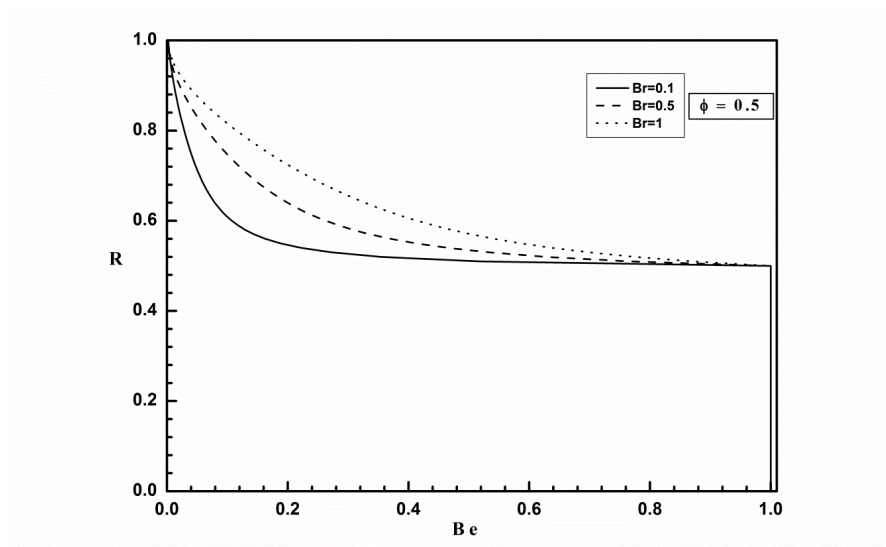
با افزایش عدد برینکمن، تغییرات عدد بیژن داخل میکروکانال به صورت شکل زیر می‌باشد.



شکل ۳-۴۲: نمودار عدد بیژن در حالت $Br = 0.5$

در این حالت نیز با توجه به شکل ۳-۴۲ مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن به ناحیه‌ی جریان پلاگ، مقدار عدد بیژن به سمت یک میل کرده و تا مرکز میکروکانال در همین مقدار ثابت می‌ماند. زیرا در ناحیه‌ی جریان پلاگ، تولید آنتروپی تنها ناشی از حرارت بوده و آنتروپی اصطکاکی سهمی در این ناحیه ندارد.

هم‌چنین برای یک ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع مشخص، تغییرات عدد بیژن با افزایش عدد برینکمن در شکل زیر رسم شده است.



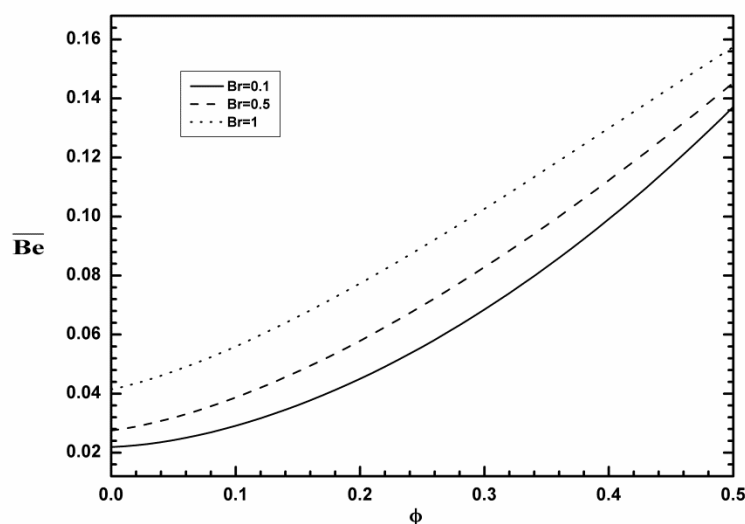
شکل ۳-۴۳: اثر افزایش عدد برینکمن روی توزیع عدد بیژن برای یک ϕ مشخص

در این جا نیز با توجه به شکل ۳-۴۳ مشاهده می‌شود که تأثیر افزایش عدد برینکمن روی رشد آنتروپی حرارتی بیشتر از آنتروپی اصطکاکی بوده و باعث افزایش عدد بیژن در ناحیه‌ی تسلیم شده‌ی جریان سیال بینگهام می‌شود.

۳-۳-۶ بررسی عدد بیژن متوسط

همان‌طور که عنوان شد، تحلیل کمیت‌های مختلف از روی مقادیر متوسط آن‌ها برای محققان اهمیت بیشتری داشته و می‌تواند مفیدتر باشد.

به همین منظور در این بخش نیز به تحلیل مقادیر متوسط عدد بیژن داخل میکروکانال با شرایط مختلف پرداخته شده است که نمودار آن در زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۴۴: نمودار تغییرات عدد بیژن متوسط با افزایش عدد برینکمن

بنابراین با توجه به شکل ۳-۴۴ مشاهده می‌شود که مقادیر متوسط عدد بیژن با افزایش عدد برینکمن و شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) افزایش می‌یابد که مشخص کننده‌ی این موضوع است که نرخ رشد تولید آنتروپی ناشی از حرارت با افزایش دو کمیت مذکور بیش‌تر از رشد تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک می‌باشد.

فصل چهارم

بررسی نتایج کلی در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره

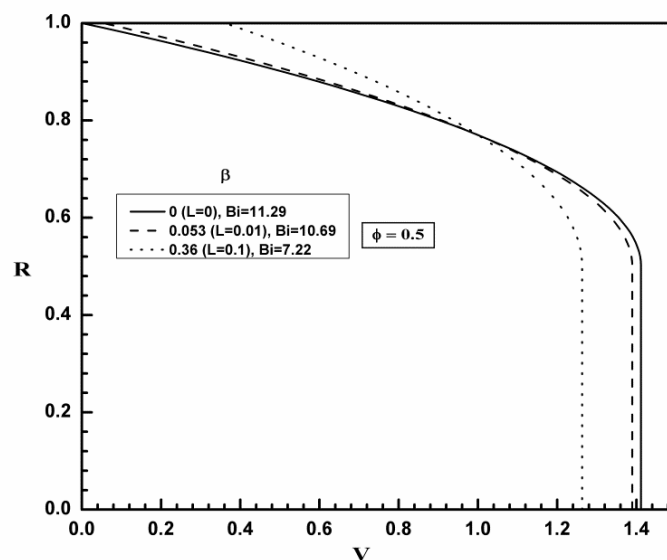
- بررسی میدان سرعت
- بررسی میدان دما
- بررسی تولید آنتروپی

همان گونه که در فصول اول و دوم نیز اشاره شد، برای دقت بیشتر در بررسی جریان سیالات در میکروکانال‌ها باید شرط وجود لغزش روی دیواره را به عنوان شرط مرزی حاکم در نظر گرفت و به تحلیل مسئله‌ی مورد نظر پرداخت که در فصل اول به برخی از کارهای انجام شده با وجود این فرض و اثر آن بر روی نتایج مربوط به میدان دما و تولید آنتروپی اشاره شد.

در این فصل نیز با توجه به نتایج به دست آمده در فصل دوم برای حالت وجود لغزش سیال روی دیواره، به تحلیل میدان‌های سرعت و دما و همچنین تولید آنتروپی سیال بینگهام پرداخته و نتایج هر بخش با نتایج مربوط به سیالات نیوتونی نیز مقایسه شده است.

۱-۴ بررسی میدان سرعت

در این بخش به بررسی میدان سرعت بی بعد مسئله در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال خواهیم پرداخت. در نمودار زیر، توزیع سرعت بی بعد سیال در شرایط مختلف لغزش سیال مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۴: نمودار توزیع سرعت بی بعد سیال برای مقادیر مختلف ضریب لغزش

همان طور که از شکل ۱-۴ مشاهده می‌شود، با فرض برقراری یک ناحیه‌ی جریان پلاگ ثابت با شعاع مشخص ($\phi = 0.5$) داخل میکروکانال، با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره از آن جا که

اختلاف فشار اعمالی و در نتیجه تنش روی دیواره کاهش می‌یابد، عدد بینگهام سیال شروع به کاهش می‌کند. بنابراین کاهش عدد بینگهام با افزایش ضریب لغزش، نشان دهنده‌ی این موضوع است که برای داشتن ناحیه جریان پلاگ با شعاع مشخص نیاز است تا از سیال با تنش تسلیم کمتر استفاده شود تا با توجه به کاهش تنش روی دیواره، سیال بتواند جاری شده و دارای ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع مشخص باشد.

زیرا با توجه به فرض دبی ثابت بودن مسئله، سرعت متوسط سیال با افزایش ضریب لغزش ثابت مانده و به این ترتیب اثرات اینرسی جریان در تعریف عدد بینگهام در این پژوهش ثابت می‌ماند. همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، این امر در صنایع شیمیایی جهت واکنش یکنواخت مواد که نیاز به سرعت ثابت جهت انجام واکنش می‌باشد، کاربرد داشته و با فرض مشخص بودن شعاع ناحیه‌ی جریان پلاگ می‌توان با توجه به شرایط لغزش سیال روی دیواره از سیال با تنش تسلیم متناسب جهت جاری شدن تحت تنش اعمالی و ایجاد ناحیه‌ی جریان پلاگ مورد نظر استفاده کرد. در واقع افزایش ضریب لغزش همان‌طور که در فصل اول به آن اشاره شد به مفهوم استفاده از سطحی با زبری و آب‌گریزی بیشتر می‌باشد که سیال بتواند با سرعت بیشتری روی دیواره لغزیده و اصطکاک کمتری بین سیال و دیواره ایجاد شود.

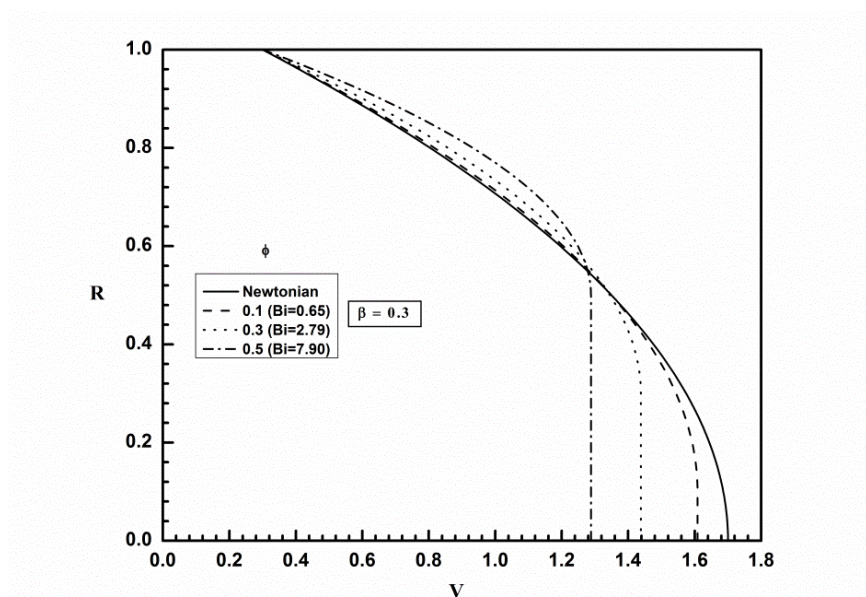
با توجه به این نمودار مشخص است که با افزایش ضریب لغزش، سرعت سیال روی دیواره افزایش یافته و از سرعت سیال در مرکز میکروکانال کاسته می‌شود. علاوه بر این، از مقدار گرادیان سرعت سیال روی دیواره با افزایش ضریب لغزش کاسته شده و در واقع مقدار تلفات کمتری در اثر لزجت سیال روی دیواره تولید می‌شود که این موضوع در بخش میدان دما به آن اشاره خواهد شد.

در صورتی که نیاز باشد تا برای یک سیال بینگهام با تنش تسلیم مشخص، اثر تغییرات ضریب لغزش روی توزیع سرعت بی بعد مشاهده شود باید اثرات اینرسی جریان تغییر کند که همان‌طور که ذکر شد، در این جا با توجه به فرض دبی ثابت بودن مسئله، امکان بررسی چنین حالتی در این

پژوهش وجود نخواهد داشت.

علاوه بر این، با توجه به افزایش سرعت سیال نزدیک دیواره با افزایش ضریب لغزش، اثر انتقال حرارت هدایت نزدیک دیواره کمتر شده و به اثر انتقال حرارت جابجایی افزوده خواهد شد که این موضوع نیز در بخش مربوط به عدد ناسلت بحث خواهد شد.

همچنین برای یک مقدار خاص از ضریب لغزش، توزیع سرعت بی بعد سیال برای حالت نیوتونی و حالات مختلف سیال بینگهام رسم شده است که در شکل زیر مشاهده می‌شود.

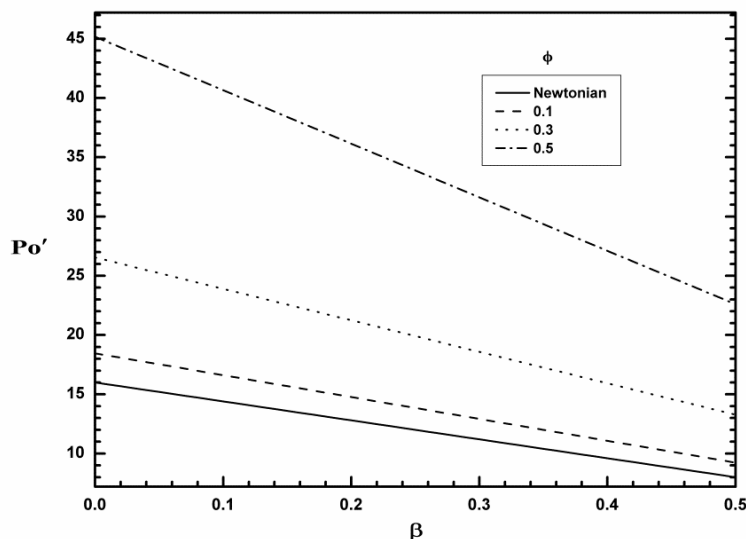


شکل ۴-۲: نمودار توزیع سرعت بی بعد سیال برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در ضریب لغزش ثابت

با توجه به شکل ۴-۲ مشاهده می‌شود که برای یک مقدار ثابت ضریب لغزش، از سرعت ماکزیمم سیال در مرکز میکروکانال با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) کاسته می‌شود. همچنین افزایش ϕ در این حالت به مفهوم استفاده از سیالی با تنش تسلیم بالاتر است که برای جاری شدن سیال نیاز به تنش اعمالی بیشتری روی دیواره می‌باشد که همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ϕ ، گرادیان سرعت بیشتری روی دیواره ایجاد می‌شود که به مفهوم افزایش تنش اعمالی روی دیواره می‌باشد.

۴-۱-۱ بررسی عدد پوازی

در این قسمت به تحلیل مقادیر عدد پوازی در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره پرداخته خواهد شد که نمودار آن در شکل زیر رسم شده است.



شکل ۴-۳: نمودار تغییرات عدد پوازی در برابر تغییرات ضریب لغزش سیال

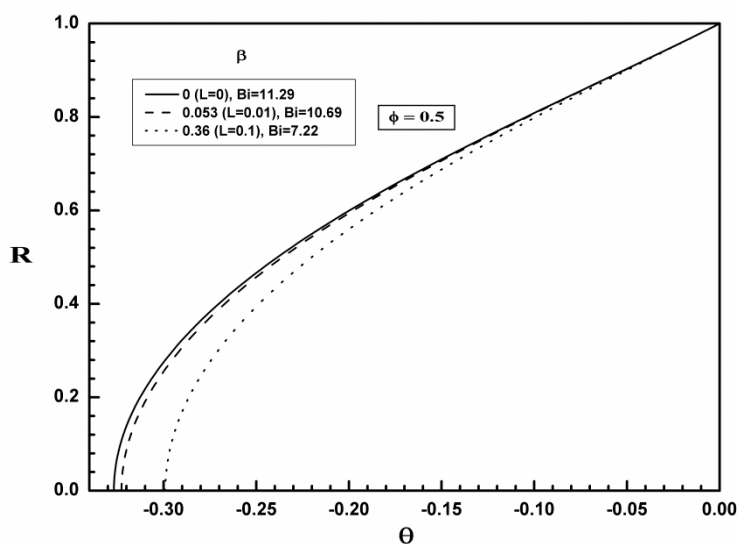
با توجه به شکل ۴-۳ مشاهده می‌شود که هرچه ضریب لغزش سیال روی دیواره افزایش یابد، از مقدار اصطکاک تولیدی روی دیواره و در نتیجه میزان گرمای تولیدی ناشی از اصطکاک سیال و دیواره کاسته خواهد شد که در بررسی میدان دما به آن اشاره خواهد شد. همچنین نتیجه می‌شود که سیالات نیوتونی در این حالت نیز تولید اصطکاک کمتری روی دیواره نسبت به سیالات بینگهام دارند.

۴-۲ بررسی میدان دما

همان‌طور که در فصل گذشته نیز بحث شد، برای بررسی میدان دمایی سیال مورد نظر در این بخش نیز، دو حالت گرمایش و سرمایش دیواره در نظر گرفته می‌شود که اعداد برینکمن مثبت مربوط به حالت گرمایش دیواره (انتقال گرما از دیواره به سیال) و اعداد برینکمن منفی مربوط به حالت سرمایش دیواره (انتقال سرما از دیواره به سیال و یا در واقع انتقال گرما از سیال به دیواره) می‌باشد.

۴-۲-۱ بررسی میدان دما در حالت گرمایش

پیش از بررسی میدان دمایی در حالت گرمایش، ابتدا به تحلیل توزیع دمای بی بعد مسئله در حالت عدم وجود تلفات لزجت روی دیواره ($Br = 0$) خواهیم پرداخت که این حالت، همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد مستقل از نوع شار وارد به دیواره از نظر گرمایشی و یا سرمایشی بودن می‌باشد. در زیر، نمودار توزیع دمای بی بعد برای شرایط مختلف لغزش سیال روی دیواره با فرض وجود یک ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع مشخص ($\phi = 0.5$) رسم شده است.



شکل ۴-۴: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0$

با توجه به شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود که در حالت عدم وجود تلفات لزجت روی دیواره، اگر شار وارد به دیواره گرمایشی (سرمایشی) باشد، گرما (سرما) از دیواره به سیال در حال انتقال بوده و در واقع دمای دیواره از دمای سیال بیشتر (کمتر) می‌باشد که با توجه به تعریف پارامتر بی بعد θ ، در این حالت علامت این پارامتر منفی خواهد بود.

با توجه به کاهش سرعت سیال در مرکز میکروکانال با افزایش ضریب لغزش، اثرات انتقال حرارت جابجایی در این ناحیه کاهش یافته و سیال فرصت بیشتری برای جذب گرمای (سرما) وارد به دیواره خواهد داشت. به این ترتیب اختلاف دمای کمتری بین دیواره و سیال عامل ایجاد خواهد شد

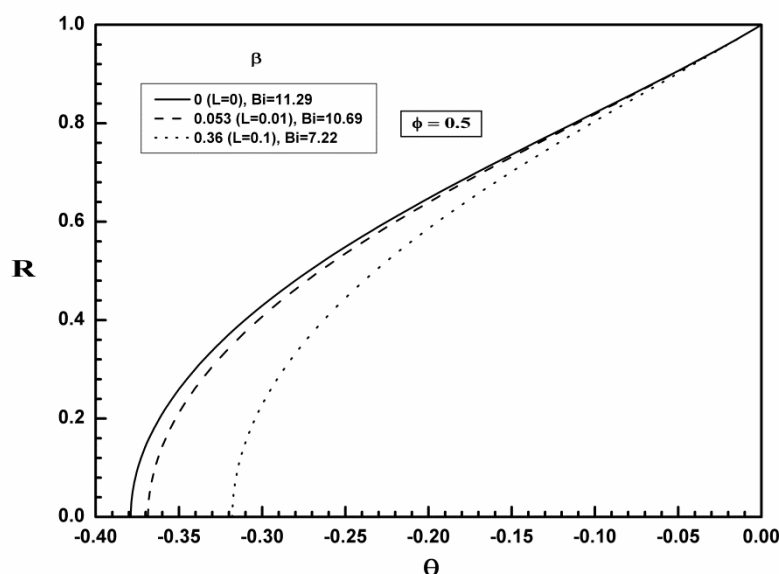
که باعث کم شدن مقدار قدر مطلق پارامتر θ خواهد شد.

اما در حالت جریان واقعی با توجه به وجود گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال روی دیواره، این

اثر باید در تحلیل میدان دمایی مسئله مورد بررسی قرار گیرد.

در نمودار زیر، اثر مقدار تلفات لزجت ناچیز ($Br = 0.01$) روی توزیع دمای بی بعد سیال در

شرایط مختلف لغزش سیال روی دیواره مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۴: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.01$

با توجه به شکل ۵-۴ مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت سیال در معادله‌ی

انرژی، مقدار قدر مطلق θ نسبت به حالت عدم وجود تلفات بزرگ‌تر می‌باشد. گفتنی است از آن‌جا

که با افزایش ضریب لغزش سیال، از گرادیان سرعت بی بعد روی دیواره و در نتیجه مقدار گرمای

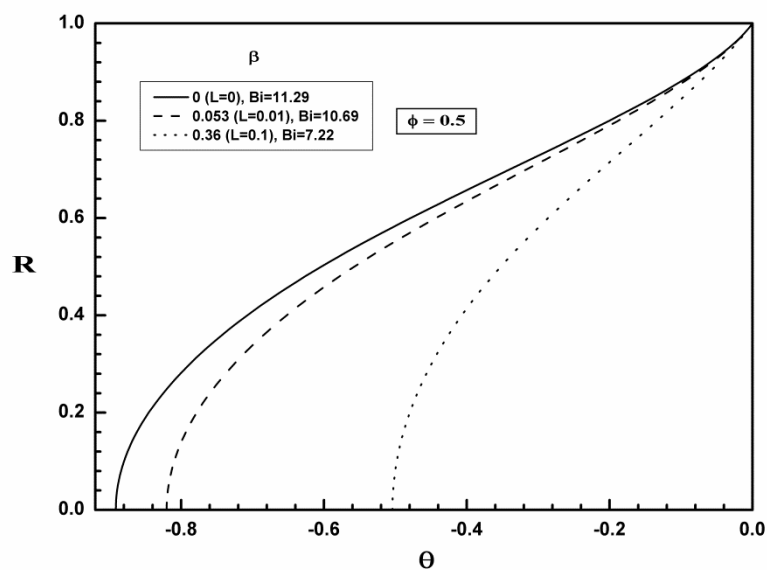
تولیدی ناشی از تلفات لزجت روی دیواره کاسته می‌شود، بنابراین افزایش قدر مطلق θ نسبت به

حالات دیگر لغزش سیال کمتر خواهد بود.

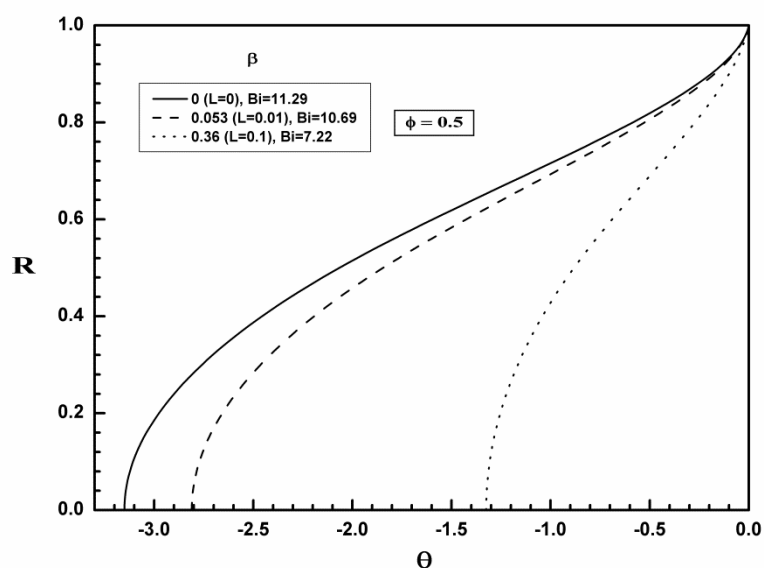
با افزایش در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت در معادله‌ی انرژی، پارامتر بی بعد θ و در واقع اختلاف

دمای بین دیواره و سیال شروع به افزایش می‌کند. در زیر، توزیع دمای بی بعد برای حالات

$Br = 0.1$ و $Br = 0.5$ مشاهده می‌شود.



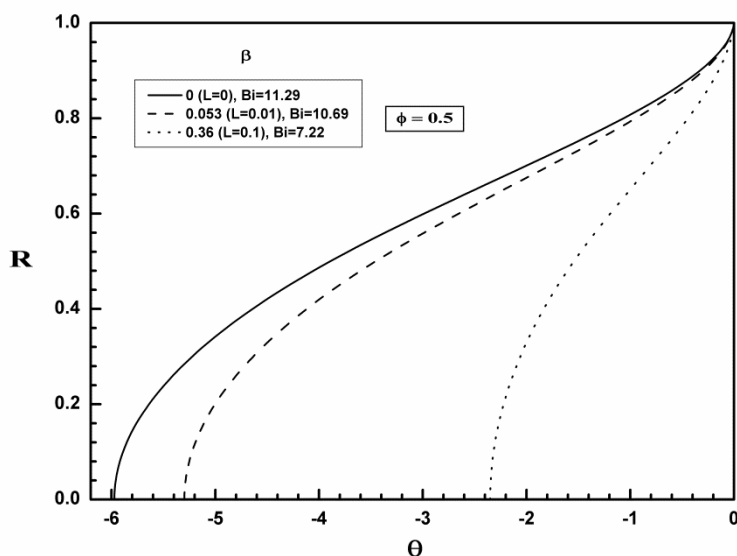
شکل ۴-۶: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.1$



شکل ۴-۷: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$

همان‌طور که از شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود، در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت سیال در معادله‌ی انرژی به مانند وجود یک منبع گرما در سیال می‌باشد که باعث بالا رفتن دمای دیواره و دمای متوسط سیال و کاهش ظرفیت آن برای جذب گرمای ناشی از شار وارد به دیواره خواهد شد.

با توجه به نمودارهای توزیع دمای بی بعد ترسیم شده، افزایش قدر مطلق پارامتر θ برای حالتی که لغزش سیال روی دیواره کمتر باشد، بیشتر است که نشان دهنده وقوع اختلاف دمای بیشتر بین دیواره و سیال عامل می باشد. در نمودار زیر نیز برای حالتی که $Br = 1$ می باشد، توزیع دمای بی بعد مسئله مشاهده می شود.

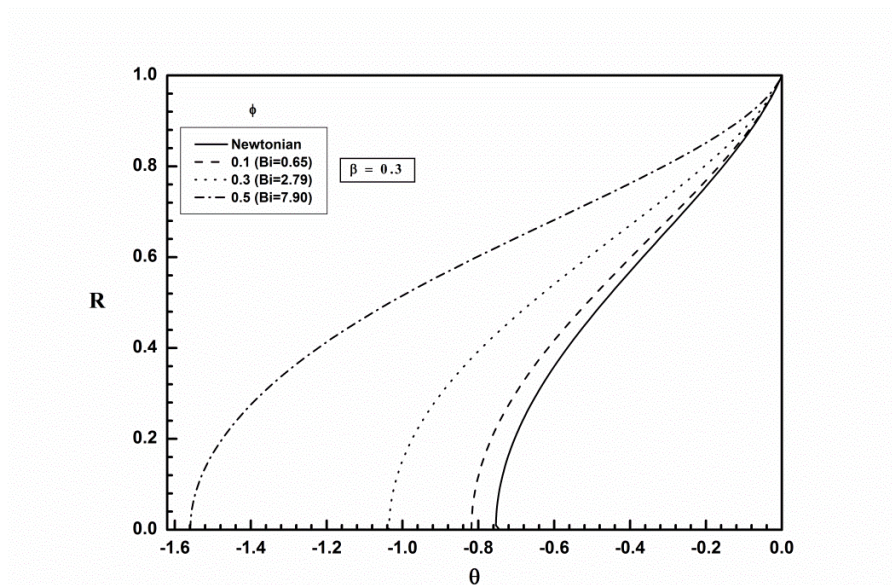


شکل ۴-۸: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 1$

با توجه به شکل ۴-۸ نتیجه می شود که با افزایش بیشتر اثر تلفات لزجت سیال روی دیواره، دمای متوسط سیال افزایش بیشتری یافته و به این ترتیب باعث کاهش ظرفیت جذب گرمای سیال می شود. از طرفی به دلیل افزایش دمای دیواره در اثر افزایش تلفات، اختلاف دمای بیشتری بین دیواره و سیال ایجاد خواهد شد. بنابراین نتیجه می شود در سطوحی که ضریب لغزش سیال بر روی آنها مقدار بزرگتری است، به دلیل کم بودن گرمای تولیدی ناشی از تلفات لزجت، علاوه بر افزایش کمتر دمای دیواره، سیال ظرفیت بالاتری برای جذب گرمای وارد بر دیواره داشته و باعث اختلاف دمای کمتر بین سیال و دیواره می شود. البته همان طور که پیش تر نیز عنوان شد برای داشتن ناحیه ی جریان پلاگ با شعاع مشخص، با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره از تنش اعمالی به سیال از طرف دیواره کاسته شده و باید از سیال با تنش تسلیم کمتر جهت دستیابی به ناحیه ی جریان پلاگ

مشخص استفاده کرد.

همچنین در نمودار زیر نیز اثر افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) در یک مقدار ثابت از ضریب لغزش روی توزیع دمای بی بعد سیال در حالتی که اثر تلفات لزجت سیال روی دیواره در نظر گرفته شده است، مشاهده می‌شود.



شکل ۹-۴: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در ضریب لغزش ثابت برای حالت $Br = 0.5$

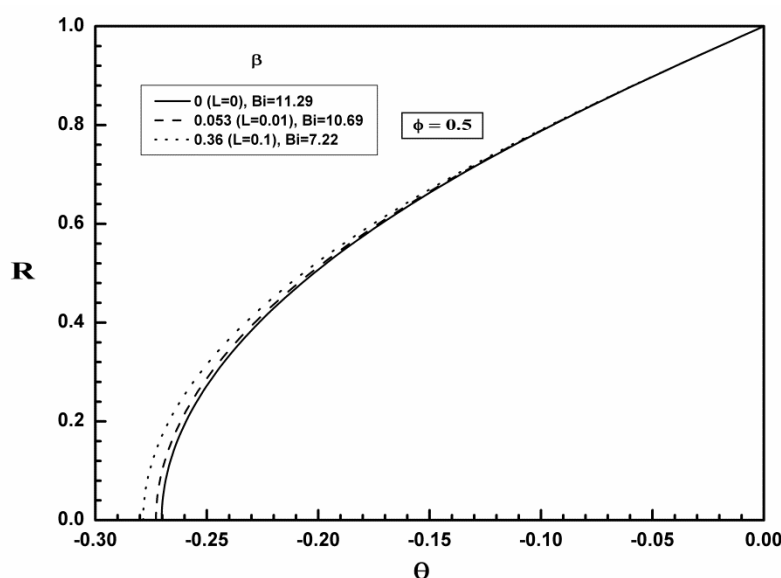
از مشاهده‌ی شکل ۹-۴ نتیجه می‌شود که هر چه سیال دارای ناحیه‌ی جریان پلاگ بزرگ‌تری باشد (داشتن تنش تسلیم بزرگ‌تر)، تلفات لزجت بیشتری روی دیواره تولید کرده که باعث افزایش اختلاف دمای بین دیواره و سیال عامل خواهد شد.

بنابراین در حالتی که دیواره دارای ضریب لغزش ثابتی می‌باشد، جهت جذب گرمای ناشی از شار وارد بر دیواره بهتر است تا از سیالی استفاده شود که دارای ناحیه‌ی جریان پلاگ کوچک‌تری بوده و در واقع به تنش کمتری برای تسلیم و جاری شدن نیاز داشته باشد.

۲-۲-۴ بررسی میدان دما در حالت سرمایش

برای حالتی که شار وارد شده به دیواره سرمایشی باشد و یا در واقع گرما از سیال به دیواره در حال انتقال باشد، با توجه به منفی بودن شار سرمایشی، مقادیر عدد برینکمن در این حالت منفی خواهد بود.

در زیر، نمودار توزیع دمای بی بعد سیال برای یک ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع مشخص در مقادیر ناچیز تلفات لزجت سیال روی دیواره ($Br = -0.01$) با شرایط مختلف لغزش سیال ترسیم شده است.

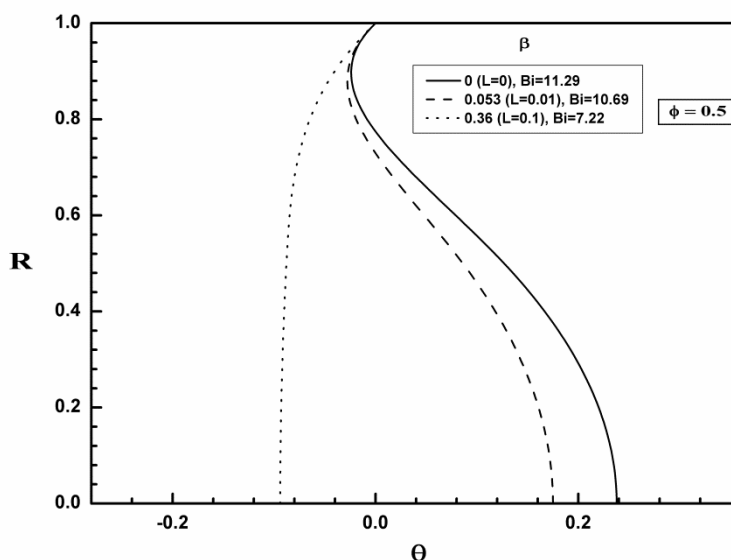


شکل ۴-۱۰: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -0.01$

با توجه به شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود که در این حالت با توجه به ناچیز بودن گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال، اثر شار سرمایشی بر گرمای ناشی از تلفات لزجت غالب بوده و باعث کاهش دمای متوسط سیال در این حالت خواهد شد.

اما همان‌طور که در فصل گذشته نیز اشاره شد، با افزایش عدد برینکمن در جهت منفی و گذر از مقدار برینکمن بحرانی، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال بر شار سرمایشی وارد بر دیواره غلبه کرده و باعث افزایش دمای متوسط سیال خواهد شد که در حقیقت عدد برینکمن بحرانی برای هر

سیالی با توجه به مقدار تلفات تولیدی یک مقدار مشخص بوده که در ادامه، تغییرات آن بررسی خواهد شد. با افزایش بیشتر اثر تلفات در معادله‌ی انرژی، نمودار توزیع دمای بی بعد مسئله برای حالت $Br = -0.1$ در زیر رسم شده است.



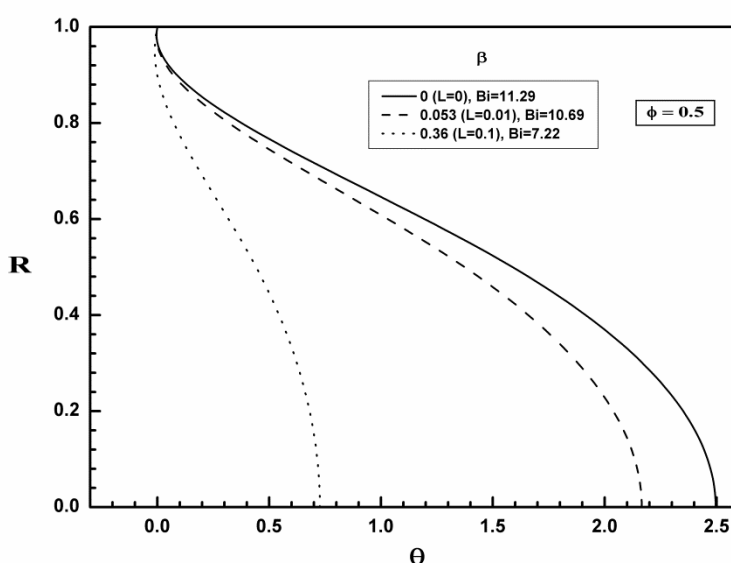
شکل ۴-۱۱: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -0.1$

با توجه به شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود که در این حالت، با توجه به این که هر سیالی با توجه به مقدار تلفات لزجت تولیدی دارای یک مقدار عدد برینکمن بحرانی مشخص می‌باشد، در شرایطی که ضریب لغزش روی سطح کمتر باشد، با توجه به بیشتر بودن تلفات لزجت سیال، عدد برینکمن بحرانی سریع‌تر پدیدار شده و اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت بر شار سرمایشی غلبه کرده و باعث مثبت شدن پارامتر θ در این حالات خواهد شد.

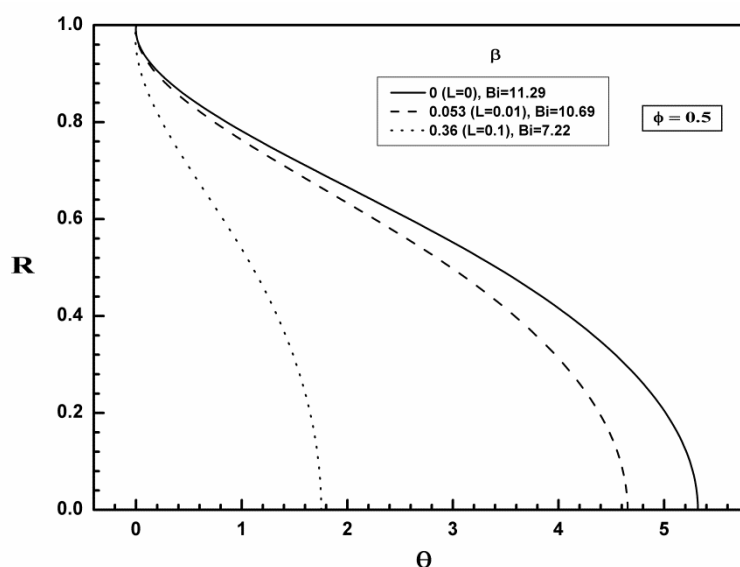
اما برای حالاتی که ضریب لغزش سیال روی دیواره بزرگ‌تر بوده و مقدار تلفات لزجت کمتری تولید می‌شود، اثر شار سرمایشی در این حالت هنوز بر اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت غلبه داشته و باعث منفی بودن پارامتر θ در این حالات خواهد شد.

در زیر، اثر افزایش بیشتر عدد برینکمن در جهت منفی بر روی توزیع دمای بی بعد سیال برای

حالات $Br = -0.5$ و $Br = -1$ مشاهده می‌شود.



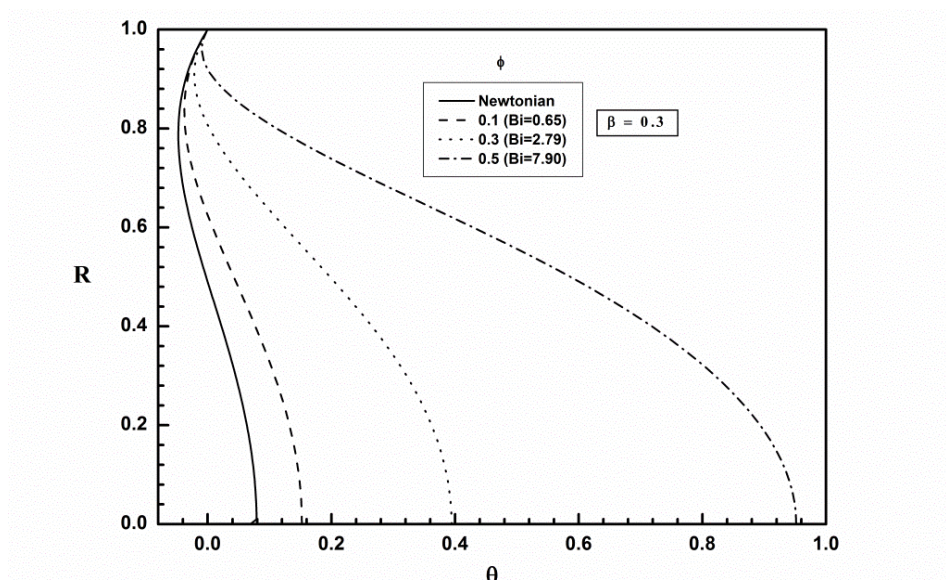
شکل ۴-۱۲: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -0.5$



شکل ۴-۱۳: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -1$

در این حالات نیز مشاهده می‌شود که با افزایش اثر تلفات لزجت سیال در معادله‌ی انرژی، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت به‌طور کامل بر اثر شار سرمایشی وارد بر دیواره غلبه کرده و باعث افزایش دمای متوسط سیال و افزایش بیشتر اختلاف دمای دیواره و سیال عامل خواهد شد. همچنین برای حالتی که ضریب لغزش سیال روی دیواره ثابت باشد نیز برای حالت نیوتونی و

سیالات مختلف بینگهام، نمودار توزیع دمای بی بعد سیال در حالت وجود تلفات لزجت در نمودار زیر رسم شده است.

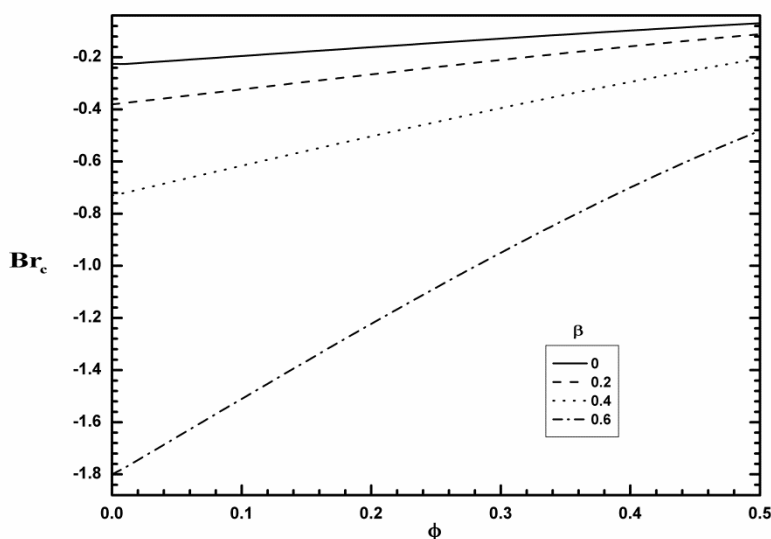


شکل ۴-۱۴: نمودار توزیع دمای بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در ضریب لغزش ثابت در حالت $Br = -0.5$

با مشاهده‌ی شکل ۴-۱۴ نتیجه می‌شود که در این حالت از عدد برینکمن و شرایط لغزش سیال، تمام سیالات مورد بررسی از مقدار بحرانی عدد برینکمن مربوطه گذشته و دمای متوسط سیال در حال افزایش است.

علاوه بر این هرچه سیال دارای ناحیه‌ی جریان پلاگ کوچک‌تری باشد، دارای اختلاف دمای کمتری با دیواره می‌باشد که این امر در بررسی عدد ناسلت، بیشتر به آن اشاره خواهد شد. همان‌طور که عنوان شد با افزایش عدد برینکمن در جهت منفی و رسیدن به یک مقدار بحرانی، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت بر شار سرمایشی غلبه کرده و باعث افزایش دمای متوسط سیال خواهد شد.

در زیر، نمودار تغییرات عدد برینکمن بحرانی بر حسب شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) برای شرایط مختلف لغزش سیال روی دیواره مشاهده می‌شود.



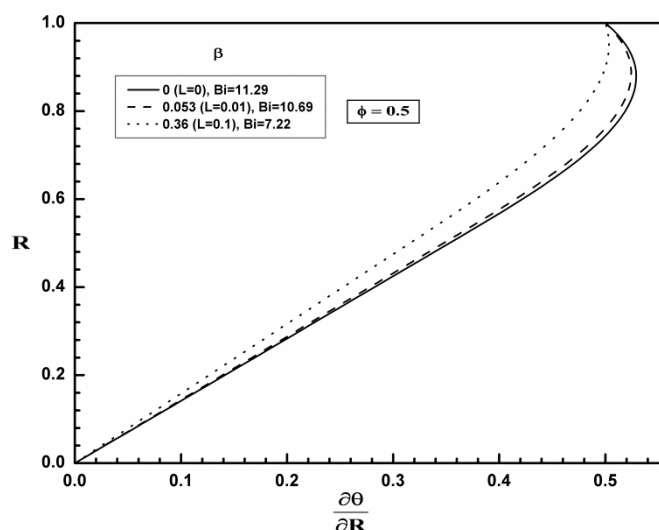
شکل ۴-۱۵: نمودار تغییرات عدد برینکمن بحرانی در برابر تغییرات ϕ برای مقادیر مختلف ضریب لغزش

به این ترتیب همان‌طور که از شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) و کاهش ضریب لغزش (β)، از آن‌جا که مقدار تلفات تولیدی ناشی از لزجت سیال بیشتر می‌شود، مقدار بحرانی عدد برینکمن سریع‌تر پدیدار می‌شود.

۳-۲-۴ بررسی گرادیان دما در حالت گرمایش

همان‌گونه که در فصل گذشته نیز اشاره شد، بررسی گرادیان دمای شعاعی بی بعد که در واقع مشخص‌کننده‌ی اثرات انتقال حرارت هدایتی در نزدیکی دیواره می‌باشد، دارای اهمیت زیادی در زمینه‌ی اطلاع از نحوه‌ی وقوع انتقال حرارت در سیالات مختلف می‌باشد.

در شکل زیر، نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش برای مقدار ثابتی از شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ در حالتی که از وجود تلفات لزجت سیال صرف‌نظر شده، رسم شده است.



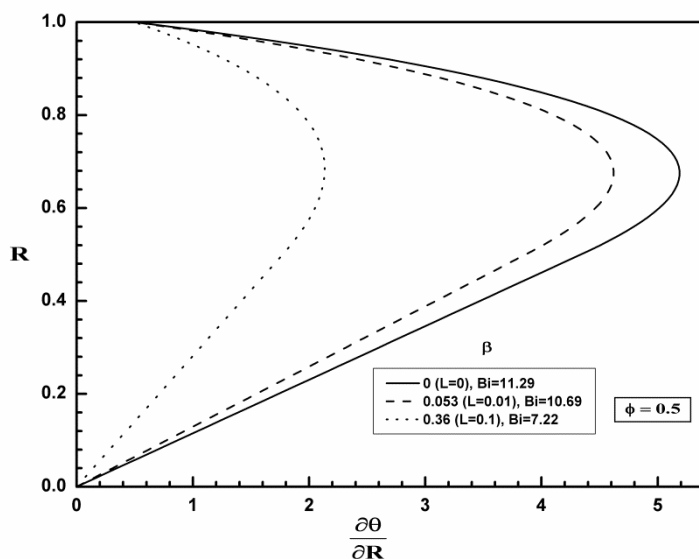
شکل ۴-۱۶: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0$

همان‌طور که از شکل ۴-۱۶ می‌توان مشاهده نمود، سرعت سیال نزدیک دیواره با افزایش ضریب لغزش سیال افزایش می‌یابد که باعث می‌شود تا اثرات انتقال حرارت هدایتی در نزدیکی دیواره شروع به کاهش کند.

در صورتی که برای مقادیر کم ضریب لغزش، سرعت سیال نزدیک دیواره کم بوده و باعث می‌شود شار وارد شده به دیواره در اثر دیفیوژن به عمق سیال نفوذ کرده و به این ترتیب باعث افزایش دمای متوسط سیال شود.

به این ترتیب تا یک شعاع خاص، اثرات انتقال حرارت هدایتی به علت افزایش حرکت جنبشی مولکول‌های سیال نزدیک دیواره افزایش یافته و پس از آن به دلیل افزایش سرعت محوری سیال، از اثرات انتقال حرارت هدایتی کاسته شده و به اثرات انتقال حرارت جابجایی افزوده می‌شود.

اما با توجه به این که در حالت جریان واقعی باید اثرات تلفات لزجت سیال روی دیواره در نظر گرفته شود، به این ترتیب نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد در حالت $Br = 0.5$ در زیر رسم شده است.



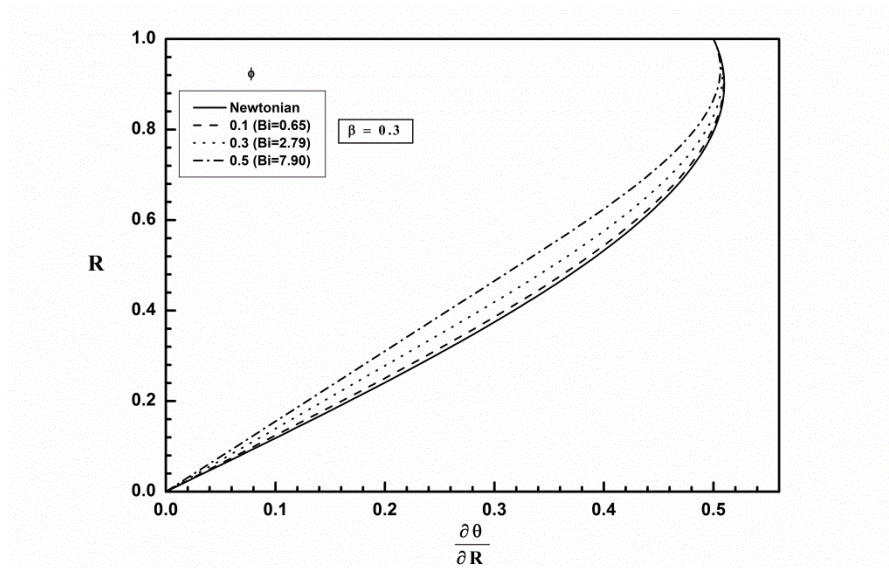
شکل ۴-۱۷: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$

در حالتی که اثر تلفات لزجت سیال در نظر گرفته شود، در واقع اثرات انتقال حرارت هدایتی و تلفات لزجتی در نزدیکی دیواره ترکیب شده و باعث افزایش دمای متوسط سیال می‌شوند که در این حالت با توجه به افزایش اثر دیفیوژن، شعاعی که در آن انتقال حرارت جابجایی حاکم بر سیال می‌شود به سمت مرکز میکروکانال نزدیک‌تر می‌شود.

همان‌طور که عنوان شد هرچه ضریب لغزش سیال روی دیواره کمتر باشد، گرادیان سرعت بیشتری نزدیک دیواره ایجاد می‌شود که باعث می‌شود تا تلفات لزجت تولیدی افزایش یافته و با اثرات انتقال حرارت هدایتی نزدیک دیواره بیشتر ترکیب شود.

هم‌چنین شعاعی که در آن اثرات انتقال حرارت هدایتی شروع به کاهش کرده و در واقع انتقال حرارت جابجایی بر میدان دمایی سیال حاکم می‌شود، در نمودار توزیع دمای بی بعد نیز مشخص است که در آن نقطه، انحناى نمودار توزیع دمای بی بعد عوض می‌شود.

هم‌چنین برای حالتی که ضریب لغزش سیال ثابت باشد نیز نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در شکل زیر رسم شده است.

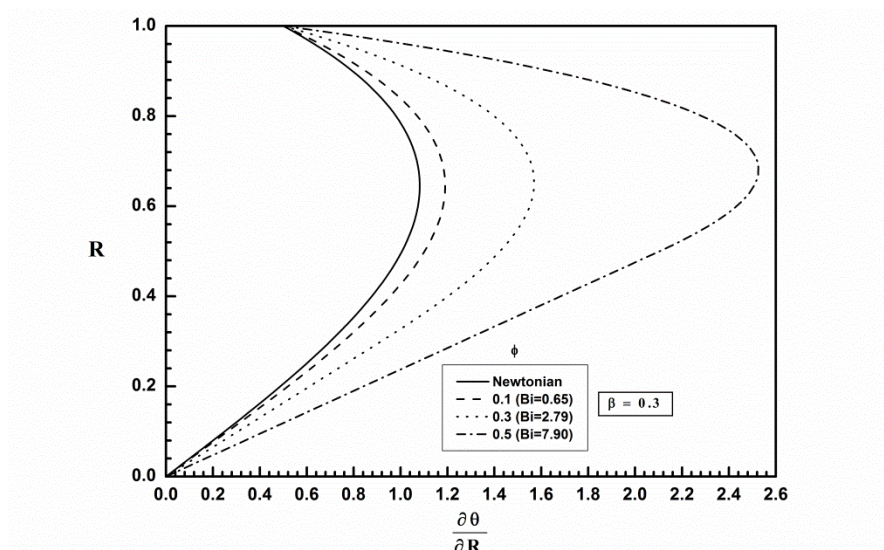


شکل ۴-۱۸: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0$

با توجه به شکل ۴-۲ و از آن جا که سرعت سیال نزدیک دیواره دارای مقدار کمتری نسبت به مرکز میکروکانال می باشد، بنابراین در نزدیکی دیواره اثرات انتقال حرارت هدایتی با دور شدن از دیواره تا یک شعاع خاص شروع به افزایش می کند که پس از آن با افزایش سرعت محوری سیال، از اثرات انتقال حرارت هدایتی نزدیک مرکز میکروکانال کاسته می شود.

این موضوع در خصوص بررسی عدد ناسلت که مشخص کننده ی اثرات انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی در سیال می باشد حائز اهمیت بوده که در بخش مربوط به عدد ناسلت به آن اشاره خواهد شد.

در حالتی که اثر تلفات لزجت سیال افزایش یابد نیز برای مقدار $Br = 0.5$ نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای حالت نیوتونی و سیالات مختلف بینگهام در شکل زیر رسم شده است.



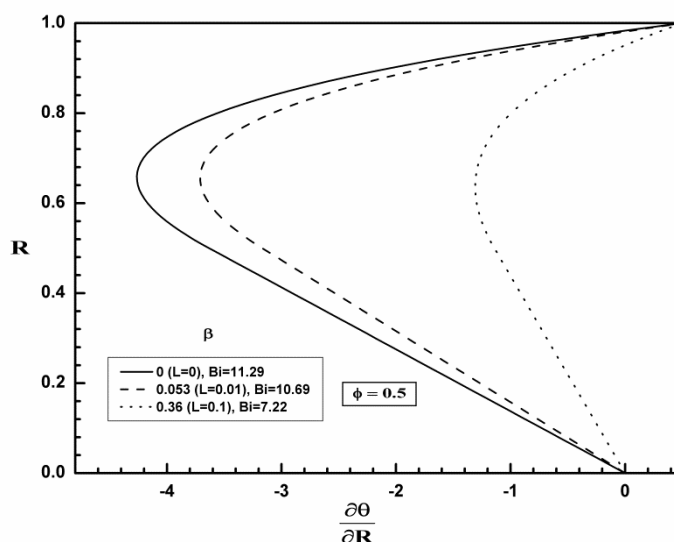
شکل ۴-۱۹: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.5$

از مشاهده‌ی شکل ۴-۱۹ نیز نتیجه می‌شود که برای مقدار ثابتی از ضریب لغزش سیال روی دیواره، با توجه به افزایش تولید گرمای ناشی از تلفات لزجت با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ مربوط به سیال، اثرات انتقال حرارت هدایتی و تلفات لزجی بیشتری نزدیک دیواره ترکیب شده که باعث افزایش دمای متوسط سیال می‌شود.

علاوه بر این، دمای دیواره نیز در اثر افزایش تلفات لزجت افزایش یافته، به‌طوری که افزایش آن بیشتر از افزایش دمای متوسط سیال می‌باشد. به این ترتیب این دو عامل باعث می‌شود تا با افزایش مقدار تلفات لزجت روی دیواره، شاهد اختلاف دمای بیشتری بین سیال عامل و دیواره باشیم که مشخص می‌کند سیال در زمینه‌ی جذب گرمای وارد بر دیواره به‌طور موثر عمل نکرده است.

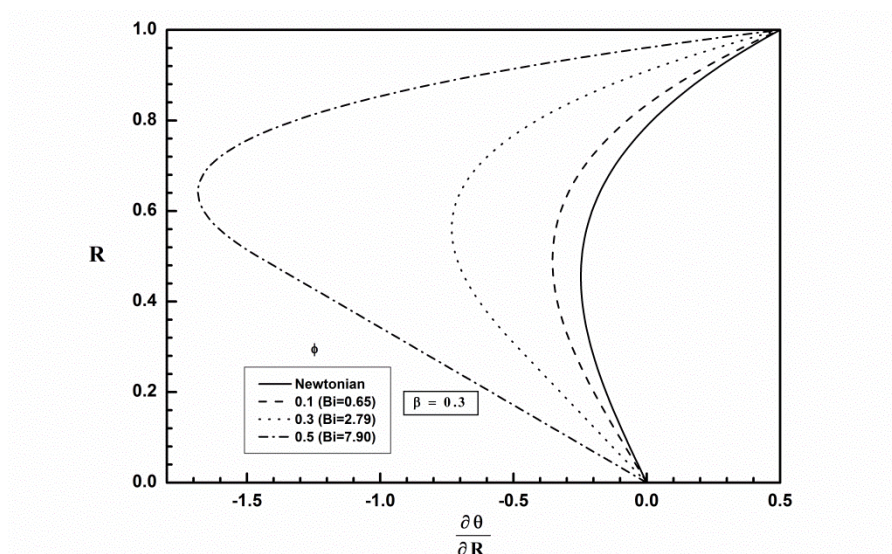
۴-۲-۴ بررسی گرادیان دما در حالت سرمایش

برای بررسی نمودارهای توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد در حالت سرمایش باید با توجه به شکل ۴-۱۵ ابتدا مقدار بحرانی برینکمن مربوط به هر سیالی در نظر گرفته شود. به عنوان مثال در زیر، نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد در حالات مختلف لغزش سیال برای حالت $Br = -0.5$ رسم شده است.



شکل ۴-۲۰: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = -0.5$

با مشاهده‌ی شکل ۴-۲۰ مشخص است که در سه حالت از اثرات لغزش مورد بررسی، اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال بر شار سرمایشی غلبه کرده و باعث افزایش دمای متوسط سیال می‌شوند (گرادیان دمای شعاعی بی بعد منفی)، در حالی که برای حالتی که ضریب لغزش سیال بزرگ‌تر از سایر موارد می‌باشد، عدد برینکمن بحرانی ظاهر نشده و اثرات شار سرمایشی بر اثرات تلفات لزجت غلبه داشته و باعث کاهش دمای متوسط سیال می‌شود (گرادیان دمای شعاعی بی بعد مثبت). هم‌چنین برای حالتی که ضریب لغزش سیال روی دیواره ثابت باشد نیز برای مقادیر مختلف عدد بینگهام، نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۲۱: نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = -0.5$

با توجه به شکل ۴-۲۱ نیز مشاهده می‌شود که در مواقعی که نیاز است تا سیال، شار سرمایشی وارد بر دیواره را دریافت کرده و دمای متوسطش شروع به کاهش کند، نیاز است تا توجه ویژه‌ای به مقدار بحرانی عدد برینکمن با توجه به سیال مربوطه شود تا اثرات شار سرمایشی بر گرمای ناشی از تلفات لزجت غلبه داشته باشد.

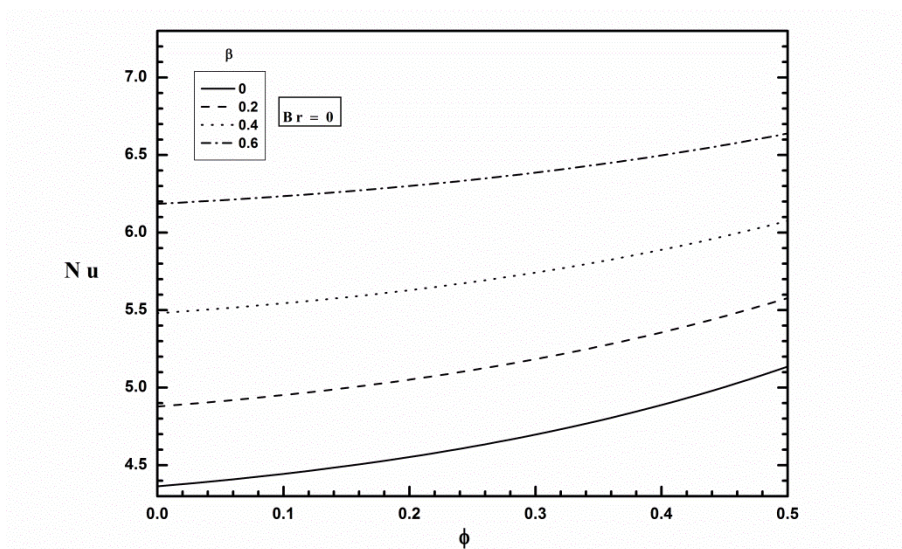
به این ترتیب، سیالات نیوتونی در زمینه جذب شار سرمایشی وارد بر دیواره موفق‌تر از سیالات بینگهام عمل کرده و با توجه به کم بودن تلفات لزجت در این نوع سیالات، عدد برینکمن بحرانی دیرتر پدیدار شده و اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال نسبت به سیالات مختلف بینگهام دیرتر حاکم می‌شود.

علاوه بر این، همان‌طور که برای تمامی حالات مشاهده می‌شود، دمای سیال نزدیک دیواره بیشتر از دمای دیواره می‌باشد که باعث مثبت بودن گرادیان دمای شعاعی بی بعد و یا منفی بودن دمای بی بعد در این ناحیه می‌شود که به‌خوبی در نمودارها قابل مشاهده است.

۳-۴ بررسی عدد ناسلت

در این بخش به تغییرات عدد ناسلت که نشان دهنده‌ی نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی در سیال می‌باشد پرداخته می‌شود.

در زیر، نمودار تغییرات عدد ناسلت با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) در حالت عدم وجود تلفات لزجت برای مقادیر مختلف ضریب لغزش مشاهده می‌شود.

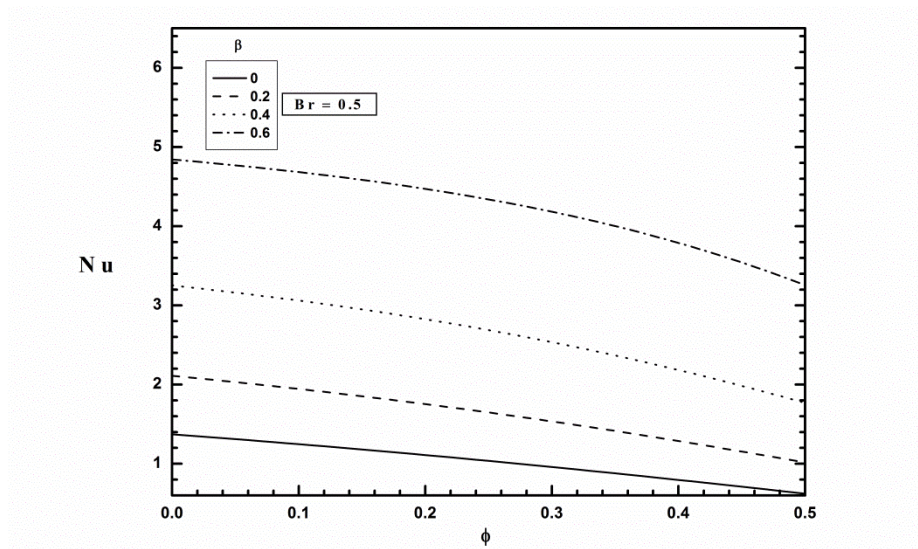


شکل ۳-۴: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات ϕ برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت عدم وجود تلفات

با توجه به شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود که در حالت عدم وجود تلفات لزجت سیال روی دیواره، عدد ناسلت با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ شروع به افزایش می‌کند. زیرا در حالت عدم وجود تلفات، با افزایش مقدار ϕ ، سرعت سیال در نزدیکی دیواره بیشتر بوده و باعث می‌شود تا انتقال حرارت جابجایی سریع‌تر آغاز شود.

با توجه به شکل ۳-۴ نیز به خوبی مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره در حالت عدم وجود تلفات لزجت سیال، انتقال حرارت هدایتی نزدیک دیواره کاهش یافته و سهم بیشتری از انتقال حرارت از طریق جابجایی رخ می‌دهد که باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود.

اما در حالت واقعی که تلفات لزجت سیال روی دیواره وجود دارد، تغییرات عدد ناسلت با افزایش ϕ برای مقادیر مختلف ضریب لغزش به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۴-۲۳: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات ϕ برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت وجود تلفات

بر خلاف حالت قبل، در این جا با توجه به شکل ۴-۲۳، با افزایش مقدار شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ، عدد ناسلت شروع به کاهش می‌کند. زیرا در حالتی که تلفات لزجت سیال در معادله‌ی انرژی در نظر گرفته شود، با افزایش مقدار ϕ در یک مقدار ثابت از ضریب لغزش، اختلاف دمایی متوسط سیال و دیواره شروع به افزایش کرده و طبق تعریف عدد ناسلت و دمایی بی بعد متوسط، باعث کاهش این پارامتر می‌شود.

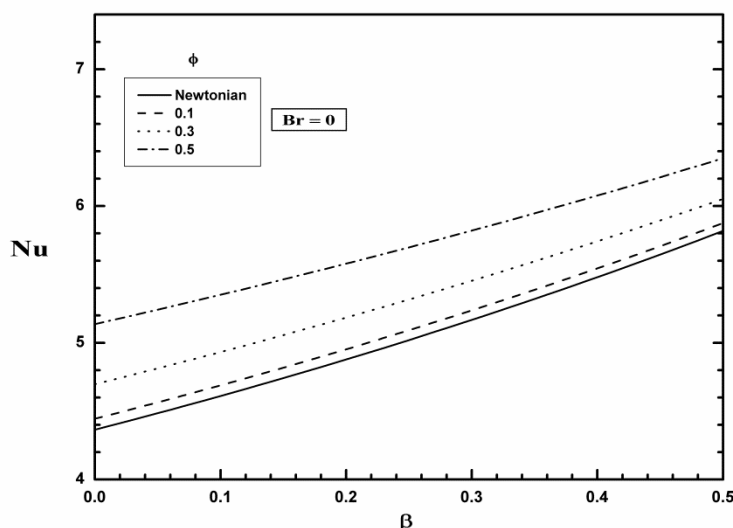
علاوه بر این با توجه به

شکل ۴-۱۹ مشاهده می‌شود که در یک مقدار ثابت از ضریب لغزش، با افزایش مقدار ϕ ، تلفات لزجت تولیدی سیال افزایش یافته و باعث گسترده شدن ناحیه‌ی وقوع انتقال حرارت هدایتی شده و به این ترتیب عدد ناسلت شروع به کاهش می‌کند.

همچنین در این حالت نیز برای یک مقدار ثابت از شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ، با افزایش ضریب لغزش سیال، با توجه به این که سرعت محوری سیال نزدیک دیواره شروع به افزایش می‌کند،

اثرات انتقال حرارت جابجایی سریع تر حاکم شده و باعث افزایش عدد ناسلت می شود.

همچنین می توان تغییرات عدد ناسلت را بر حسب ضریب لغزش سیال روی دیواره برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در زیر مشاهده نمود.

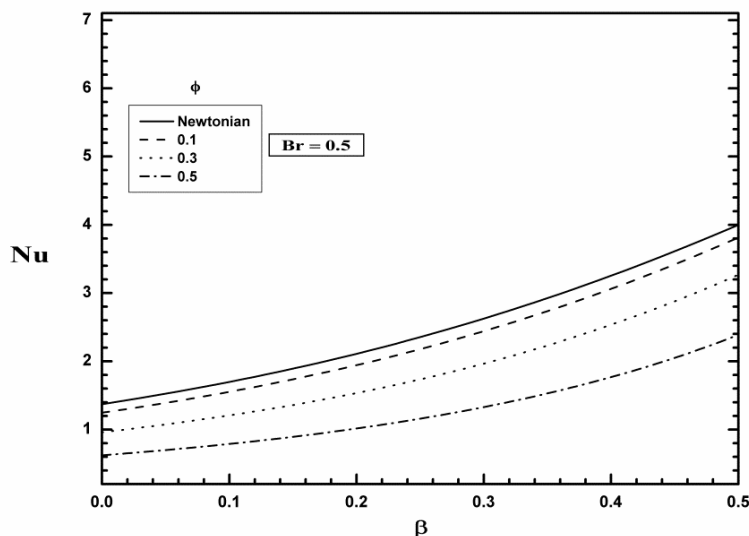


شکل ۴-۲۴: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات ضریب لغزش در حالت عدم وجود تلفات

در حالت عدم وجود تلفات لزجت سیال روی دیواره، با افزایش ضریب لغزش با توجه به شکل ۴-۲۴، عدد ناسلت شروع به افزایش می کند. زیرا با افزایش ضریب لغزش سیال، سرعت سیال نزدیک دیواره افزایش یافته و همین عامل باعث می شود تا ناحیه ی بیشتری از جریان تحت انتقال حرارت جابجایی قرار گیرد که باعث افزایش عدد ناسلت می شود.

همچنین مشاهده می شود که در این حالت برای هر ضریب لغزش روی دیواره، عدد ناسلت سیالات نیوتونی کمتر از سیالات بینگهام می باشد که به دلیل سرعت کمتر این سیالات نزدیک به دیواره در مقایسه با سایر سیالات است که باعث می شود اثرات انتقال حرارت جابجایی کمتر بوده و به این ترتیب عدد ناسلت کوچک تری داشته باشند.

علاوه بر این، با افزایش مقدار عدد برینکمن، مقادیر مربوط به عدد ناسلت کاهش می یابد که با مشاهده ی شکل زیر می توان به این نکته پی برد.

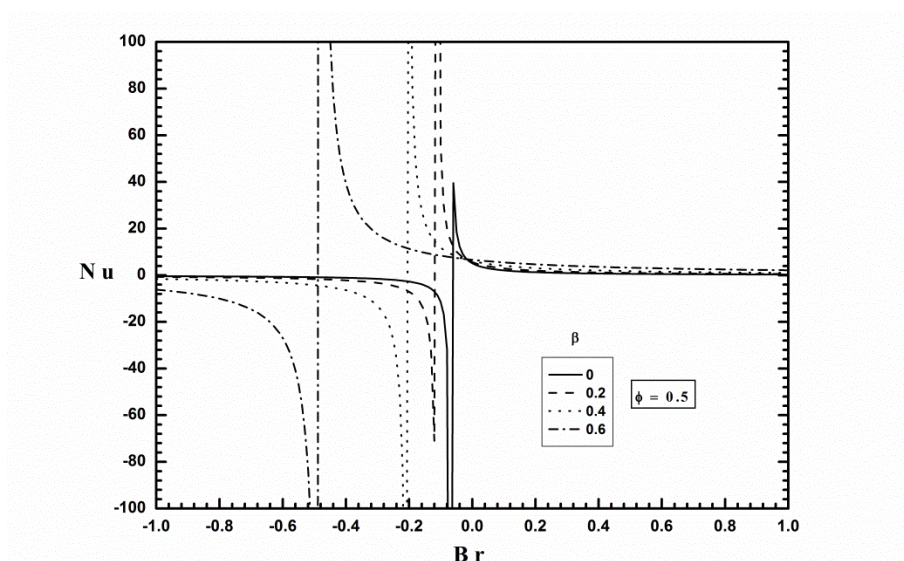


شکل ۴-۲۵: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات ضریب لغزش در حالت وجود تلفات

با افزایش ضریب لغزش سیال در حالت وجود تلفات لزجت سیال روی دیواره نیز با توجه به شکل ۴-۲۵ عدد ناسلت افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره، مقدار تلفات لزجت سیال کمتر شده و دمای دیواره افزایش چندانی ندارد. در نتیجه با توجه به افزایش دمای متوسط سیال در اثر تلفات لزجت و شار وارد به دیواره، اختلاف دمای متوسط سیال و دیواره کم شده و به این ترتیب مطابق تعریف عدد ناسلت، شاهد افزایش این پارامتر خواهیم بود.

علاوه بر این، برای یک مقدار ثابت ضریب لغزش، با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ، به دلیل تولید تلفات لزجت بیشتر و در نتیجه افزایش بیشتر دمای دیواره، اختلاف بیشتری بین دمای متوسط سیال و دیواره حاکم می‌شود که باعث می‌شود تا عدد ناسلت در این حالت دارای مقدار کمتری باشد.

در نهایت تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد برینکمن نیز برای حالات گرمایش و سرمایش دیواره در زیر رسم شده است.

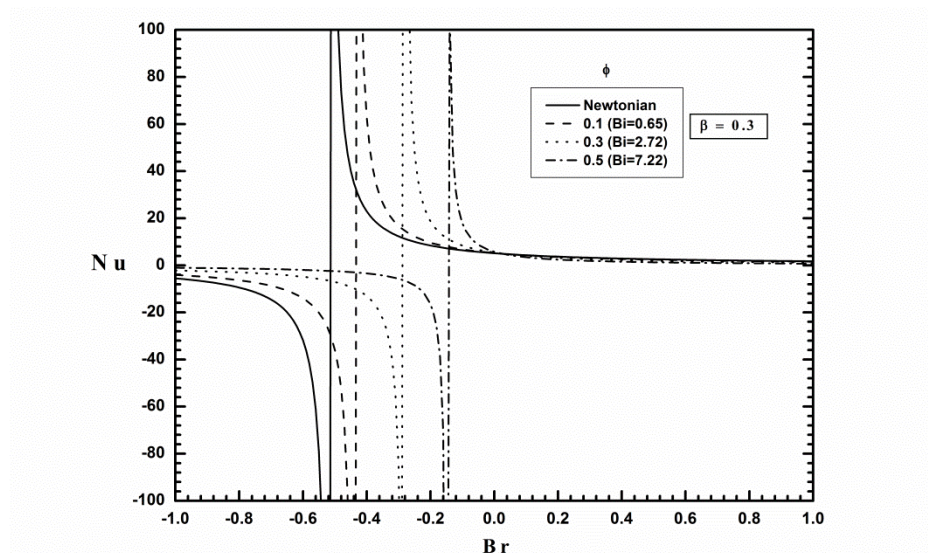


شکل ۴-۲۶: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات عدد برینکمن برای مقادیر مختلف ضریب لغزش

همان‌طور که از شکل ۴-۲۶ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد برینکمن در حالت گرمایش و در واقع افزایش گرمای ناشی از تلفات لزجت، اختلاف دمای متوسط سیال و دیواره مطابق توضیحات گذشته افزایش یافته و باعث کاهش عدد ناسلت می‌شود. در حقیقت در اثر افزایش اثر تلفات لزجت، افزایش دمای دیواره بیشتر از افزایش دمای متوسط سیال بوده و بنابراین اختلاف دمای بین آن‌ها در حال رشد بوده که طبق تعریف عدد ناسلت باعث کاهش این پارامتر خواهد شد.

در حالت سرمایش نیز برای مقادیر مختلف ضریب لغزش، با توجه به شکل ۴-۱۵ که عدد برینکمن بحرانی را برای هر سیال در شرایط مربوطه بیان می‌کند باید به تحلیل نمودار پرداخت. در مقدار بحرانی عدد برینکمن مربوط به هر سیال، با توجه به این‌که اثر شار سرمایشی با اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت برابر می‌شود، نقطه تکینی در نمودار ناسلت به وجود می‌آید که با افزایش بیشتر عدد برینکمن در جهت منفی، دمای متوسط سیال شروع به افزایش کرده و قدر مطلق عدد ناسلت شروع به کاهش می‌کند.

هم‌چنین در یک مقدار ثابت ضریب لغزش، نمودار تغییرات عدد ناسلت برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۲۷: تغییرات عدد ناسلت در برابر تغییرات عدد برینکمن برای مقادیر مختلف عدد بینگهام

در این جا نیز با توجه به شکل ۴-۲۷ مشاهده می شود که در یک مقدار ثابت ضریب لغزش، با توجه به مقدار بحرانی عدد برینکمن، نقطه تکین در نمودار ناسلت ظاهر می شود. هم چنین گفتنی است با توجه به این نکته که افزایش مقدار عدد برینکمن فقط از نظر ریاضیاتی امکان پذیر است و در بررسی های آزمایشگاهی باید محدوده ی معینی داشته باشد، با افزایش بیش از حد عدد برینکمن، مقادیر مجانبی عدد ناسلت برای تمام سیالات مذکور در هر دو حالت گرمایش و سرمایش به سمت صفر میل خواهد نمود. زیرا با افزایش عدد برینکمن، اختلاف دمای متوسط سیال و دیواره با توجه به توضیحاتی که ارائه شد، شروع به افزایش خواهد نمود.

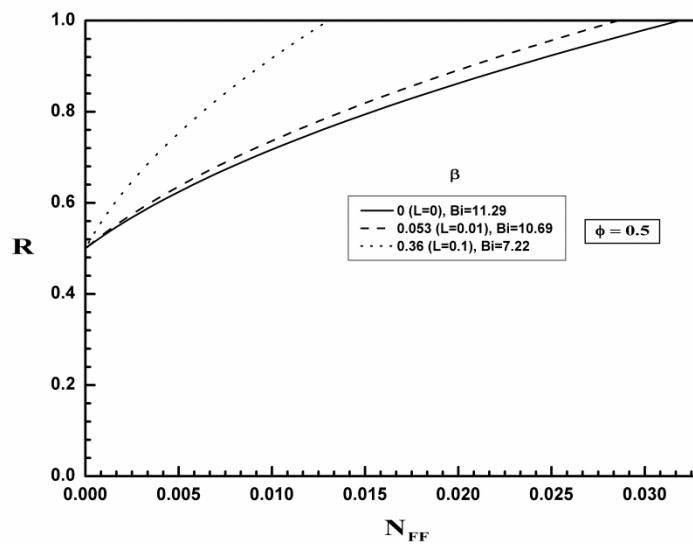
۴-۴ بررسی تولید آنتروپی

همان طور که عنوان شد، تولید آنتروپی در واقع نشان دهنده ی مقدار بازگشت ناپذیری در طی یک فرآیند بوده و معیاری برای عملکرد دستگاه های مهندسی می باشد. در حقیقت، تولید آنتروپی باعث کاهش بازده ترمودینامیکی می شود و تحلیل تولید آنتروپی نشان می دهد که در چه قسمت هایی از سیستم یا مدل، اتلاف انرژی بیشتر است. در این بخش به بررسی تولید آنتروپی اصطکاکی و حرارتی در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره پرداخته خواهد شد.

۴-۴-۱ بررسی تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک

در این بخش به تحلیل تولید آنتروپی ناشی از لزجت سیال پرداخته شده و اثر پارامترهای مختلف از جمله ضریب لغزش در تولید آنتروپی اصطکاکی بررسی خواهد شد.

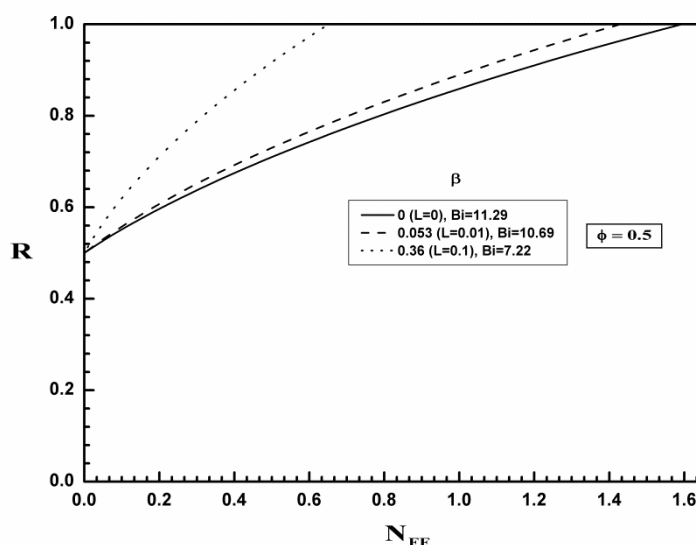
در زیر، نمودار توزیع تولید آنتروپی اصطکاکی برای مقادیر مختلف لغزش سیال روی دیواره در مقدار ثابتی از شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ رسم شده است که در این حالت اثر تلفات لزجت سیال روی دیواره قابل صرف نظر می‌باشد.



شکل ۴-۲۸: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.01$

همان گونه که از شکل ۴-۲۸ مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره از تلفات تولیدی توسط لزجت سیال کاسته شده و به این ترتیب مقدار آنتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک کاهش می‌یابد.

اما در حالتی که اثر تلفات لزجت سیال بیشتر در نظر گرفته شود، توزیع تولید آنتروپی اصطکاکی به صورت زیر خواهد بود.

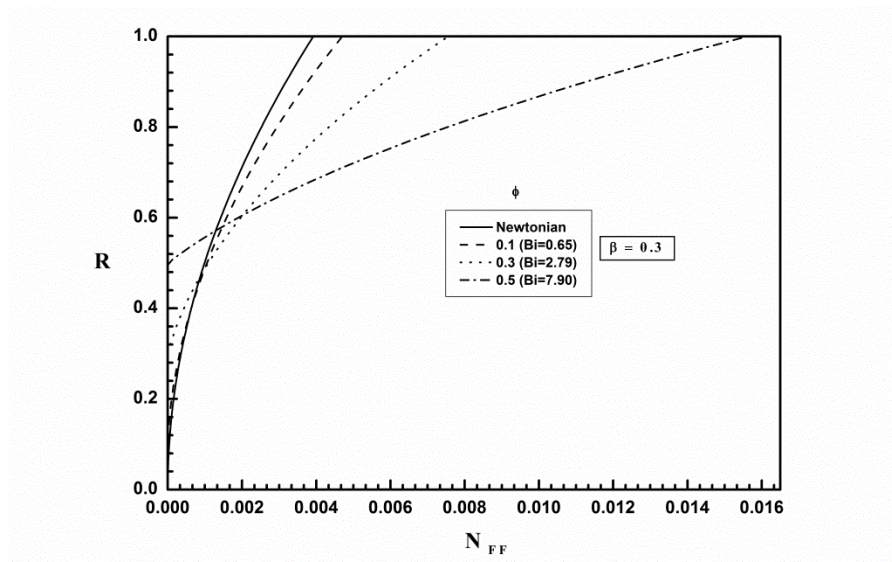


شکل ۴-۲۹: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.5$

بنابراین با توجه به شکل ۴-۲۹ نتیجه می‌شود که با کاهش ضریب لغزش و در نتیجه افزایش اثر تلفات لزجت، مقدار آنتروپی اصطکاکی روی دیواره و در نواحی نزدیک دیواره افزایش خواهد یافت. همچنین با توجه به عدم وجود گرادیان سرعت در ناحیه‌ی جریان پلاگ، آنتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک در این ناحیه وجود نخواهد داشت.

به این ترتیب هرچه ضریب لغزش سیال روی دیواره‌ی میکروکانال بیشتر باشد، آنتروپی اصطکاکی کمتری ایجاد شده و در واقع درصد کمتری از انرژی جنبشی سیال به حرارت تبدیل خواهد شد.

علاوه بر این برای حالتی که ضریب لغزش سیال روی دیواره مقدار ثابتی در نظر گرفته شود نیز نمودار توزیع تولید آنتروپی برای مقادیر مختلف شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ در زیر رسم شده است.



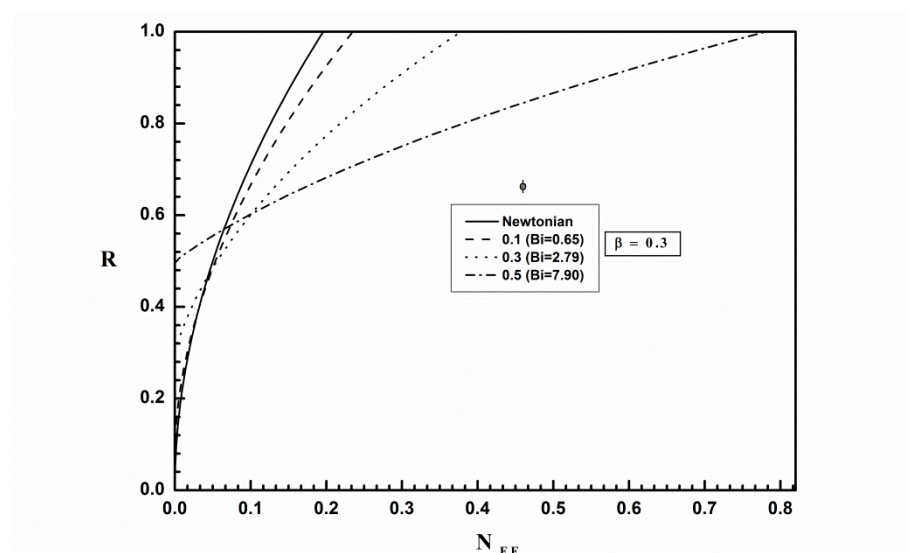
شکل ۳۰-۴: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.01$

با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ، مقدار تلفات ناشی از لزجت سیال روی دیواره

افزایش یافته و باعث افزایش مقدار تولید آنتروپی در این ناحیه می‌شود که با مشاهده‌ی شکل ۳۰-۴ این موضوع به‌خوبی قابل استنباط می‌باشد.

همچنین با افزایش اثر تلفات لزجت، نمودار توزیع آنتروپی ناشی از اصطکاک در یک مقدار ثابت

از ضریب لغزش به صورت زیر می‌باشد.



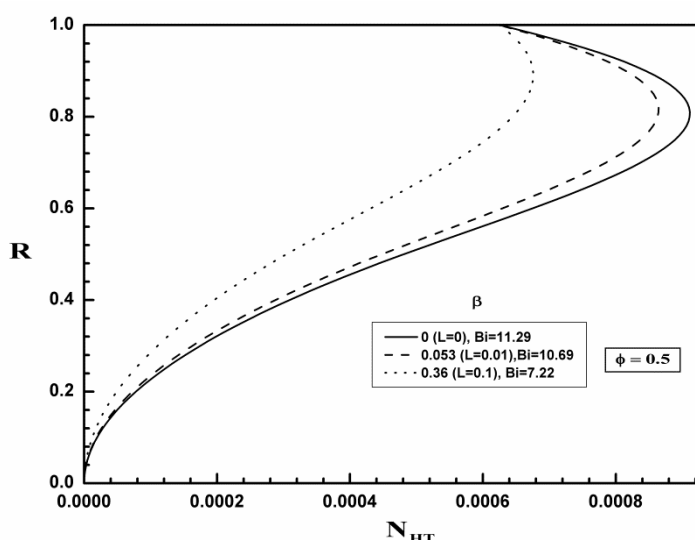
شکل ۳۱-۴: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در حالت $Br = 0.5$

به این ترتیب با توجه به شکل ۴-۳۱ مشاهده می‌شود که سیالات نیوتونی دارای تولید آنتروپی اصطکاکی کمتری از سیالات بینگهام بوده و این امر می‌تواند در بررسی محققان مفید واقع شود. بنابراین مشخص می‌شود که برای سیالات نیوتونی، درصد کمتری از انرژی جنبشی که قابلیت تولید کار مفید داشته به حرارت تبدیل می‌شود که در واقع به فرمی از انرژی تبدیل شده که قابلیت چندانی برای تولید کار مفید نخواهد داشت.

۴-۴-۲ بررسی تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت

در این بخش نیز به تحلیل تولید آنتروپی حرارتی پرداخته و اثر پارامترهای مختلف در آن بررسی می‌شود. هم‌چنین به تحلیل نقاطی از جریان که تولید آنتروپی حرارتی بیشترین مقدار می‌باشد نیز پرداخته خواهد شد.

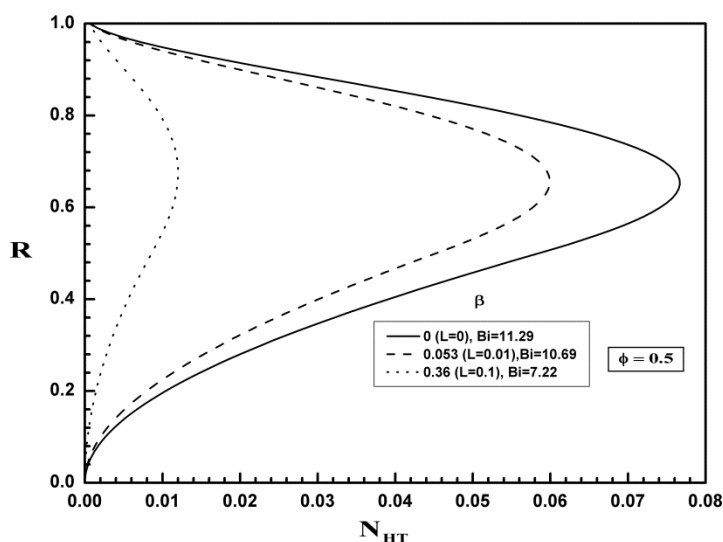
در این قسمت نیز ابتدا برای حالتی که شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ ثابت فرض شود، نمودار توزیع آنتروپی حرارتی رسم شده است. در زیر، نمودار توزیع آنتروپی حرارتی برای مقادیر مختلف لغزش سیال روی دیواره رسم شده است.



شکل ۴-۳۲: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.01$

در حالتی که اثر تلفات لزجت سیال قابل صرف نظر باشد، با توجه به نمودار توزیع گرادیان دمای شعاعی بی بعد سیال، تولید آنتروپی ناشی از حرارت نیز قابل صرف نظر می باشد که این موضوع در شکل ۴-۳۲ قابل مشاهده می باشد.

اما با افزایش اثر تلفات لزجت سیال، اثرات شار حرارتی روی دیواره و تلفات لزجت ترکیب شده و باعث افزایش تولید آنتروپی حرارتی می شود که در شکل زیر مشاهده می شود.

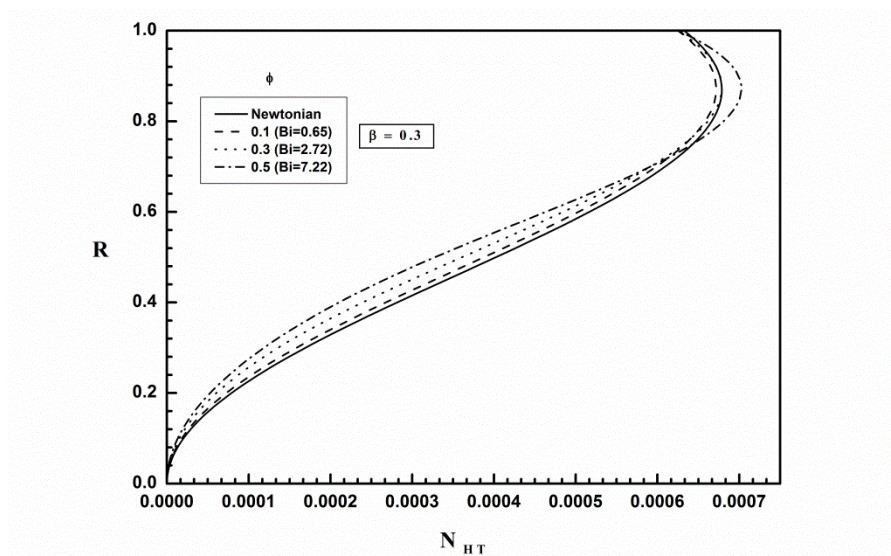


شکل ۴-۳۳: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.5$

با توجه به شکل ۴-۳۳ نتیجه می شود هرچه لغزش سیال روی دیواره بیشتر باشد، از آن جا که اثرات کمتری از گرمای ناشی از تلفات با شار حرارتی روی دیواره ترکیب می شوند، مقدار آنتروپی تولیدی ناشی از حرارت نیز کاهش می یابد.

به این ترتیب مشخص می شود هرچه سیال دارای ضریب لغزش بیشتری روی دیواره باشد، دارای بازده ترمودینامیکی بیشتری بوده و قابلیت بیشتری برای تولید کار مفید خواهد داشت.

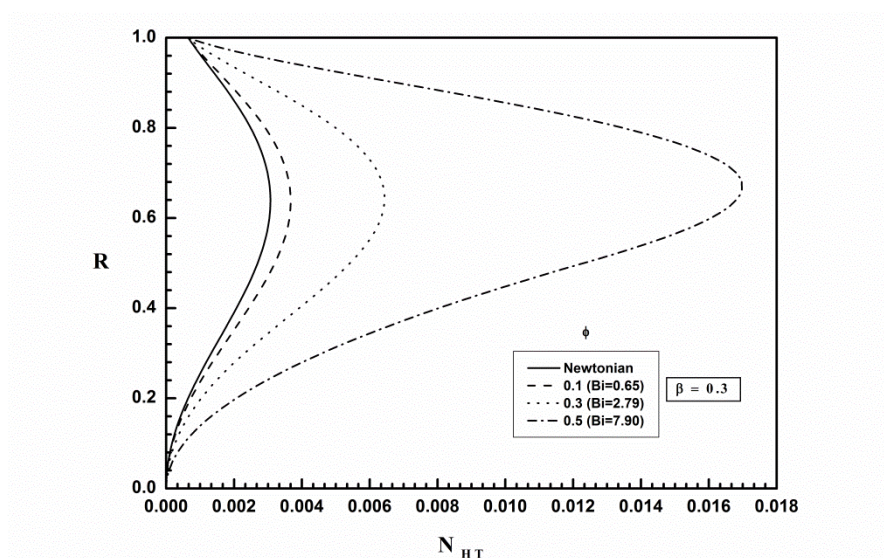
همچنین برای حالتی که شعاع بی بعد ناحیه ی جریان پلاگ تغییر کند، برای یک مقدار ثابت از ضریب لغزش، تغییرات آنتروپی حرارتی رسم شده است.



شکل ۴-۳۴: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.01$

در این حالت، با توجه به این که اثرات تلفات لزجت روی دیواره قابل صرف نظر می باشد، تولید آنتروپی ناشی از حرارت بسیار کم بوده و با نزدیک شدن به مرکز نیز از مقدار آن کاسته خواهد شد که با توجه به شکل ۴-۳۴ می توان به این موضوع پی برد.

اما با افزایش مقدار عدد برینکمن، تأثیر قابل ملاحظه ای روی توزیع آنتروپی ناشی از حرارت به وقوع می پیوندد که این موضوع در نمودار زیر مشاهده می شود.



شکل ۴-۳۵: نمودار توزیع تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در حالت $Br = 0.5$

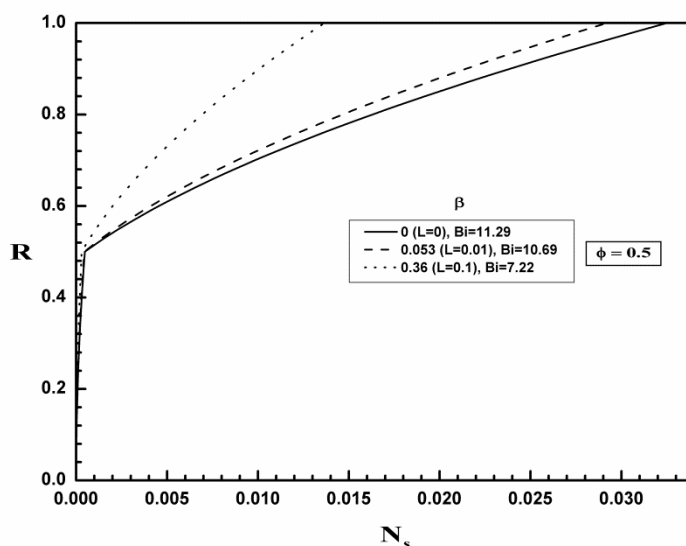
به این ترتیب نتیجه می‌شود که با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ)، با توجه به افزایش تلفات تولیدی ناشی از لزجت سیال در نزدیکی دیواره، تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت افزایش یافته و سهم بیشتری از آنتروپی کل تولیدی را شامل می‌شود که این موضوع در شکل ۴-۳۵ قابل مشاهده است.

در ادامه به بررسی تغییرات تولید آنتروپی کلی ناشی از دو اثر اصطکاک و انتقال حرارت پرداخته خواهد شد که نمودارهای مربوطه در بخش بعد ترسیم شده‌اند.

۴-۳-۴ بررسی تولید آنتروپی کلی

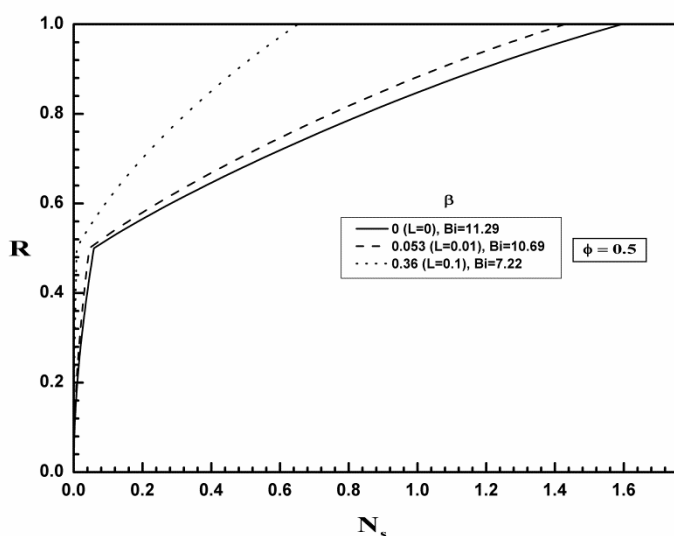
با توجه به این موضوع که تولید آنتروپی در واقع نشان دهنده‌ی کاهش قابلیت کاردهی سیستم است، بنابراین بررسی آن جهت تعیین بازده ترمودینامیکی دستگاه‌های مهندسی و سیستم‌های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

در زیر، روند تغییرات آنتروپی کلی در مقادیر مختلف لغزش برای مقادیر قابل صرف‌نظر تلفات لزجت روی دیواره مشاهده می‌شود.



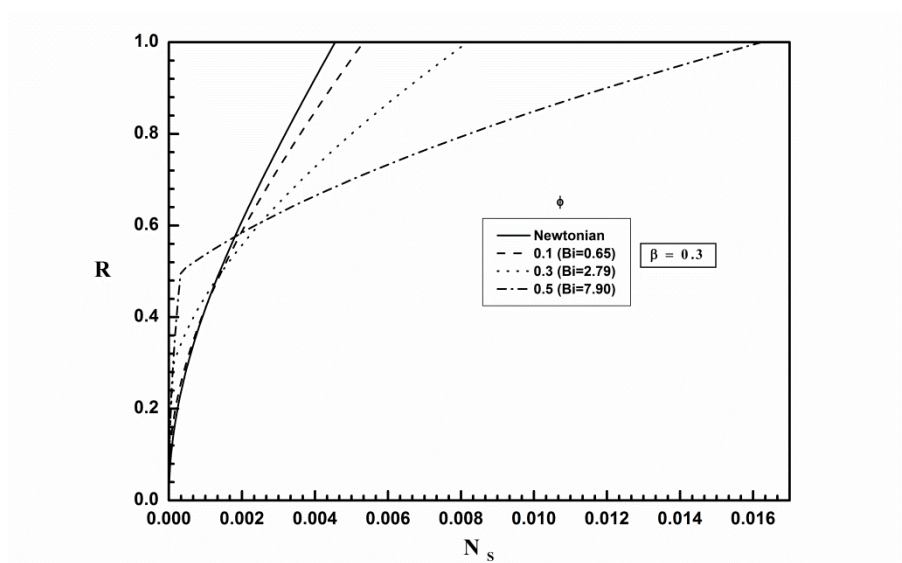
شکل ۴-۳۶: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.01$

همان‌طور که از شکل ۴-۳۶ مشاهده می‌شود، روند تغییرات آنتروپی کلی مشابه تغییرات آنتروپی ناشی از اصطکاک می‌باشد که نشان از غالب بودن تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک بر آنتروپی ناشی از حرارت می‌باشد که این موضوع در نمودارهای عدد بیژن قابل تحقیق می‌باشد. هم‌چنین با افزایش مقدار عدد برینکمن، مشاهده می‌شود که تولید آنتروپی کلی رشد قابل ملاحظه‌ای دارد که در شکل زیر ملاحظه می‌شود.



شکل ۴-۳۷: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.5$

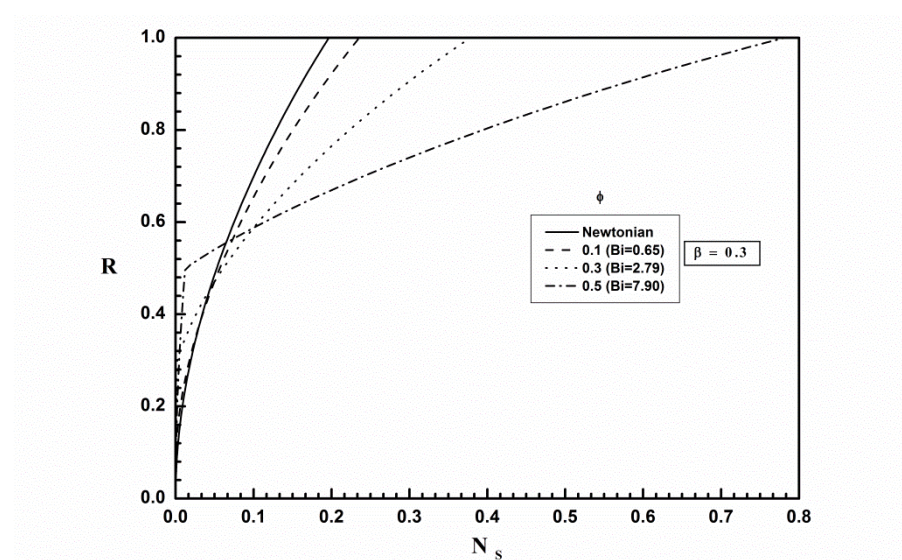
بنابراین با مشاهده‌ی شکل ۴-۳۷ نتیجه می‌شود که با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره، تولید آنتروپی کلی به شدت کاهش می‌یابد که این موضوع می‌تواند مورد توجه محققان جهت افزایش کار مفید قرار بگیرد. هم‌چنین برای حالتی که سیال دارای ضریب لغزش ثابتی روی دیواره‌ی میکروکانال باشد، تغییرات آنتروپی کلی در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۳۸: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.01$

از روند تغییرات شکل ۴-۳۸ نتیجه می‌شود که برای حالتی که تلفات لزجت سیال روی دیواره قابل چشم‌پوشی باشد، تولید آنتروپی کلی مقدار کمی داشته که با نزدیک شدن به مرکز میکروکانال نیز از مقدار آن کاسته می‌شود.

اما افزایش اثر تلفات لزجت روی تولید آنتروپی کلی را می‌توان در شکل زیر مشاهده نمود.

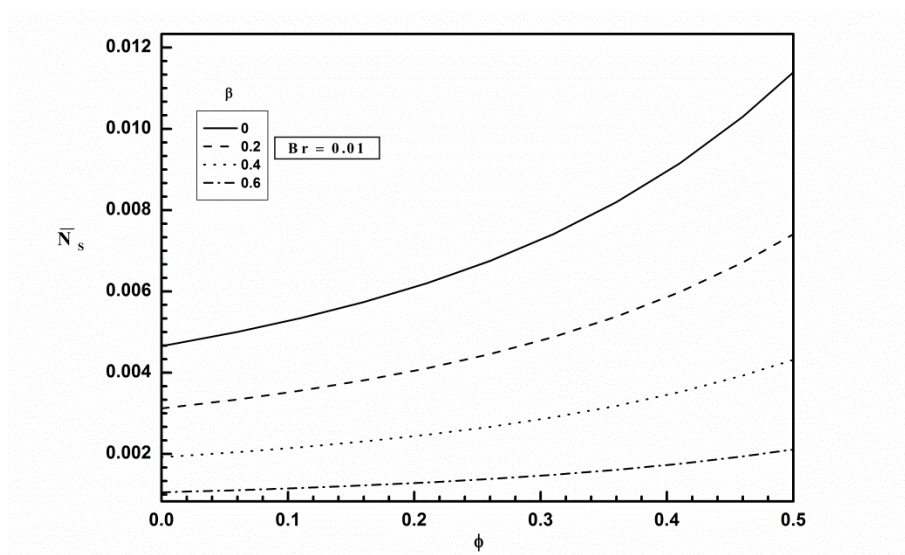


شکل ۴-۳۹: نمودار توزیع تولید آنتروپی کلی در حالت $Br = 0.5$

با مشاهده‌ی شکل ۴-۳۹ می‌توان نتیجه گرفت که سیالات نیوتونی نسبت به سیالات بینگهام، آنتروپی کمتری تولید کرده که این موضوع می‌تواند کاربرد زیادی جهت استفاده از سیالات مختلف در میکروکانال‌ها جهت مقاصد مختلف داشته باشد.

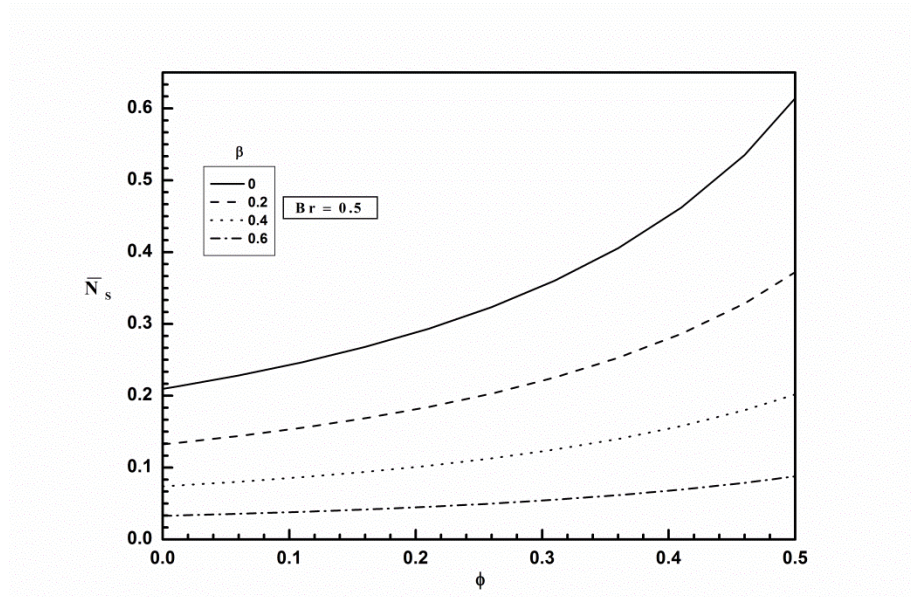
۴-۴-۴ بررسی آنتروپی کلی متوسط

اما همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، بررسی مقادیر متوسط پارامترهای مختلف برای محققان مفیدتر از تحلیل آن‌ها در نواحی مختلف میکروکانال می‌باشد. به همین منظور نمودار تغییرات آنتروپی کلی متوسط برای مقادیر قابل صرف‌نظر تلفات لزجت سیال در شکل زیر رسم شده است.



شکل ۴-۴۰: نمودار تغییرات آنتروپی کلی متوسط با افزایش ضریب لغزش در حالت $Br = 0.01$

با مشاهده‌ی شکل ۴-۴۰ می‌توان به این نکته پی برد که افزایش ضریب لغزش سیال برای یک مقدار ثابت از شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ و همچنین کاهش مقدار شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ در ضریب لغزش ثابت، باعث کاهش آنتروپی کلی متوسط در طول میکروکانال خواهد شد. علاوه بر این با افزایش عدد برینکمن و در واقع افزایش اثر تلفات لزجت سیال در نزدیکی دیواره، نمودار آنتروپی کلی متوسط به صورت زیر خواهد بود.



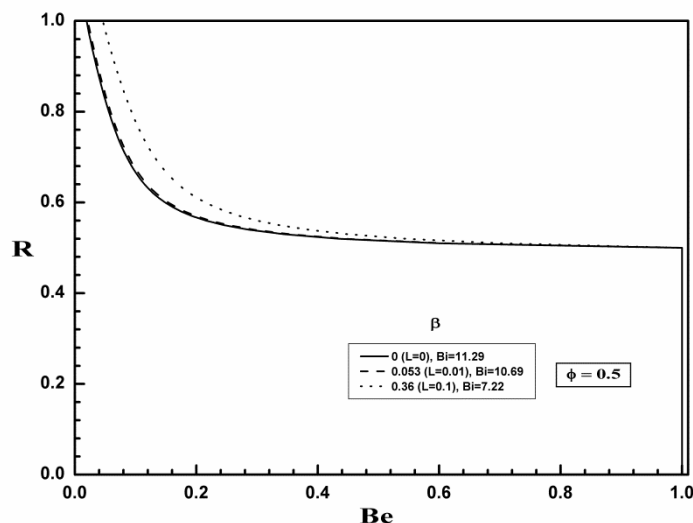
شکل ۴-۴۱: نمودار تغییرات آنتروپی کلی متوسط با افزایش ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$

بنابراین با مقایسه‌ی شکل ۴-۴۱ و نمودار قبل، نتیجه می‌شود که افزایش عدد برینکمن باعث افزایش مقدار تولید آنتروپی در طول میکروکانال خواهد شد.

در نتیجه افزایش عدد برینکمن و در واقع افزایش اثر تلفات لزجت سیال، به شدت باعث کاهش تولید کار مفید تولید توسط سیال شده و بازده ترمودینامیکی آن را کاهش خواهد داد.

۴-۴-۵ بررسی عدد بیژن

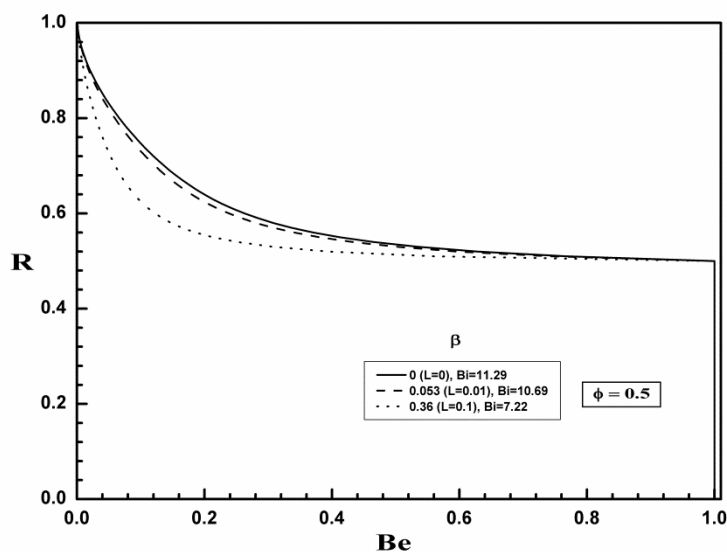
برای بررسی نسبت وقوع تولید آنتروپی حرارتی به آنتروپی اصطکاکی در نواحی مختلف میکروکانال، نیاز به تحلیل پارامتر بی بعد عدد بیژن می‌باشد که در این بخش به آن پرداخته می‌شود. ابتدا به تحلیل عدد بیژن برای مقادیر مختلف ضریب لغزش روی دیواره برای یک شعاع بی بعد خاص از ناحیه‌ی جریان پلاگ پرداخته می‌شود. در زیر، این نمودار برای مقادیر کم تلفات لزجت روی دیواره مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۴۲: نمودار عدد بیژن برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.01$

با توجه به شکل ۴-۴۲ مشاهده می‌شود که در حالتی که تلفات لزجت سیال قابل صرف‌نظر باشد، با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره، تولید آنتروپی ناشی از حرارت در نزدیکی دیواره بیشتر از آنتروپی اصطکاکی می‌باشد. همچنین در ناحیه‌ی جریان پلاگ نیز با توجه به عدم تولید آنتروپی اصطکاکی، مقدار عدد بیژن با توجه به تعریف این پارامتر برابر یک می‌باشد.

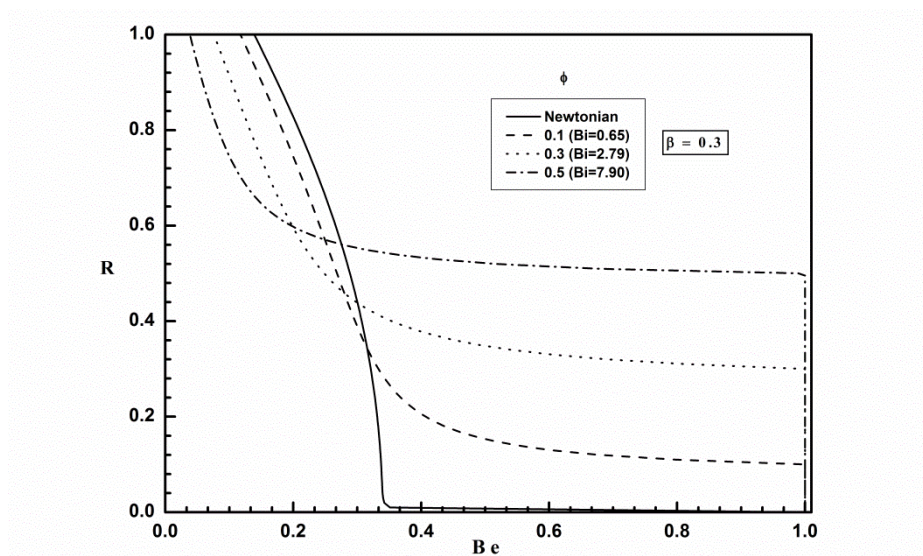
اما در جریان واقعی با افزایش اثر تلفات لزجت، نمودار تغییرات عدد بیژن به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۴-۴۳: نمودار عدد بیژن برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$

همان‌طور که از شکل ۴-۴۳ مشاهده می‌شود، با افزایش اثر تلفات لزجت سیال، تولید آنتروپی حرارتی و اصطکاکی افزایش یافته که افزایش آنتروپی اصطکاکی بیشتر از آنتروپی حرارتی بوده و باعث کاهش عدد بیژن در نزدیکی دیواره می‌شود که این موضوع نیز برای کاربردهایی که نیاز به دانستن سهم آنتروپی حرارتی و اصطکاکی در نواحی مختلف می‌باشد، مفید است.

هم‌چنین نمودار عدد بیژن برای حالتی که ضریب لغزش سیال روی دیواره مقدار ثابتی باشد نیز، برای مقادیر مختلف شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ در شکل زیر رسم شده است.



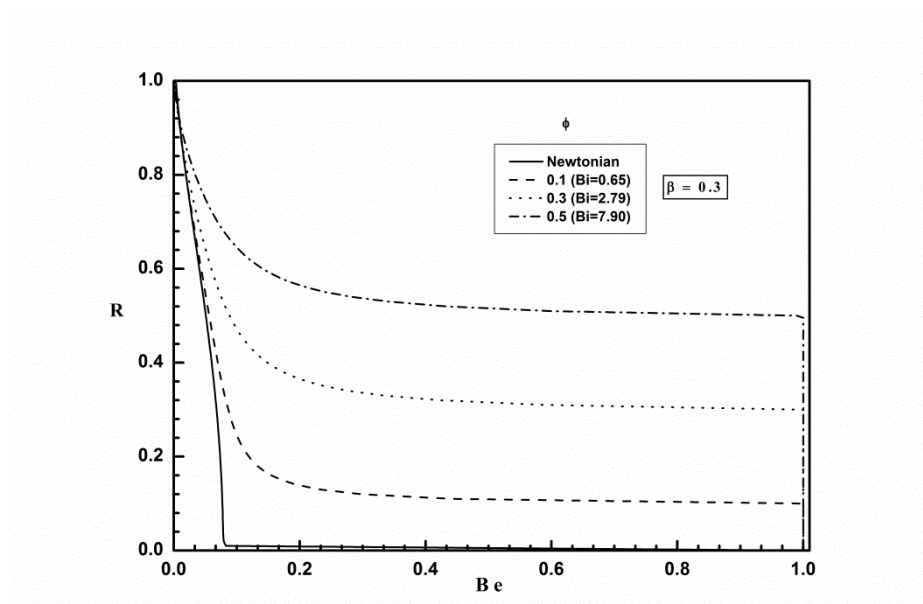
شکل ۴-۴۴: نمودار عدد بیژن برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.01$

به این ترتیب در حالتی که تولید تلفات لزجت کم و قابل صرف‌نظر باشد، با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ)، میزان تولید آنتروپی اصطکاکی نزدیک دیواره افزایش یافته و از تولید آنتروپی ناشی از حرارت کاسته می‌شود که این موضوع در شکل ۴-۴۴ قابل مشاهده است.

علاوه بر این با نزدیک شدن به مرکز میکروکانال نیز، به میزان تولید آنتروپی ناشی از حرارت افزوده شده و از میزان تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک کاسته می‌شود. هم‌چنین در سیالات بینگهام نیز با نزدیک شدن به ناحیه‌ی جریان پلاگ، مقدار عدد بیژن به سرعت افزایش یافته و به مقدار یک می‌رسد که نشان دهنده‌ی حاکم بودن آنتروپی حرارتی و عدم تولید آنتروپی اصطکاکی در این ناحیه

می‌باشد.

برای جریان واقعی و در واقع حالتی که اثر تلفات لزجت روی دیواره قابل ملاحظه باشد نیز نمودار تغییرات عدد بیژن در شکل زیر رسم شده است.



شکل ۴-۴: نمودار عدد بیژن برای مقادیر مختلف عدد بینگهام در حالت $Br = 0.5$

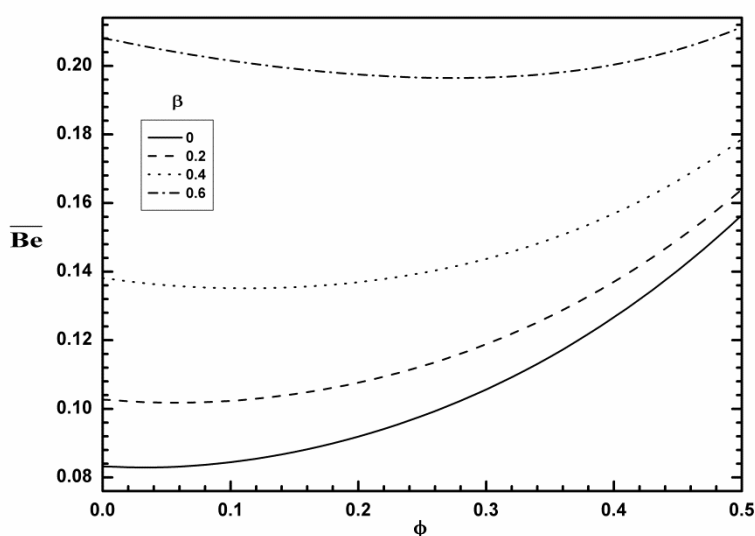
در این حالت نیز با توجه به شکل ۴-۴ ملاحظه می‌شود که در یک مقدار ثابت ضریب لغزش، هرچه شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) بیشتر باشد، تولید آنتروپی اصطکاکی نزدیک دیواره بیشتر از تولید آنتروپی ناشی از حرارت بوده و با نزدیک شدن به مرکز میکروکانال، رشد تولید آنتروپی حرارتی بیشتر از رشد آنتروپی اصطکاکی می‌باشد که می‌توان از این تحلیل جهت مشخص نمودن مناطقی که در آن‌ها تولید آنتروپی اصطکاکی یا حرارتی حاکم می‌باشد، استفاده نمود.

اما همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، محققان نیاز بیشتری به دانستن تغییرات مقادیر متوسط پارامترها داشته و از روی آن‌ها به تحلیل موارد مورد نیاز خود می‌پردازند. به همین منظور در بخش بعد به تحلیل مقادیر متوسط این پارامتر پرداخته خواهد شد.

۴-۴-۶ بررسی عدد بیژن متوسط

در این بخش به تحلیل مقادیر متوسط عدد بیژن در طول میکروکانال پرداخته می‌شود که این مقادیر متوسط می‌تواند برای محققان مفیدتر واقع شود.

ابتدا برای حالتی که اثر تلفات لزجت سیال روی دیواره ناچیز باشد ($Br = 0.01$)، تغییرات عدد بیژن متوسط با افزایش ضریب لغزش سیال در شکل زیر رسم شده است.

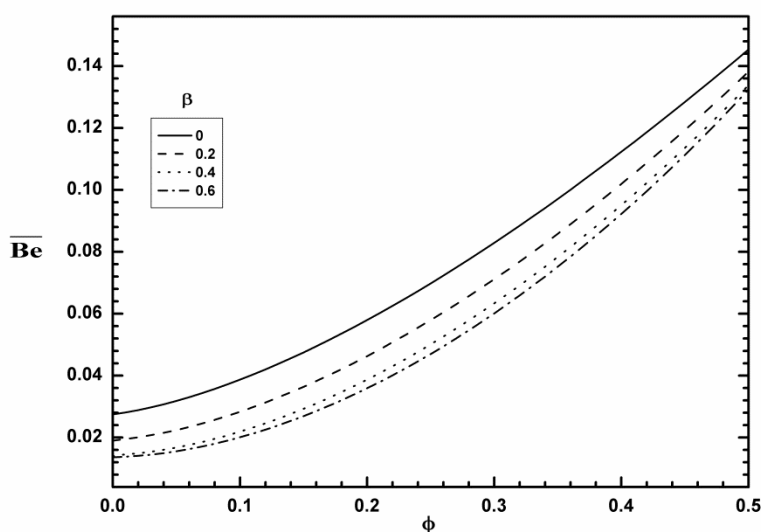


شکل ۴-۴: نمودار تغییرات عدد بیژن متوسط با افزایش ضریب لغزش در حالت $Br = 0.01$

همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به شکل ۴-۴، در این حالت با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ و ضریب لغزش، مقادیر متوسط عدد بیژن در طول میکروکانال شروع به افزایش می‌کند.

بنابراین در حالتی که تولید تلفات لزجت سیال قابل صرف‌نظر باشد، با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره، رشد آنتروپی حرارتی بیشتر از رشد آنتروپی اصطکاکی در هر ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع مشخص می‌باشد.

اما در حالت جریان واقعی، تغییرات عدد بیژن متوسط با افزایش ضریب لغزش سیال به صورت شکل زیر می‌باشد.



شکل ۴-۴۷: نمودار تغییرات عدد بیژن متوسط با افزایش ضریب لغزش در حالت $Br = 0.5$

همان گونه که از شکل ۴-۴۷ مشخص است، با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ و کاهش ضریب لغزش، مقادیر متوسط عدد بیژن افزایش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به نمودار قبل مشاهده می‌شود که افزایش اثر تلفات لزجت نیز باعث کاهش این پارامتر خواهد شد. به این ترتیب مشخص می‌شود که رشد تولید آنتروپی حرارتی با پارامترهای مذکور بیشتر از رشد آنتروپی اصطکاکی می‌باشد. زیرا تولید آنتروپی حرارتی وابستگی شدیدی به توزیع دما و در نتیجه مقادیر عدد برینکمن و اثر تلفات لزجت سیال روی دیواره دارد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش به بررسی انتقال حرارت و تولید آنتروپی سیال غیر نیوتونی بینگهام در یک میکروکانال مدور از یک هیت سینک حرارتی که تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد پرداخته شد و پارامترهای موثر در آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. در واقع با فرض جریان آرام و توسعه یافته در یک میکروکانال مدور در دو حالت وجود و عدم وجود لغزش سیال روی دیواره، میادین سرعت و دما و تولید آنتروپی برای سیال بینگهام مورد بررسی قرار گرفتند. در هر بخش نیز، نتایج به‌دست آمده برای سیال بینگهام با نتایج مربوط به سیالات نیوتونی مورد مقایسه قرار گرفت.

در این فصل، ابتدا به برخی از مهم‌ترین نتایج پژوهش که در فصول گذشته نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفت اشاره خواهد شد؛ در نهایت نیز چند مورد از پژوهش‌هایی که می‌تواند در آینده در این زمینه مورد تحلیل قرار گیرد عنوان خواهد شد.

۵-۱ مشاهدات و نتایج

همان‌گونه که در فصول سوم و چهارم مشاهده شد، در هر بخش به تحلیل نمودارهای میادین سرعت، دما و تحلیل آنتروپی پرداخته و نتایج آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

در این قسمت به بررسی و تحلیل مهم‌ترین مشاهدات و نتایج این پژوهش پرداخته می‌شود که به‌طور خلاصه در زیر عنوان شده‌اند:

✓ با توجه به نتایج به‌دست آمده از میدان سرعت در حالت عدم لغزش سیال روی دیواره نتیجه می‌شود که با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ)، علاوه بر کاهش سرعت ماکزیمم سیال در مرکز میکروکانال، گرادیان سرعت سیال روی دیواره افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش تلفات لزجت سیال شده و به این ترتیب دمای دیواره و دمای متوسط سیال بالا رفته و اختلاف دمای بیشتری بین دمای محلی سیال و دیواره ایجاد خواهد شد. علاوه بر این مشاهده شد که افزایش دمای دیواره در اثر افزایش تلفات لزجت بیشتر از افزایش دمای متوسط سیال می‌باشد. هم‌چنین، گفتنی است که مقدار تولید آنتروپی نیز در این حالت افزایش خواهد یافت.

✓ در حالتی که سرعت لغزشی سیال روی دیواره در نظر گرفته شود، با افزایش ضریب لغزش و در واقع استفاده از میکروکانالی که از جنسی با زبری بیشتر و یا پوشش داده شده توسط ماده‌ای آب‌گریز باشد، تنش اعمالی به سیال روی دیواره کم شده و در نتیجه برای داشتن ناحیه‌ی جریان پلاگ با شعاع معین باید از سیالی با تنش تسلیم متناسب استفاده نمود تا ضمن تسلیم شدن، ناحیه‌ی جریان پلاگ مورد نظر نیز در آن تشکیل شود. علاوه بر این با کم شدن گرادیان سرعت سیال روی دیواره در اثر افزایش ضریب لغزش، مقدار تلفات لزجت تولیدی روی دیواره کمتر شده و سیال در جذب گرمای وارد بر دیواره موثرتر عمل می‌کند. در ضمن، تولید آنتروپی توسط سیال نیز در این حالت کمتر خواهد بود.

✓ در حالتی که از تلفات لزجت سیال روی دیواره صرف‌نظر شود، این حالت مستقل از نوع شار وارد به دیواره از نظر گرمایشی و یا سرمایشی بودن است. اما در حالتی که شار گرمایشی به دیواره وارد شود (مقدار مثبت عدد برینکمن)، با افزایش عدد برینکمن، از آن‌جا که اثر تلفات لزجت سیال روی دیواره افزایش می‌یابد، دمای دیواره افزایش یافته و همچنین دمای متوسط سیال نیز بالا رفته و از ظرفیت سیال برای جذب گرمای وارد بر دیواره کاسته خواهد شد، به این ترتیب اختلاف بین دمای محلی سیال و دیواره افزایش خواهد یافت. همچنین با توجه به این که اثر تلفات لزجت سیال در نزدیکی دیواره بیشترین مقدار می‌باشد، بنابراین در این نواحی، سیال اختلاف دمای کمتری با دیواره داشته و با دور شدن از دیواره و نزدیک شدن به مرکز میکروکانال، با توجه به کم شدن اثر تلفات لزجت در این ناحیه، اختلاف دمای محلی سیال و دیواره افزایش خواهد یافت.

بنابراین جهت خنک‌کاری سطوح توسط سیالات، بهتر است از سیالات نیوتونی و یا سیالات بینگهام با تنش تسلیم کمتر استفاده شود تا ضمن تولید تلفات لزجت کمتر، علاوه بر این که دیواره افزایش دمای کمتری داشته باشد، درصد بیشتری از گرمای وارد بر دیواره توسط سیال جذب شده و اختلاف دمای کمتری بین سیال و دیواره در هر نقطه از میکروکانال ایجاد شود.

در حقیقت باید توجه شود که این تحلیل مربوط به حالتی است که جریان توسعه یافته شده و به حالت پایا رسیده است. زیرا در ناحیه‌ی در حال توسعه، دمای متوسط سیال در اثر تلفات لزجت رو به افزایش بوده و دمای دیواره نیز در اثر شار وارد بر آن و تلفات لزجت تولیدی بر روی آن در حال افزایش می‌باشد. بنابراین با رسیدن به حالت توسعه یافته و پایا، این پروفیل دمایی برای سیال تشکیل می‌شود که در آن اختلاف بین دمای محلی سیال و دمای دیواره مشاهده می‌شود.

✓ در حالتی که لغزش سیال روی دیواره در نظر گرفته شود نیز تحلیل مشابهی وجود دارد. با افزایش مقدار برینکمن در جهت مثبت، هرچه سرعت لغزشی سیال روی دیواره بیشتر باشد، به دلیل تولید تلفات لزجت کمتر، سیال در جذب گرمای وارد بر دیواره موفق‌تر عمل کرده و باعث می‌شود اختلاف دمای کمتری بین سیال و دیواره در ناحیه توسعه یافته و در حالت پایا مشاهده شود.

بنابراین می‌توان با استفاده از سطوحی که باعث لغزش بیشتر سیال روی آن‌ها می‌شود، در جذب گرمای وارد بر دیواره توسط سیال به نتایج مطلوب‌تری دست یافت.

✓ هم‌چنین اگر سطحی در اختیار باشد که سیال روی آن ضریب لغزش ثابتی داشته باشد، بهتر است در این مورد از سیالی که ناحیه‌ی جریان پلاگ کوچک‌تری ایجاد می‌کند و در واقع به تنش تسلیم کمتری برای جاری شدن نیاز است، در جهت جذب گرمای وارد بر دیواره استفاده کرد.

✓ در حالتی که نیاز به خنک‌کاری سیال توسط سطح و یا در واقع جذب گرمای سیال توسط دیواره می‌باشد، باید توجه خاصی به مقدار بحرانی عدد برینکمن با توجه به نوع سیال و شرایط سطح داشت. زیرا همان‌طور که عنوان شد، در حالتی که شار سرمایشی به دیواره وارد می‌شود، این شار سرمایشی سعی در کاهش دمای متوسط سیال داشته و از طرفی تلفات لزجت تولیدی توسط سیال در نزدیکی دیواره نیز باعث افزایش دمای متوسط سیال خواهد شد که به این ترتیب با توجه به مقدار این دو اثر، حالات مختلفی ممکن است برای سیال رخ دهد که مورد بررسی قرار گرفت.

بنابراین در بررسی‌های آزمایشگاهی جهت خنک‌کاری سیالات باید توجه داشت تا مقدار برینکمن از مقدار بحرانی بیشتر نشود. زیرا در این صورت اثر تلفات لزجت سیال بر اثر شار سرمایشی

وارد بر دیواره غلبه کرده و باعث افزایش دمای متوسط سیال خواهد شد.

هر چند در این پژوهش افزایش عدد برینکمن در جهت منفی از نظر ریاضیاتی امکان‌پذیر است، که مشاهده شد با افزایش عدد برینکمن در جهت منفی و گذر از مقدار بحرانی، مقدار پارامتر دمای بی بعد از منفی به مثبت تغییر علامت می‌دهد که به مفهوم حاکم شدن اثرات تلفات لزجت سیال در میکروکانال و افزایش دمای متوسط سیال به جای خنک شدن آن می‌باشد.

✓ هم‌چنین در حالت عدم لغزش سیال روی دیواره، هرچه شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) بزرگ‌تر باشد و سیال به تنش تسلیم بیشتری برای جاری شدن نیاز داشته باشد، با توجه به افزایش تلفات لزجت، مقدار بحرانی عدد برینکمن در حالت سرمایش زودتر پدیدار شده و اثرات گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال سریع‌تر بر اثر شار سرمایشی وارد بر دیواره غلبه می‌کند که این عامل باید در تحلیل‌های آزمایشگاهی مورد توجه قرار گیرد.

✓ در حالت وجود لغزش سیال نیز، هرچه ضریب لغزش سیال روی دیواره بیشتر باشد، برای هر سیالی با ناحیه‌ی جریان پلاگ مشخص، مقدار بحرانی عدد برینکمن دیرتر پدیدار شده و اثرات گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال روی دیواره نیز دیرتر بر اثر شار سرمایشی غلبه می‌کند و به این ترتیب در این حالت دمای متوسط سیال کاهش بیشتری خواهد یافت.

✓ علاوه بر این در حالت وجود شار سرمایشی روی دیواره، مقدار پارامتر بی بعد دما در نزدیکی دیواره برای تمامی حالات منفی می‌باشد که به مفهوم بیشتر بودن دمای سیال در این ناحیه از دمای دیواره می‌باشد. اما با نزدیک شدن به مرکز میکروکانال مشاهده شد که با توجه به میزان اثر تلفات لزجت حالات مختلفی برای سیال از نظر افزایش یا کاهش دمای متوسط سیال پیش خواهد آمد که به آن‌ها اشاره شد.

✓ با مشاهده‌ی تغییرات گرادیان دمای شعاعی بی بعد نیز نتیجه شد از آن‌جا که این پارامتر در حقیقت اثرات انتقال گرمای هدایتی ناشی از شار وارد بر دیواره در میکروکانال را نشان می‌دهد، با افزایش مقدار عدد برینکمن اثرات تلفات لزجت بیشتری با هدایت ناشی از شار ترکیب شده و از طریق

دیفیوژن به عمق سیال نفوذ می‌کند که این امر در نزدیکی دیواره به دلیل سرعت کم سیال در این ناحیه اتفاق می‌افتد که باعث افزایش دمای متوسط سیال خواهد شد.

✓ در حالتی که سیال دارای سرعت لغزش روی دیواره باشد نیز، هرچه ضریب لغزش سیال بیشتر باشد، به دلیل تولید تلفات لزجت کمتر، اثرات تلفات لزجت کمتری با هدایت ناشی از شار ترکیب شده و به این ترتیب گرمای کمتری به عمق سیال نفوذ می‌کند که باعث می‌شود سیال ظرفیت بیشتری برای جذب گرمای وارد بر دیواره داشته و اختلاف کمتری بین دمای محلی سیال و دیواره در این حالت ایجاد شود.

✓ در حالتی که شار سرمایشی به دیواره وارد شود نیز برای هر سیالی با توجه به شرایط دیواره، اگر مقدار عدد برینکمن کمتر از مقدار بحرانی باشد (از لحاظ قدر مطلق) گرادیان دما مثبت است، اما با گذر از مقدار بحرانی برینکمن، گرادیان دمای شعاعی بی بعد تغییر علامت داده و منفی می‌شود که به معنی غلبه‌ی اثر تلفات لزجت بر اثر شار سرمایشی و افزایش دمای متوسط سیال به جای کاهش آن می‌باشد.

✓ در حالت عدم لغزش سیال روی دیواره، برای حالت گرمایش ($Br > 0$)، با افزایش مقدار عدد برینکمن، همان‌طور که مشاهده شد افزایش دمای دیواره بیشتر از افزایش دمای متوسط سیال بوده و در حالت حدی با افزایش بیش از اندازه مقدار برینکمن که فقط از نظر ریاضیاتی امکان‌پذیر می‌باشد، مقادیر مجانبی عدد ناسلت به سمت صفر میل می‌کند.

✓ با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ (ϕ) در جریان واقعی که تلفات لزجت سیال قابل صرف‌نظر نباشد، مقدار عدد ناسلت کاهش می‌یابد که ناشی از این حقیقت است که اختلاف دمای متوسط سیال و دیواره با افزایش ϕ زیاد می‌شود که این نکته در نمودارهای توزیع دمای بی بعد سیال نیز به وضوح مشخص است.

✓ با افزایش مقدار عدد برینکمن در حالت سرمایش ($Br < 0$) با توجه به حاکم شدن اثر گرمای ناشی از تلفات لزجت سیال بر شار سرمایشی وارد بر دیواره، ابتدا شاهد پدیدار شدن نقطه تکین در

نمودارهای ناسلت هستیم که با گذر از این مقدار بحرانی، اختلاف دمای متوسط سیال و دیواره با افزایش اثر تلفات لزجت زیاد شده و در نهایت مقادیر مجانبی عدد ناسلت برای سیالات بینگهام و نیوتونی به سمت صفر میل خواهند نمود. البته همان‌طور که مشاهده شد، افزایش مقدار عدد برینکمن فقط از منظر ریاضیاتی امکان‌پذیر بوده و در بررسی‌های آزمایشگاهی، مقادیر این عدد در محدوده‌ی معینی قرار دارد.

✓ با افزایش ضریب لغزش سیال روی دیواره برای سیالات بینگهام و نیوتونی، مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش سرعت سیال نزدیک دیواره، اثرات انتقال حرارت جابجایی سریع‌تر حاکم شده و اثرات انتقال حرارت هدایتی در سیال کاهش می‌یابند که این موضوع در نمودارهای گرادیان دمای شعاعی بی بعد قابل مشاهده می‌باشد.

✓ در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره نیز، با افزایش مقدار عدد برینکمن چه در حالت گرمایش و چه در حالت سرمایش دیواره، اختلاف دمای متوسط سیال و دیواره افزایش یافته و مقادیر مجانبی عدد ناسلت برای سیالات بینگهام و نیوتونی به سمت مقدار صفر میل خواهند نمود.

✓ در حالتی که به دلیل تراکم‌پذیر بودن سیال، از لغزش آن نزدیک دیواره صرف‌نظر شود، در جریان واقعی که باید تلفات لزجت سیال در نظر گرفته شود، مشاهده شد که هرچه ناحیه‌ی جریان پلاگ گسترده‌تر باشد و در واقع سیال به تنش بیشتری برای تسلیم شدن نیاز داشته باشد، تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت و در نتیجه تولید آنتروپی کلی در آن بیشتر می‌باشد که به دلیل تولید تلفات لزجت بیشتر توسط سیال با افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ می‌باشد.

✓ از تغییرات متوسط تولید آنتروپی کلی نیز نتیجه می‌شود که با افزایش مقدار عدد برینکمن و افزایش شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ، تولید آنتروپی افزایش می‌یابد که به این ترتیب مشخص می‌شود، سیالات بینگهام دارای تولید آنتروپی بیشتری از سیالات نیوتونی بوده و دارای بازده ترمودینامیکی کمتری می‌باشند.

✓ با توجه به تغییرات متوسط عدد بیژن نیز با توجه به این که این کمیت با افزایش مقدار شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ و عدد برینکمن افزایش می‌یابد، نتیجه می‌شود که رشد تولید آنتروپی حرارتی با افزایش این دو پارامتر بیشتر از رشد آنتروپی اصطکاکی می‌باشد که به‌خاطر وابستگی شدید آنتروپی حرارتی به توزیع دما و در نتیجه عدد برینکمن و مقدار تلفات لزجت سیال می‌باشد.

✓ در حالت وجود لغزش سیال روی دیواره نیز هرچه ضریب لغزش سیال روی سطح مربوطه بیشتر باشد، تولید آنتروپی اصطکاکی و حرارتی و در نتیجه تولید آنتروپی کلی به‌دلیل کاهش تلفات لزجت سیال روی دیواره کاهش می‌یابد. هم‌چنین در یک میکروکانال با سطحی از جنس خاص که سیالات مختلف دارای ضریب لغزش ثابت روی آن هستند، بهتر است تا از سیالی با تنش تسلیم کمتری استفاده شود تا ضمن تولید آنتروپی کمتر دارای بازده ترمودینامیکی بیشتری بوده و قابلیت بیشتری برای انجام کار داشته باشد.

بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز سیالات نیوتونی نسبت به سیالات بینگهام ارجحیت بیشتری برای استفاده به‌عنوان سیال عامل در میکروکانال دارند.

✓ با مشاهده‌ی تغییرات متوسط تولید آنتروپی کلی نیز نتیجه می‌شود که با افزایش مقدار برینکمن و شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ و هم‌چنین کاهش ضریب لغزش سیال روی دیواره، آنتروپی تولیدی توسط سیال در میکروکانال افزایش می‌یابد که باعث هدر رفتن انرژی مفید سیال که قابلیت تولید کار داشته، شده است.

✓ تغییرات متوسط عدد بیژن نیز مشخص می‌کند که افزایش این کمیت با افزایش برینکمن و شعاع بی بعد ناحیه‌ی جریان پلاگ و کاهش ضریب لغزش سیال به مفهوم رشد بیشتر آنتروپی حرارتی با تغییرات این پارامترها نسبت به آنتروپی اصطکاکی است که می‌تواند برای محققان جهت اطلاع از روند رشد آنتروپی حرارتی و اصطکاکی مفید واقع شود.

۵-۲ پژوهش‌های پیشنهادی

در این قسمت به برخی از پژوهش‌هایی که می‌تواند در این زمینه در آینده مورد تحلیل و بررسی بیشتر قرار گیرد اشاره می‌شود. برخی از این پیشنهادات در زیر عنوان شده‌اند:

✓ بررسی عددی انتقال حرارت و تولید آنتروپی جریان سیال بینگهام در میکروکانال‌های مدور و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج این پژوهش.

✓ بررسی عددی انتقال حرارت و تولید آنتروپی جریان سیال بینگهام در میکروکانال‌های مستطیلی و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج این پژوهش.

✓ بررسی عددی انتقال حرارت در ناحیه‌ی در حال توسعه برای سیال بینگهام در میکروکانال‌های مدور و مستطیلی.

✓ بررسی تحلیلی انتقال حرارت و تولید آنتروپی جریان سیال بینگهام در میکروکانال مدور با فرض دمای دیواره ثابت.

✓ بررسی انتقال حرارت و تولید آنتروپی جریان الکترواسموتیک در میکروکانال مدور و مستطیلی حاوی سیال بینگهام.

مراجع

- [1]. Chein, R. and G. Huang. (2004), "Thermoelectric cooler application in electronic cooling", *Appl. Therm. Eng.*, **24**, **14**, pp 2207-2217.
- [2]. Shende, M.D. and D.A. Mahalle. (2013), "Cooling Of Electronic Equipments with Heat Sink: A Review of Literature", *J. Mech. Civil. Eng.*, **5**, **2**, pp 56-61.
- [3]. Huang, H-S., Weng, Y-C., Chang, Y-W., Chen, S-L., Ke, M-T. (2010), "Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment", *Int. Commun. Heat Mass.*, **37**, pp 140-146.
- [4]. Sharp, K.V., Adrian, R.J., Santiago, J.G., Molho, J.I. (2002), "**Liquid flows in microchannels**", CRC Press, Boca Raton.
- [5]. Kumar, R., M. Islam, and M. Hasan. (2014), "A Review of Experimental Investigations on Heat Transfer Characteristics of Single Phase Liquid Flow in Microchannels", *Int. J. Adv. Mech. Eng.*, **4**, **1**, pp 115-120.
- [6]. Chen, Y-T., Kang, S-W., Tuh, W-C., and Hsiao, T-H. (2004), "Experimental investigation of fluid flow and heat transfer in microchannels", *J. Sci. Eng.*, **7**, **1**, pp 11-16.
- [7]. Gad-el-Hak, M. (2005), "Differences between liquid and gas transport at the microscale", *Technical Sci.*, **53**, **4**, pp 301-316.
- [8]. Neto, C., Evans, D.R., Bonaccorso, E., Butt, H-J., and Craig, V.S. (2005), "Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies", *Reports on Progress in Physics.*, **68**, **12**, pp 2859-2897.
- [9]. Chhabra, R.P., Richardson, J.F. (2008), "**Non-Newtonian Flow and Applied Rheology**", Pergamon Press, New York.
- [10]. Uhlherr, P., J. Guoa, J., Tiua, C., Zhanga, X., Zhoua, J., Fang, T.,. (2005), "The shear-induced solid–liquid transition in yield stress materials with chemically different structures", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **125**, pp 101-119.
- [11]. Michael K. Stenstrom, D.R. (2003), "Fundamentals of Chemical Reactor Theory", *Civil & Environmental Engineering Department*, Los Angeles, University Of California.
- [12]. Roy, P., N. Anand, and D. Banerjee. (2013), "Liquid slip and heat transfer in rotating rectangular microchannels", *Int. J. Heat Mass Tran.*, **62**, pp 184-199.

- [13]. Martini, A., Roxin, A., Snurr, R.Q., Wang, Q., and Lichter, S. (2008), "Molecular mechanisms of liquid slip", *J. Fluid Mech.*, **600**, pp 257-269.
- [14]. Pereira, G. (2009), "Effect of variable slip boundary conditions on flows of pressure driven non-Newtonian fluids", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **157**, **3**, pp 197-206.
- [15]. Pit, R., H. Hervet, and L. Léger. (1999), "Friction and slip of a simple liquid at a solid surface", *Tribology Letters.*, **7**, **2**, pp 147-152.
- [16]. Wu, Y., Cai, M., Li, Z., Song, X., Wang, H., Pei, X., and Zhou, F. (2014), "Slip flow of diverse liquids on robust superomniphobic surfaces", *J. Colloid Interface Sci.*, **414**, pp 9-13.
- [17]. Min, T., Choi, H.G., Yoo, G., and Choi, H. (1997), "Laminar convective heat transfer of a Bingham plastic in a circular pipe—II. Numerical approach hydrodynamically developing flow and simultaneously developing flow", *Int. J. Heat Mass Tran.*, **40**, **15**, pp 3689-3701.
- [18]. Tretheway, D.C., X. Liu, and C.D. Meinhart. (2002), "Analysis of slip flow in microchannels", *Proceedings of 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mech*, Lisbon.
- [19]. Morini, G.L. (2005), "Viscous heating in liquid flows in microchannels", *Int. J. Heat Mass Tran.*, **48**, **17**, pp 3637-3647.
- [20]. Koo, J. and C. Kleinstreuer. (2004), "Viscous dissipation effects in microtubes and microchannels", *Int. J. Heat Mass Tran.*, **47**, **14**, pp 3159-3169.
- [21]. Aydın, O. and M. Avcı. (2006), "Viscous dissipation effects on the heat transfer in a Poiseuille flow", *Appl. Energ.*, **83**, **5**, pp 495-512.
- [22]. Khatyr, R., D. Ouldhadda, and A. Il Idrissi. (2003), "Viscous dissipation effects on the asymptotic behaviour of laminar forced convection for Bingham plastics in circular ducts", *Int. J. Heat Mass Tran.*, **46**, **4**, pp 589-598.
- [23]. Chen, G. and C. Tso. (2011), "Effects of viscous dissipation on forced convective heat transfer in a channel embedded in a power-law fluid saturated porous medium", *Int. Commun. Heat Mass.*, **38**, **1**, pp 57-62.

- [24]. Barkhordari, M. and S.G. Etemad. (2007), "Numerical study of slip flow heat transfer of non-Newtonian fluids in circular microchannels", *Int. J. Heat Fluid Flow.*, **28**, 5, pp 1027-1033.
- [25]. Ngoma, G.D. and Erchiqui, F. (2007), "Heat flux and slip effects on liquid flow in a microchannel", *Int. J. Therm. Sci.*, **46**, 11, pp 1076-1083.
- [26]. Yazdi, M., abdullah, S., Hashim, I., Zaharim, A., and Sopian, k. (2008), "Friction and heat transfer in slip flow boundary layer at constant heat flux boundary conditions", *WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering.*
- [27]. Sonntag, R.E., Borgnakke, S., Van Wylen, G.J., and Van Wyk, S. (1998), **"Fundamentals of thermodynamics"**, Wiley, New York.
- [28]. Bejan, A. (1996), **"Advanced engineering thermodynamics"**, Interscience, New York.
- [29]. Bejan, A. (1982), **"Entropy generation through heat and fluid flow"**, Wiley.
- [30]. Bejan, A. (1982), **"Second-law analysis in heat transfer and thermal design"**, United States.
- [31]. Bejan, A. (1996), **"Entropy generation minimization"**, CRC, Boca Raton.
- [32]. Tan, L. and G. Chen. (2013), "Analysis of Entropy Generation for a Power-Law Fluid in Microchannels", *ASME 2013 4th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*. American Society of Mechanical Engineers.
- [33]. Hung, Y-M. (2008), "Viscous dissipation effect on entropy generation for non-Newtonian fluids in microchannels", *Int. Commun. Heat Mass.*, **35**, 9, pp 1125-1129.
- [34]. Mahmud, S. and R.A. Fraser. (2006), "Second law analysis of forced convection in a circular duct for non-Newtonian fluids", *Energy.*, **31**, 12, pp 2226-2244.
- [35]. Hung, Y-M. (2009), "A comparative study of viscous dissipation effect on entropy generation in single-phase liquid flow in microchannels", *Int. J. Therm. Sci.*, **48**, 5, pp 1026-1035.

- [36]. Mah, W.H., Y.M. Hung, and N. Guo. (2012), "Entropy generation of viscous dissipative nanofluid flow in microchannels", *Int. J. Heat Mass Tran.*, **55**, **15**, pp **4169-4182**.
- [37]. Shojaeian, M. and A. Koşar. (2014), "Convective heat transfer and entropy generation analysis on Newtonian and non-Newtonian fluid flows between parallel-plates under slip boundary conditions", *Int. J. Heat Mass Tran.*, **70**, pp **664-673**.
- [38]. Hooman, K. (2008), "Entropy generation for microscale forced convection: effects of different thermal boundary conditions, velocity slip, temperature jump, viscous dissipation, and duct geometry", *Int. Commun. Heat Mass.*, **34**, pp **945-957**.
- [39]. Escandón, J., O. Bautista, and F. Méndez. (2013), "Entropy generation in purely electroosmotic flows of non-Newtonian fluids in a microchannel", *Energy.*, **55**, pp **486-496**.
- [40]. Shamshiri, M., Khazeali, R., Ashrafizaadeh, M., and Mortazavi, S. (2012), "Heat transfer and entropy generation analyses associated with mixed electrokinetically induced and pressure-driven power-law microflows", *Energy.*, **42**, **1**, pp **157-169**.
- [41]. Bird, R.B., W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot. (2007), "**Transport phenomena**", John Wiley & Sons.
- [42]. Khan, W.A. and M.M. Yovanovich. (2008), "Analytical modeling of fluid flow and heat transfer in microchannel/nanochannel heat sinks.", *J. Thermophys Heat Transfer*, **22**, pp **352-359**.
- [43]. Damean, N. and P. Regtien. (2001), "Poiseuille number for the fully developed laminar flow through hexagonal ducts etched in< 1 0 0> silicon." *Sensors and Actuators A: Physical*, **90**, pp **96-101**.
- [44]. Ferrás, L.L., J.M. Nóbrega, and F.T. Pinho. (2012), "Analytical solutions for channel flows of Phan-Thien–Tanner and Giesekus fluids under slip", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **171**, pp **97-105**.

-
- [45]. Incropera, F.P. (2011), "**Fundamentals of heat and mass transfer**", John Wiley & Sons.
- [46]. Klášterka, H., J. Vimmr, and M. Hajžman. (2009), "Contribution to the gas flow and heat transfer modelling in microchannels", *J. Appl. Comp. Mech.*, **3**, pp 63-74.
- [47]. Xu, K. and Z. Li. (2004), "Microchannel flow in the slip regime: gas-kinetic BGK–Burnett solutions", *J. Fluid Mech.*, **513**, pp 87-110.

Abstract

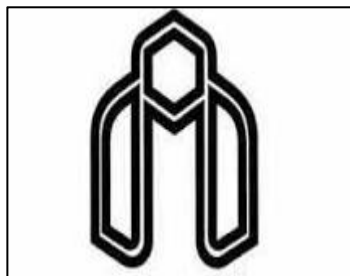
Improvement the heat transfer parameters and increasing the thermodynamic efficiency for more and better cooling were made necessary by growing development of industry. Nowadays, industry is able to manufacture the systems with high congestion of computer chips. These setups need to new and helpful method for cooling due to the production of heat in the small surface. The micro-channel heat sink with different surfaces and materials is one of the systems that can be used for cooling in these cases.

In this research, a circular micro-channel from a thermal heat sink that is imposed to constant heat flux is evaluated. With considering the Bingham plastic fluid in the micro-channel for surface cooling, the effective parameters on the heat transfer and entropy generation were discussed. The results and different parameters such as improvement of heat transfer and thermodynamic efficiency were also compared with the Newtonian fluid in each section.

The results of this study showed that the Newtonian fluid is more effective in the heat absorption on the surface than of Bingham plastic fluids. It is also concluded from the entropy generation analysis that the Newtonian fluid has more thermodynamic efficiency than of Bingham plastic fluids due to less entropy generation which can be considered by the researchers.

Moreover, the analysis of the slip liquid flow on the surface channel illustrated that with increasing the slip coefficient of fluid, the fluid capacity to absorb the heat from the surface is increased and the generation of entropy is significantly decreased.

Keywords: *Micro-channel, Bingham fluid, Newtonian fluid, Temperature field, entropy generation.*



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

Entropy generation analysis of viscoplastic fluid flow in microchannel heat sinks

Mohammad Reza Mohammadi

Supervisors:

Ali Jabari Moghadam

Mahmood Farzaneh Gord

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)

December 2014