

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه حرارت و سیالات

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل تولید انرژی جریان سیال غیر نیوتنی پاورلا در هیت سینک‌های

میکروکانالی

امیرحسین سرابندی

اساتید راهنما:

دکتر علی جباری مقدم

دکتر محمود فرزانه گرد

شهریور ۱۳۹۴

شماره: ۲۸۴۲۰۸
تاریخ: ۵
ویرایش: ۵

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

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 خانم / آقای امیرحسین سرابندی رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان تحلیل تولید انرژی جریان سیال غیر نیوتنی پاورلا در هیت سینک های میکروکانالی که در تاریخ ۹۴/۰۶/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد: شماره دانشجویی: ۹۱۰۳۷۲۴

قبول (با درجه: **بسیار خوب** امتیاز: **۱۸/۵**) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	علی جباری مقدم	دانشیار	
۲- استاد راهنما	محمود فرزانه گرد	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	محمد حسن کیهانی	استاد	
۴- استاد ممتحن	محمد محسن شاه مردان	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	محمود نوروزی	استادیار	

رئیس دانشکده:
امضاء:
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشکده مهندسی شاهرود

قدردانی

جا دارد اینجا از اساتید راهنما خود، جناب آقای دکتر علی جباری مقدم و هم چنین جناب

آقای دکتر محمود فرزانه گرد که در انجام دادن این پایان نامه به بنده کمک های شایانی

کردند و همواره پاسخ گوی سوالات اینجانب بودند، تشکر و سپاس گذاری نمایم.

تعهد نامه

اینجانب امیرحسین سرابندی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل تولید انرژی جریانی سیال غیر نیوتنی پاورلا در هیت سینک های میکروکانالی تحت راهنمایی دکتر علی جباری مقدم متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) 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 اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

با توجه به این که قطعات کامپیوتری امروزه گرمای تولیدی بیشتری دارند و جهت بالا بردن راندمان این قطعات نیازمند روش‌های نوین جهت خنک‌کاری آن‌ها می‌باشیم و یکی از بهترین وسایل جهت این کار استفاده از هیت سینک‌های حرارتی می‌باشد که شامل میکروکانال‌هایی با سطح مقاطع مختلف و جنس‌های مختلف می‌باشند.

در این پروژه به بررسی یک میکروکانال دایروی از یک شبکه هیت سینک حرارتی که تحت شرایط مرزی شار ثابت قرار دارد پرداخته شده است. با در نظر گرفتن سیال پاورلا داخل میکروکانال جهت خنک‌کاری سطوح مورد نظر، به بررسی پارامترهای مهم و موثر در انتقال حرارت و نیز تولید انترویی پرداخته شده است. نتایج حاصل شده و پارامترهای گوناگون از جمله بالا بردن ظرفیت انتقال حرارت و بازده کلی سیستم نیز در هر بخش با سیالات نیوتنی مقایسه شده است.

نتایج به دست آمده در این پروژه بیان‌گر این موضوع می‌باشد که سیالات غیر نیوتنی شبه پلاستیک در جهت جذب گرمای وارد بر دیواره بهتر از سیالات نیوتنی و دایلاتنت عمل کرده و هم‌چنین در بخش تولید انترویی نیز سیالات شبه پلاستیک بازگشت ناپذیری کمتری نسبت به سیالات نیوتنی و دایلاتنت دارند و از همین رو این نوع سیالات دارای بازده ترمودینامیکی بیشتری بوده.

با در نظر گرفتن لغزش در دیواره میکروکانال نیز مشخص شد که با افزایش سرعت لغزش در دیواره، اصطکاک و تلفات ویسکوزیته در دیواره کاهش پیدا می‌کند و هم‌چنین بازگشت ناپذیری سیستم نیز کاهش پیدا می‌کند و باعث افزایش بازده سیستم می‌شود.

کلمات کلیدی: میکروکانال، سیال پاورلا، سیال نیوتنی، میدان دما، تولید انترویی، عدد بیژن

فهرست مطالب

۱	مقدمه، مفاهیم و مروری بر پژوهش های انجام شده.....
۱-۱	مقدمه
۱-۱-۱	کاربرد هیت سینک های حرارتی
۱-۱-۲	کاربرد و ساخت میکروکانال ها.....
۱-۱-۳	تعریف سیال پاورلا.....
۲-۱	مفاهیم.....
۱-۲-۱	مفاهیم مربوط به لغزش سیال در دیواره
۳-۱	مروری بر پژوهش های انجام شده
۱-۳-۱	معرفی تحقیق حاضر و تعریف مساله
۲-۳-۱	فرضیات و اهداف پژوهش.....
۲	معادلات حاکم و شرایط مرزی.....
۱-۲	میدان سرعت.. ..
۱-۱-۲	بررسی پارامترهای بی بعد در وجود و عدم وجود لغزش در دیواره
۲-۱-۲	میدان سرعت در شرایط عدم لغزش در دیواره
۳-۱-۲	میدان سرعت در شرایط وجود لغزش در دیواره
۴-۱-۲	تعیین عدد پوآزی.....
۲-۲	تعیین میدان دمایی.....
۱-۲-۲	تعیین توزیع دمای سیال در حالت عدم لغزش

- ۲-۲-۲ تعیین توزیع دمای سیال در حالت وجود لغزش در دیواره ۳۹
- ۲-۲-۳ تحلیل شرط مرزی عدم وجود پرش دمایی در مایعات ۴۰
- ۲-۲-۴ بررسی عدد برینکمن ۴۲
- ۲-۴-۲ تعیین برینکمن بحرانی در شرایط عدم وجود لغزش در دیواره ۴۳
- ۲-۴-۲ تعیین برینکمن بحرانی با وجود لغزش در دیواره ۴۳
- ۲-۲-۵ بررسی عدد ناسلت در شرایط عدم وجود لغزش ۴۳
- ۲-۲-۶ تعیین عدد ناسلت در شرایط وجود لغزش ۴۵
- ۳-۲ تعیین انتروپی تولیدی ۴۷
- ۲-۳-۱ تعیین انتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت ۴۸
- ۲-۳-۲ تعیین انتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک ۴۸
- ۲-۳-۳ انتروپی تولیدی متوسط ۴۹
- ۲-۳-۴ تعیین عدد بیژن ۵۰
- ۲-۳-۵ تعیین عدد بیژن متوسط ۵۱
- ۳ تحلیل جریان سیال داخل میکروکانال با فرض عدم لغزش در دیواره ۵۳**
- ۳-۱ تحلیل میدان سرعت ۵۴
- ۳-۲ تحلیل میدان دمایی ۵۵
- ۳-۲-۱ تحلیل دمای بی بعد بدون تلفات ویسکوزیته ۵۵
- ۳-۲-۲ تحلیل دمای بی بعد با وجود تلفات ویسکوزیته در فرایند گرمایش ۵۶
- ۳-۲-۳ تحلیل دمای بی بعد با وجود تلفات ویسکوزیته در فرایند سرمایش ۵۷

- ۴-۲-۳ تحلیل دمای بی بعد در فرایندهای سرمایشی و گرمایشی..... ۵۸
- ۵-۲-۳ تحلیل گرادیان دمای بی بعد بدون تلفات ویسکوزیته ۶۰
- ۶-۲-۳ تحلیل گرادیان دمای بی بعد با وجود تلفات ویسکوزیته..... ۶۲
- ۷-۲-۳ تحلیل گرادیان دمای بی بعد با وجود تلفات ویسکوزیته در فرایند سرمایش .. ۶۳
- ۸-۲-۳ تحلیل گرادیان دمای بی بعد در فرایند سرمایش و گرمایش..... ۶۳
- ۹-۲-۳ تحلیل عدد ناسلت در فرایند گرمایش ۶۵
- ۱۰-۲-۳ تحلیل عدد ناسلت در فرایند سرمایش و گرمایش..... ۶۸
- ۱۱-۲-۳ تحلیل برینکمن بحرانی ۶۹
- ۳-۳ تحلیل تولید انتروپی..... ۷۰
- ۱-۳-۳ تحلیل تولید انتروپی حرارتی ۷۱
- ۲-۳-۳ تحلیل تولید انتروپی اصطکاکی ۷۵
- ۳-۳-۳ تحلیل تولید انتروپی کل ۷۸
- ۴-۳-۳ تحلیل عدد بیژن ۸۲
- ۴ تحلیل جریان سیال داخل میکروکانال با در نظر گرفتن وجود لغزش در دیواره.. ۸۷**
- ۱-۴ تحلیل میدان سرعت..... ۸۸
- ۱-۱-۴ تحلیل عدد پوآزی ۹۰
- ۲-۴ تحلیل میدان دمایی... ۹۱
- ۱-۲-۴ تحلیل میدان دمایی بدون تلفات ویسکوزیته ۹۱
- ۲-۲-۴ تحلیل میدان دمایی در فرایند گرمایش ۹۳

- ۹۴..... ۳-۲-۴ تحلیل میدان دمایی در فرایند سرمایش
- ۹۷..... ۴-۲-۴ تحلیل میدان دمایی در فرایند های سرمایش و گرمایش
- ۹۹..... ۵-۲-۴ تحلیل گرادیان دمای بی بعد بدون تلفات ویسکوزیته
- ۱۰۰..... ۶-۲-۴ تحلیل گرادیان دمای بی بعد در فرایند گرمایش
- ۱۰۲..... ۷-۲-۴ تحلیل گرادیان دمای بی بعد در فرایند سرمایشی
- ۱۰۴..... ۸-۲-۴ تحلیل گرادیان دمای بی بعد در فرایند سرمایشی و گرمایشی
- ۱۰۶..... ۳-۴ تحلیل عدد ناسلت.....
- ۱۰۶..... ۱-۳-۴ تحلیل عدد ناسلت بدون تلفات ویسکوزیته
- ۱۰۸..... ۲-۳-۴ تحلیل عدد ناسلت در فرایند گرمایش
- ۱۱۰..... ۳-۳-۴ تحلیل عدد ناسلت در فرایند گرمایش و سرمایش
- ۱۱۲..... ۴-۳-۴ تحلیل برینکمن بحرانی
- ۱۱۴..... ۴-۴ تحلیل تولید انتروپی.....
- ۱۱۴..... ۱-۴-۴ تحلیل تولید انتروپی حرارتی
- ۱۱۷..... ۲-۴-۴ تحلیل تولید انتروپی اصطکاکی
- ۱۲۰..... ۳-۴-۴ تحلیل تولید انتروپی کل
- ۱۲۳..... ۴-۴-۴ تحلیل تولید انتروپی متوسط کل
- ۱۲۵..... ۵-۴-۴ تحلیل عدد بیژن
- ۱۲۹..... ۶-۴-۴ تحلیل عدد بیژن متوسط
- ۱۳۱..... ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵ مشاهدات و نتایج..... ۱۳۲

۲-۵ پژوهش های پیشنهادی..... ۱۳۶

۶ مراجع..... ۱۳۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: شماتیک یک شبکه هیت سینک های حرارتی..... ۴
- شکل ۲-۱: مراحل ساخت یک میکروکانال دایروی ۶
- شکل ۳-۱: شماتیک روش ساخت یک میکروکانال دایروی [۶]..... ۷
- شکل ۴-۱: رفتار انواع سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی مستق از زمان ۱۰
- شکل ۵-۱: شماتیک لغزش روی دیواره در طول لغزش های مختلف [۱۰]..... ۱۳
- شکل ۱-۳: تغییرات سرعت بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا ۵۴
- شکل ۲-۳: تغییرات دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، بدون تلفات ویسکوزیته .. ۵۵
- شکل ۳-۳: تغییرات دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، در فرایند گرمایش ۵۷
- شکل ۴-۳: تغییرات دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، در فرایند سرمایش..... ۵۸
- شکل ۵-۳: تغییرات دمای بی بعد در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک ۶۰
- شکل ۶-۳: تغییرات دمای بی بعد در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت ۶۰
- شکل ۷-۳: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، بدون تلفات ویسکوزیته . ۶۱
- شکل ۸-۳: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، در فرایند گرمایش..... ۶۲
- شکل ۹-۳: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، در فرایند سرمایش ۶۳
- شکل ۱۰-۳: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک ... ۶۴
- شکل ۱۱-۳: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت ۶۵
- شکل ۱۲-۳: تغییرات ناسلت با شاخص پاورلا، در برینکمن های مختلف..... ۶۷
- شکل ۱۳-۳: تغییرات ناسلت با برینکمن در حالت گرمایش، در شاخص های پاورلا مختلف . ۶۸
- شکل ۱۴-۳: تغییرات ناسلت با برینکمن در فرایندهای سرمایش و گرمایش، در شاخص های مختلف پاورلا. ۶۹
- شکل ۱۵-۳: تغییرات برینکمن بحرانی با شاخص پاورلا..... ۷۰
- شکل ۱۶-۳: تغییرات تولید انتروبی حرارتی در شاخص های مختلف پاورلا، بدون تلفات ویسکوزیته در دیواره ۷۳

شکل ۳-۱۷: تغییرات تولید انترویی حرارتی در شاخص های مختلف پاورلا، با در نظر گرفتن تلفات ویسکوزیته۷۴

شکل ۳-۱۸: تغییرات تولید انترویی حرارتی در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک .. ۷۵

شکل ۳-۱۹: تغییرات تولید انترویی حرارتی در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت ۷۵

شکل ۳-۲۰: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی، در شاخص های مختلف پاورلا۷۶

شکل ۳-۲۱: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک ۷۷

شکل ۳-۲۲: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت ۷۸

شکل ۳-۲۳: تغییرات تولید انترویی کل، در شاخص های مختلف پاورلا۷۹

شکل ۳-۲۴: تغییرات تولید انترویی کل، برای سیالات نیوتنی و دایلاتنت ۸۰

شکل ۳-۲۵: تغییرات تولید انترویی کل در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک ۸۱

شکل ۳-۲۶: تغییرات تولید انترویی کل در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت ۸۱

شکل ۳-۲۷: تغییرات تولید انترویی متوسط کل در برینکمن های مختلف ۸۲

شکل ۳-۲۸: تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک۸۳

شکل ۳-۲۹: تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت۸۴

شکل ۳-۳۰: تغییرات عدد بیژن متوسط در برینکمن های مختلف۸۵

شکل ۴-۱: تغییرات سرعت بی بعد برای سیال برشی نازک در ضریب لغزش های مختلف... ۸۹

شکل ۴-۲: تغییرات سرعت بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا۹۰

شکل ۴-۳: تغییرات عدد پوزیلی با شاخص پاورلا، در ضریب لغزش های مختلف ۹۱

شکل ۴-۴: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک ۹۲

شکل ۴-۵: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت ۹۲

شکل ۴-۶: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک .. ۹۴

شکل ۴-۷: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت ۹۴

شکل ۴-۸: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف در فرایند سرمایش برای سیال شبه پلاستیک۹۶

شکل ۴-۹: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف در فرایند سرمایش برای سیال دایلاتنت ... ۹۷

- شکل ۱۱-۴: تغییرات دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین برای فرایند سرمایش ۹۹..
- شکل ۱۲-۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک..... ۱۰۰
- شکل ۱۳-۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت .. ۱۰۰
- شکل ۱۴-۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک..... ۱۰۱
- شکل ۱۵-۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت .. ۱۰۱
- شکل ۱۶-۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک در فرایند سرمایش ۱۰۳
- شکل ۱۷-۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت در فرایند سرمایش . ۱۰۴
- شکل ۱۸-۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین..... ۱۰۵
- شکل ۱۹-۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین در فرایند سرمایش ۱۰۶
- شکل ۲۰-۴: تغییرات ناسلت در ضریب لغزش های متفاوت ۱۰۷
- شکل ۲۱-۴: تغییرات ناسلت در ضریب لغزش های متفاوت ۱۰۸
- شکل ۲۲-۴: تغییرات ناسلت در برینکمن های مختلف برای سیال شبه پلاستیک..... ۱۰۹
- شکل ۲۳-۴: تغییرات ناسلت در برینکمن های مختلف برای سیال دایلاتنت ۱۱۰
- شکل ۲۴-۴: تغییرات ناسلت در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک در فرایند سرمایش و گرمایش ۱۱۱
- شکل ۲۵-۴: تغییرات ناسلت در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت در فرایند سرمایش و گرمایش ۱۱۲
- شکل ۲۶-۴: تغییرات برینکمن بحرانی در ضریب لغزش های مختلف ۱۱۳
- شکل ۲۷-۴: تغییرات برینکمن بحرانی در شاخص های مختلف پاورلا ۱۱۳
- شکل ۲۸-۴: تغییرات تولید انترویی حرارتی در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک..... ۱۱۵
- شکل ۲۹-۴: تغییرات تولید انترویی حرارتی در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت .. ۱۱۵
- شکل ۳۰-۴: تغییرات تولید انترویی حرارتی در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین..... ۱۱۶
- شکل ۳۱-۴: تغییرات تولید انترویی حرارتی در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین..... ۱۱۷
- شکل ۳۲-۴: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک..... ۱۱۸
- شکل ۳۳-۴: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت ۱۱۹
- شکل ۳۴-۴: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین . ۱۲۰
- شکل ۳۵-۴: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین . ۱۲۰

- شکل ۴-۳۶: تغییرات تولید انتروپی کل در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک .. ۱۲۱
- شکل ۴-۳۷: تغییرات تولید انتروپی کل در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت ۱۲۲
- شکل ۴-۳۸: تغییرات تولید انتروپی کل در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین ۱۲۳
- شکل ۴-۳۹: تغییرات تولید انتروپی کل در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین ۱۲۳
- شکل ۴-۴۰: تغییرات تولید انتروپی متوسط در ضریب لغزش های مختلف ۱۲۴
- شکل ۴-۴۱: تغییرات تولید انتروپی متوسط در برینکمن های مختلف ۱۲۵
- شکل ۴-۴۲: تغییرات عدد بیژن در ضریب لغزش های متفاوت برای سیال شبه پلاستیک .. ۱۲۶
- شکل ۴-۴۳: تغییرات عدد بیژن در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت ۱۲۷
- شکل ۴-۴۴: تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف برای سیال شبه پلاستیک ۱۲۸
- شکل ۴-۴۵: تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف برای سیال دایلاتنت ۱۲۸
- شکل ۴-۴۶: تغییرات بیژن متوسط در برینکمن های مختلف در یک ضریب لغزش معین . ۱۲۹
- شکل ۴-۴۷: تغییرات بیژن متوسط در ضریب لغزش های مختلف ۱۳۰
- شکل ۴-۴۸: تغییرات بیژن متوسط در ضریب لغزش های مختلف ۱۳۰

فهرست علائم و اختصارات

عنوان	علامت اختصاری	عنوان	علامت اختصاری
سطح مقطع	A	عدد برینکمن	Br
ضریب ثبات سیال	m	عدد برینکمن بحرانی	Br_c
شاخص رفتار جریان	n	مختصه استوانه‌ای	r
سرعت لغزشی سیال	V_s	مختصه استوانه‌ای	z
ضریب لغزش	β	شعاع میکروکانال	r_o
سرعت متوسط سیال	V_m	شار حرارتی وارده بر دیواره	q''
طول لغزش	l	تنش برشی	τ_{rz}
طول لغزش بی‌بعد	L	نرخ برش	$\dot{\gamma}_{xy}$
چگالی سیال	ρ	سرعت شعاعی سیال	V_r
گرمای ویژه	c_p	سرعت زاویه‌ای سیال	V_θ
دما	T	سرعت محوری سیال	V_z
زمان	t	فشار	p
ضریب هدایت حرارتی	k	فشار بی‌بعد	P
عنوان	علامت اختصاری	عنوان	علامت اختصاری
مختصه بی‌بعد استوانه‌ای	Z	مختصه بی‌بعد استوانه‌ای	R
دمای بی‌بعد شار ثابت	θ	سرعت بی‌بعد سیال	V

D_h	قطر هیدرولیکی	Θ	دمای بی بعد دما ثابت
Q	دبی حجمی	T_w	دمای دیواره
f	ضریب اصطکاک	T_i	دمای سیال در ورودی
Po	عدد پوزیلی	T_b	دمای متوسط سیال
T_f	دمای مایع چسبیده به دیواره	Kn	عدد نادسن
l_k	مقاومت حرارتی سطحی	λ	متوسط طول پوشش آزاد مولکولی
Ca	عدد کاپیلاری	Re	عدد رینولدز
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی	Pr	عدد پرنتل
θ_m	دمای متوسط شار ثابت بی بعد	N_s	انتروپی کل بی بعد
Θ_m	دمای متوسط دما ثابت بی بعد	N_{HT}	انتروپی حرارتی بی بعد
Nu	عدد ناسلت	N_{FF}	انتروپی اصطکاکی بی بعد
\dot{S}_{gen}^m	نرخ محلی تولید انتروپی کل	Pe	عدد پکلت
\dot{S}_{HT}^m	نرخ محلی تولید انتروپی حرارتی	ψ	شار حرارتی بی بعد
\dot{S}_{FF}^m	نرخ محلی تولید انتروپی اصطکاکی	Ω	اختلاف دمای بی بعد
∇	عملگر گرادیان	Be	عدد بیژن
		$\overline{N_s}$	انتروپی متوسط کل
		\overline{Be}	عدد بیژن متوسط

فصل اول

۱ مقدمه، مفاهیم و مروری بر پژوهش های انجام

شده

۱-۱ مقدمه

با توجه به نیاز روز افزون بشر برای کسب اطلاعات، انجام محاسبات، ساخت فیلم، ویرایش تصاویر و عکس‌ها، حل معادلات پیچیده و بسیاری از موارد دیگر، نیاز به کامپیوتر امری مشهود و آشکار می‌باشد. با توجه به این که واحد پردازش اطلاعات کامپیوتر که همانند مغز انسان عمل کرده اساسی ترین بخش آن می باشد بنابراین هرچه پردازش اطلاعات سنگین و زیادتر باشد زمان بیشتری برای پردازش اطلاعات نیاز داریم از همین رو متخصصان این حوزه با توجه به نیاز مردم پردازشگرهای پیشرفته تری تولید کرده اند که این حجم بالای اطلاعات را در زمان بسیار کمتری نسبت به قدیم تحلیل و پردازش می کند ولی همانطور که مشخص می‌باشد پردازشگرهای امروزی گرمای به نسبت بالاتری را تولید می کنند، در نتیجه نیاز مبرمی به خنک کردن این قطعات داریم چراکه در صورت خنک کاری نامطلوب آن، بازدهی آن‌ها به شدت کاهش پیدا کرده و سبب بروز صدمات جدی در آن‌ها می‌شود [۱].

از این رو خنک نگاه داشتن این قطعات بسیار ضروری و لازم می‌باشد. یکی از راه‌های خنک کردن این وسایل استفاده از پره‌ها^۱ می باشد که به سبب سطح زیاد آن‌ها، بیشتر در معرض هوا بوده و می‌تواند گرمای دریافتی از پردازشگر را توسط انتقال حرارت جابجایی دفع کند. اما با توجه به پیشرفت تکنولوژی گرمای انتقال یافته از این قطعات بسیار افزایش یافته و در نتیجه پره‌ها توانایی لازم برای این حجم بالای انتقال حرارت را ندارند. به همین دلیل امروزه از ابزار جدیدی به نام هیت سینک‌های میکروکانالی^۲ استفاده می‌شود که بازده به نسبت بالاتری نسبت به پره‌ها دارند.

۱-۱-۱ کاربرد هیت سینک‌های حرارتی

هیت سینک‌های حرارتی، یک مدل شبکه فلزی می‌باشد که از فلزی با ضریب هدایت حرارتی بالا همانند مس، نقره و یا آلومینیوم ساخته می‌شوند. هیت سینک‌ها به صورت دائم با پردازنده در

^۱ Fin

^۲ Micro-channel heat sink

تماس بوده و گرمای حاصل از عملکرد هسته پردازشی را جذب می کند. تا زمانی که دمای هیت سینک از دمای پردازنده بیشتر نشود، انتقال حرارت از پردازنده به سمت هیت سینک می باشد و زمانی که دما بین هیت سینک و پردازنده برابر شود، انتقال حرارت متوقف شده و در این زمان فن به وسیله انتقال حرارت اجباری به وسیله هوا، شروع به خنک کردن هیت سینک می کند. هیت سینک ها و فن ها، متداول ترین نوع خنک کننده های قطعات الکترونیکی می باشند؛ ولی علاوه بر آن ها، خنک کننده های مایع نیز وجود دارد که بدون نیاز به فن گرما را به راحتی انتقال می دهند. آب هدایت گرمایی بیشتری نسبت به هوا داشته و می تواند گرما را سریع تر از هوا منتقل کند و همچنین به دلیل این که ظرفیت گرمایی ویژه بیشتری دارند، می توانند قبل از این که شروع به گرم شدن کنند، گرمای بیشتری را جذب نمایند. در این نوع خنک کننده ها عموماً از فن استفاده نمی شود و به جای آن از گردش یک مایع خنک کننده برای خنک کردن هیت سینک مورد نظر استفاده می شود.

تغییر فاز دادن سیال عامل یکی از روش های کاهش دمای واحد پردازنده می باشد. در این حالت یک کمپرسور وجود دارد به طوریکه، کمپرسور گازی که خنک شده است را فشرده می کند و به مایع تبدیل می کند سپس مایع پمپ شده و به سمت پردازشگر جریان می یابد. در نتیجه، مایع با جذب گرمای ناشی از عملکرد پردازشگر تبخیر شده و با حرکت به سمت کمپرسور، این سیکل تکرار می شود [۲].

در شکل زیر تصویر یک شبکه از هیت سینک های حرارتی مشاهده می شود که به صورت استوانه ای ساخته شده است.



شکل ۱-۱: شماتیک یک شبکه هیت سینک های حرارتی

۱-۱-۲ کاربرد و ساخت میکروکانالها

میکروکانالها، همانند مبدل های حرارتی هستند که با مساحت های مختلف، و از جنس های متفاوت با زبری^۱ های مختلف ساخته می شوند. این ابزارها، وسایل بسیار کارآمدی در هدف های متعددی از جمله انتقال حرارت می باشند که به دلیل حجم سیال کم استفاده شده در آنها و وزن و ابعاد کوچک، مورد توجه قرار گرفته است [۳]. در حقیقت، تاثیر کوچک نمودن ابعاد، باعث رسیدن به کیفیت بهتر همراه با صرفه جویی در انرژی می باشد. قابلیت این وسایل در زمینه داشتن ضرایب انتقال حرارت بالا توسط بررسی های محققان مختلف به اثبات رسیده است [۴, ۵]. آشکار است که نسبت سطح به حجم با بعد طول سیستم نسبت عکس دارد از این رو با کاهش ابعاد سیستم، نسبت سطح به حجم افزایش می یابد؛ در نتیجه در میکروسیستمها به علت وجود سطح زیاد، مقدار قابل توجهی اصطکاک به دلیل لزجت سیال به وجود می آید که باید مورد بررسی قرار بگیرد. میکروکانالها یکی از اجزای اصلی میکروسیستمها می باشند که قطر هیدرولیکی^۲ آنها در محدوده ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومتر می باشد. و هم اکنون پژوهش هایی بر روی نانو کانالها نیز در حال انجام

^۱ Roughness

^۲ Hydraulic diameter

می باشد.

روش های متعددی برای ساخت میکروکانال های دایروی وجود دارد که در این جا به یک روش ساده و سریع برای ساخت میکروکانال ها و همچنین شبکه میکروکانال های دایروی اشاره می کنیم [۶]. میکروکانال ها با سطح مقطع مستطیلی و مربعی، عملکرد کافی برای اهداف محققان داشته اما برای بعضی از کاربردهای خاص استفاده از میکروکانال با سطح مقطع دایروی بهتر می باشد. میکروکانال ها دایروی بسیار مناسب برای مطالعات الکترومکانیکی می باشد زیرا که یک چسبندگی رضایت بخش بین سلول ها و ورودی میکروکانال وجود دارد، از طرف دیگر در میکروکانال های مستطیلی رشد سلول ها در کانال را محدود می کند و همچنین در سلول های رشد یافته در پایین یک میکروکانال مستطیلی، تنش های برشی متفاوتی وارد می شود که باعث بی نظمی و کشیدگی آن ها می شود.

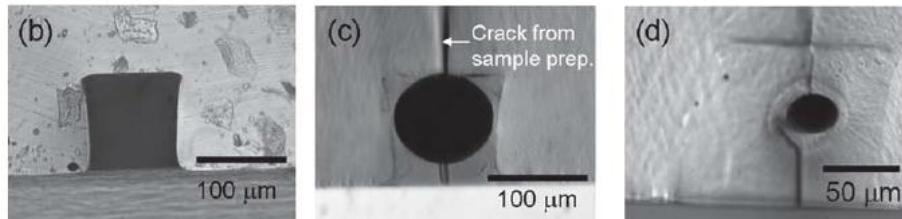
یکی از مزایای میکروکانال های دایروی این می باشد که در آن ها شاهد پدیده ایستایی جریان که در گوشه های میکروکانال های مستطیلی رخ می دهد نیستیم. با توجه به مزایای میکروکانال های دایروی، بسیاری از محققان بر آن شدند که روش ساخت میکروکانال های دایروی را گسترش دهند. یک روش سریع و ساده برای ساخت میکروکانال های دایروی با ابعاد بین چند میکرومتر تا صدها میکرومتر این می باشد که یک میکروکانال مربعی که به روش حکاکی نرم^۱ تولید شده است را توسط سیالی به نام پلی دی متیل سیلوکزان^۲ که به صورت PDMS نشان می دهند پر می کنند و سپس آن را تا دمای بین ۷۵ الی ۱۵۰ درجه سانتیگراد گرم می کنند و سپس میکروکانال را از سمت انتهایی تحت یک جریان تحت فشار هوا قرار می دهند که سبب جابجایی این سیال PDMS می شود و در نتیجه آن یک لایه یا پوشش از این سیال با سطح مقطع دایروی که ناشی از تنش سطحی^۳ بین سیال و دیواره می باشد به وجود می آید. این روش بسیار کارآمد می باشد که می تواند بر روی

^۱ Soft-lithography

^۲ Polydimethylsiloxane

^۳ Surface tension

میکروکانال های مربعی تحت هر شرایطی اجرا شود. شایان ذکر است که از این روش می توان برای ساختن شبکه ای از میکروکانال ها دایروی با ابعاد مختلف استفاده کرد، که در شکل زیر تصویر آن مشخص می باشد.



شکل ۱-۲: مراحل ساخت یک میکروکانال دایروی

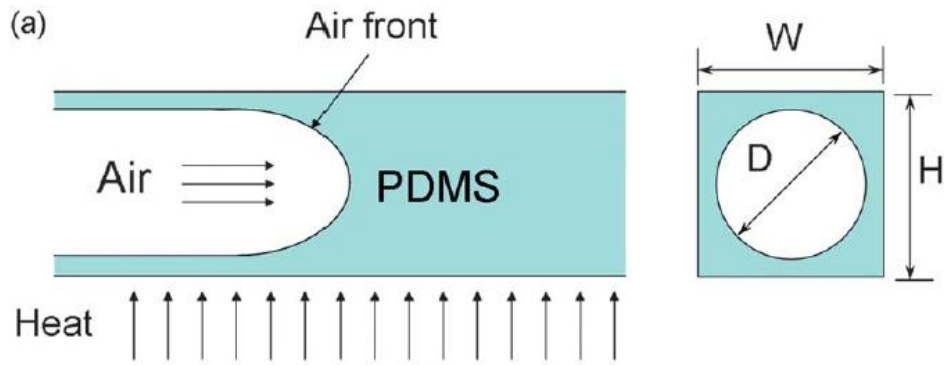
تحقیقات بسیاری جهت نوع گاز تحت فشاری که جهت جابجایی این سیال استفاده می شود انجام شده است که به رابطه زیر دست یافته اند [۶]:

$$Ca = \frac{U\mu}{\sigma} \quad (1-1)$$

در رابطه بالا Ca ، عدد کاپیلاری^۱، U سرعت جریان گاز و μ ویسکوزیته سیال پر شونده می باشد. برای سیال PDMS، ویسکوزیته آن با افزایش دما افزایش پیدا می کند و می توان با رقیق کردن سیال ذر شده توسط حلال های اورگانیک، ویسکوزیته آن را کاهش داد. هم چنین تاثیر زمان پخت، دمای پخت، ویسکوزیته سیال و فشار گاز بر روی ابعاد میکروکانال بسیار زیاد می باشد. ابعاد

میکروکانال به وسیله پارامتر بی بعد $\frac{D}{W}$ نشان داده می شود که در شکل زیر مشخص می باشد:

^۱ Capillary number



شکل ۱-۳: شماتیک روش ساخت یک میکروکانال دایروی [۶]

در این شکل D قطر نهایی میکروکانال می باشد که در نهایت به آن می رسیم و W عرض اولیه میکروکانال مربعی می باشد.

جهت عبور سیال از میان کانال های کوچک، بایستی فرضیاتی را که در مورد عبور سیال از کانال های بزرگ به کار می رود را اصلاح نمود. در ابتدا برای معادلات مربوط به جاری شدن سیال در میکرو سیستم ها باید شرایطی را در نظر گرفت. اولین مورد شرط پیوستگی^۱ می باشد که در حقیقت نشان دهنده این موضوع می باشد که سیال مورد نظر تا بی نهایت قابل تقسیم می باشد؛ دومین شرط این می باشد که سیال دارای یک وضعیت تعادلی ترمودینامیکی در تمام قسمت هایش باشد. یعنی در واقع طول متوسط پویس آزاد^۲ در مولکول های گاز و یا فاصله بین مولکول ها در حالت مایع در تمام سیال یکسان باشد تا بتوان تحلیل درستی از جریان سیال در داخل میکروسیستم داشت.

برای بررسی فرض پیوستگی، سیالات را به دو بخش گاز و مایع تقسیم بندی می کنند. البته به دلیل رفتار پیچیده مایعات نسبت به گازها، تا کنون تئوری دقیق و کاملی مانند تئوری های جنبشی گازها برای مایعات ارائه نشده است. زیرا که در مایعات، مولکول های مایع بسیار به هم نزدیک بوده و بسامد برخورد آنها نیز بالا می باشد. در نتیجه در مایعات مفاهیمی مانند طول پویس آزاد مولکول ها و

^۱ Continuity

^۲ Mean free path

عدد نادسن^۱ کاربردی ندارد [۷].

در میکروکانالها حرکت سیال در مجاورت یک سطح جامد و دیواره با فرض عدم لغزش سیال و سرعت صفر روی دیواره در سیستمهای میکرو دقیق نمی باشد و بررسی های انجام شده مشخص کردند که سیال روی دیواره لغزیده و دارای سرعتی غیر صفر می باشد [۸] که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

۳-۱-۱ تعریف سیال پاورلا

سیالات غیرنیوتنی در واقع سیالاتی می باشند که به طور کلی منحنی تنش برشی^۲ بر حسب نرخ برش^۳ خطی نمی باشد و یا از مبدا نمی گذرد و همین طور ویسکوزیته ظاهری^۴ و تنش برشی آنها در یک دما و فشار معین ثابت نمی باشند و به شرایط جریان، هندسه جریان و نرخ برش وابسته می باشند. مدل های ریاضی بسیاری برای سیالات غیرنیوتنی ارائه شده است که هر کدام در یک محدوده معینی از نرخ برش کاربرد دارد. مدل ریاضی سیال غیر نیوتنی در این پروژه، مدل پاورلا^۵ می باشد که در بازه محدودی از نرخ برش یا تنش کاربرد دارد. همان طور که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است برای سیال غیر نیوتنی پاورلا تنش برشی بر حسب نرخ برش خطی نمی باشد. برای سیال غیر نیوتنی پاورلا رابطه بین تنش برشی و نرخ برش به صورت زیر بیان می شود [۹]:

$$\tau = m(\dot{\gamma}_{xy})^n \quad (2-1)$$

که در این رابطه τ تنش برشی سیال پاورلا، m و n به ترتیب ضریب ثبات سیال^۶ و شاخص

^۱ Knudsen number

^۲ Shear stress

^۳ Shear rate

^۴ Apparent viscosity

^۵ Power-law

^۶ Fluid consistency coefficient

رفتار جریان^۱ می باشد که دو پارامتر تجربی می باشد. در صورتی که مقدار شاخص رفتار جریان کوچکتر از یک باشد به عنوان سیال شبه پلاستیک یا سودوپلاستیک^۲ یا نازک شونده برش^۳ شناخته می شود، هم چنین متداول ترین سیال غیر نیوتنی مستقل از زمان می باشد. در صورتی که شاخص رفتار جریان برابر یک باشد به عنوان سیال نیوتنی شناخته می شود و در صورتی که شاخص رفتار جریان بزرگتر از یک باشد به عنوان سیال دایلاتنت^۴ یا ضخیم شونده برش^۵ شناخته می شود.

هم چنین ویسکوزیته ظاهری سیال پاورلا به صورت زیر می باشد [۹]:

$$\mu = m(\dot{\gamma}_{xy})^{n-1} \quad (3-1)$$

که در این رابطه μ ویسکوزیته ظاهری سیال پاورلا می باشد و $\dot{\gamma}_{xy}$ نرخ برش می باشد. همان طور که از رابطه بالا مشخص می باشد برای سیالات شبه پلاستیک با افزایش نرخ برش ویسکوزیته ظاهری سیال کاهش پیدا می کند ولی برای سیالات دایلاتنت عکس این موضوع صادق می باشد.

مدل ریاضی سیال پاورلا برای بازه محدودی از نرخ برش کاربرد دارد بنابراین مقادیر انتخابی برای m و n ، بستگی به بازه نرخ برش (کرنش برشی) در نظر گرفته شده دارد. هم چنین مقادیر صفر و بی نهایت برای ویسکوزیته برشی در این مدل ریاضی پیش بینی نشده است. دیمانسیون ضریب ثبات سیال بستگی به مقدار عددی شاخص رفتار جریان دارد. با وجود این محدودیت ها این مدل ریاضی بیشترین استفاده را برای کاربردهای مهندسی داشته است.

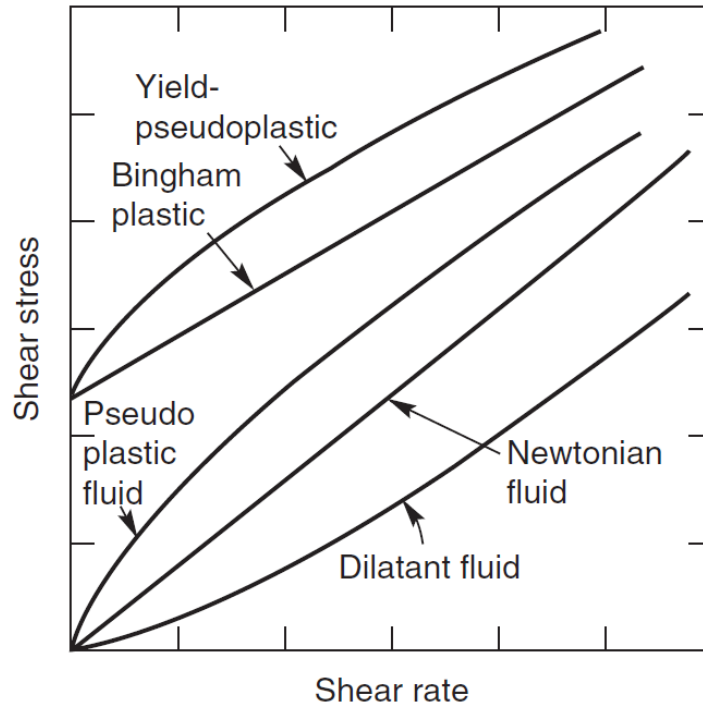
^۱ Flow behaviour index

^۲ Pseudo-plastic

^۳ Shear-thinning

^۴ Dilatant

^۵ Shear-thickening



شکل ۱-۴: رفتار انواع سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی مستق از زمان

لازم به ذکر می باشد که سیالات پاورلا جزو سیالات ویسکوز غیر نیوتنی طبقه بندی می شوند به طوریکه با اعمال تنش، تغییر شکل داده و با برداشتن تنش به حالت اولیه باز نمی گردند و در حقیقت کل انرژی وارده را تلف می کنند.

برای سیالات شبه پلاستیک که شاخص رفتار جریان در آن ها کوچکتر از یک می باشد می توان به مواد خوراکی از جمله کره، سس سیب، پوره زرد آلو و موز، شکلات و مایونز اشاره کرد که هر یک از این مواد در یک دمای خاص جزو سیالات شبه پلاستیک قرار می گیرند [۹]. هم چنین خون انسان نیز جزو این دسته از سیالات قرار می گیرد. هم چنین پلیمرهای صنعتی از جمله پلی اتیلن با چگالی بالا، پلی استیرن، پلی پروپیلن، نایلون، پلی کربنات و هم چنین موادی از قبیل لاک ناخن، خمیر دندان نیز در این دسته بندی قرار دارند.

سیالات دایلاتنت مشابه سیالات شبه پلاستیک می باشند با این تفاوت که بر خلاف سیالات

شبه پلاستیک تنش تسلیم از خود نشان نمی دهند و همان طور که ذکر شد ویسکوزیته ظاهری آن ها با افزایش نرخ برش افزایش پیدا می کند؛ به همین دلیل به این نوع سیالات ضخیم شونده برش نیز می گویند. هم چنین در سیستم تعلیق نیز از این نوع سیالات استفاده می شود.

با توجه به رابطه (۲-۱)، کاملاً مشهود می باشد که هر چه شاخص رفتار جریان افزایش پیدا کند، تنش برشی نیز افزایش پیدا می کند و می توان گفت که برای سیالات دایلاتنت همواره تنش برشی بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک می باشد که این خود باعث می شود تلفات ویسکوزیته بیشتری برای این نوع سیالات در دیواره به وجود آید که در فصل سوم و چهارم به طور مفصل به آن پرداخته می شود.

۲-۱ مفاهیم

در این بخش به بررسی مفاهیم مربوط به لغزش سیال روی دیواره و هم چنین مکانیزم وجود لغزش مایعات روی دیواره میکروکانال می پردازیم.

۱-۲-۱ مفاهیم مربوط به لغزش سیال در دیواره

با توجه به این که شرط عدم لغزش مایعات روی دیواره در بررسی های متعددی مورد استفاده قرار گرفته، اما تحقیقات آزمایشگاهی نشان می دهد که لغزش مایعات روی دیواره میکروکانال ها با سطوحی آب گریز^۱ و یا فوق العاده آب گریز^۲ رخ می دهد. گفتنی است که درجه آب گریزی سطح توسط زاویه ای که قطره با سطح آزاد جامد در حالت پایا ایجاد می کند، تعیین می شود. هم چنین در حالت هایی که سطح میکروکانال آب گریز و کانال کوچکی با طول مشخصه بین یک نانومتر تا یک میکرومتر باشد، فرض پیوستگی دقیق نمی باشد. هم چنین در میکرو دیوایس ها که کاربردهای بسیاری در پزشکی، سلول های سوختی و مدل های حرارتی برای خنک کاری وسایل الکترونیکی دارند نیز اثر لغزش بسیار مهم می باشد.

^۱ Hydrophobic

^۲ Super-hydrophobic

به طور کلی مفهوم لغزش مایعات و گازها متفاوت می باشد. لغزش در گازها روی دیواره زمانی رخ می دهد که فاصله متوسط آزاد مولکول ها از یکدیگر به مقداری برسد که نتوان گاز را به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفت، ولی لغزش در مایعات به دلیل تاثیری که مولکول های مایع نزدیک دیواره با سطح پوشش داده شده توسط ماده ای خاص و یا ساخته شده با جنس و زبری مخصوص روی یکدیگر دارند رخ می دهد و به این ترتیب در حالتی که مایع یک محیط کاملاً پیوسته نیز باشد، لغزش مایع روی دیواره می تواند رخ دهد [۱۰].

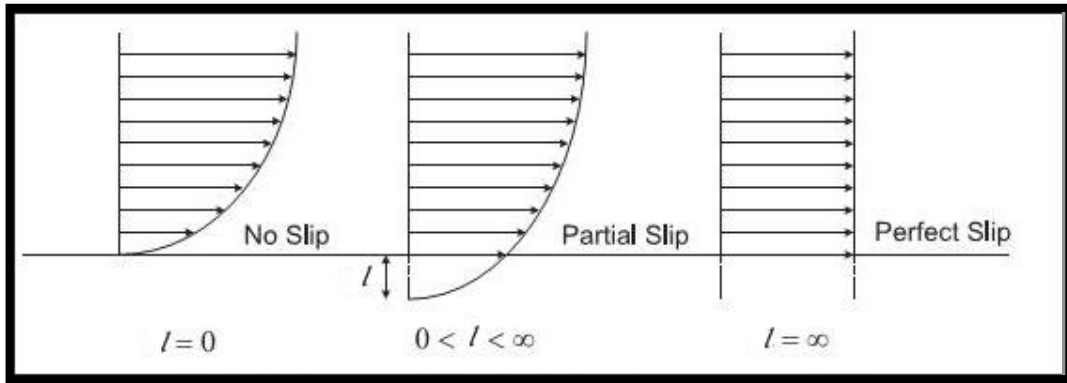
یکی از مهم ترین عوامل در لغزش مایعات زبر بودن سطح می باشد که باعث می شود تا مایع مورد نظر، خلل و فرج هایی در ابعاد میکرومتر که بین قله های زبری ها وجود دارد را پر نکند. در نتیجه اصطکاکی در فصل مشترک سطح جامد، هوا و آب به وجود می آید که باعث می شود مایع در اثر تنش سطحی بر فراز قله های زبری ها شروع به لغزیدن نماید. نتایج آزمایشگاهی بیان گر کاهش نیروی درگ سیال در جریان آرام با کاهش ارتفاع زبری های سطح و افزایش فاصله بین قله ها می باشد [۱۱].

[۱۲] بیان می کند که رفتار سیالات مایع به طور کامل از رفتار سیالات گازی متفاوت و بسیار پیچیده تر می باشد، در مایعات پارامتری به نام عدد نادسن^۱ وجود ندارد که بیان کننده رفتار پیوستگی سیال مورد نظر باشد و برای این منظور آزمایش های عملی و یا شبیه سازی دینامیک مولکولی لازم می باشد. از این رو معمولاً شرایط لغزش به وسیله طول لغزش^۲ بیان می شود که در حقیقت فاصله بین سطح و نقطه ای در خارج می باشد که سرعت برون یابی شده^۳ سیال برابر صفر است که در شکل زیر مشخص می باشد.

^۱ Knudsen number

^۲ Slip length

^۳ Extrapolated velocity



شکل ۱-۵: شماتیک لغزش روی دیواره در طول لغزش‌های مختلف [۱۰]

با توجه به نظریه مولکولی، اگر اصطکاک داخلی بین لایه‌های سیال بزرگتر از نیروی بین مولکول‌های مایع و جامد در روی دیواره باشد، طول لغزش پدیدار می‌شود که در این حالت، مولکول‌های مایع شروع به لغزش روی دیواره می‌نمایند. هم‌چنین 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. در نتیجه طول لغزش ثابت به مفهوم ثابت ماندن ضریب اصطکاک و سرعت لغزشی سیال روی دیواره می‌باشد [۱۳].

نیروهای چسبندگی^۱ که توسط کشش سطحی^۲ مایعات تعیین می‌شوند، روی ارتفاع تضعیف^۳ مایعات اثر گذار است 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 که طول لغزش متناسب با ارتفاع زبری‌های روی دیواره می‌باشد. خواص سطح تأثیر زیادی در لغزش مایعات دارد و به این ترتیب نیروی چسبندگی و لزجت سیال دو عامل مهم در لغزش مایعات می‌باشد [۱۴].

^۱ Adhesive force

^۲ Surface tension

^۳ Sagging height

در حالی که لغزش داریم یک لایه نازک هوا، لایه سیال را از دیواره جدا می کند که باعث می شود جریان سیال روی سطح جامد با اصطکاک کمتری حرکت کند و طول لغزشی که به وسیله لایه هوا به ضخامت h ایجاد می شود را بر اساس رابطه زیر نشان می دهد [۱۵]:

$$L_s = h \left(\frac{\mu_l}{\mu_i} - 1 \right) \quad (۴-۱)$$

که در این رابطه μ_l و μ_a به ترتیب ویسکوزیته سیال و هوا می باشد، و مطابق رابطه بالا طول لغزش تحت تاثیر ویسکوزیته سیال و هوای روی سطح می باشد. بنابراین کسر هوای^۱ روی سطوح آب گریز نیز لغزش سیال را تحت تاثیر قرار می دهد که در این زمینه کارهای عملی بسیاری برای اندازه گیری طول لغزش انجام شده است که در بیشتر آن ها از آب به عنوان سیال مایع به خاطر بالا تنش صفحه ای استفاده شده است. هم چنین از نظر دیدگاه مولکولی، زمانی که اصطکاک بین مولکول های سیال بیشتر از نیروی متقابل بین مولکول های سیال و جامد باشد، طول لغزش به جود می آید. بنابراین ویسکوزیته سیال به عنوان یک کمیت مهم فیزیکی می باشد و بیان کننده اصطکاک داخلی سیال می باشد باید در نظر گرفته شود وقتی که شرایط لغزش را مورد بررسی قرار می دهیم و بر اساس معادله (۴-۱) هر چه ویسکوزیته سیال بیشتر باشد طول لغزش افزایش پیدا می کند، لازم به ذکر می باشد که زبری سطح، نیروی متقابل در بین سیال و سطح جامد و زاویه تماس نیز تاثیر بسزایی بر روی طول لغزش دارد. هم چنین مشاهدات بسیاری انجام شده است که نشان می دهد که شرایط لغزش در دیواره برای سیالات غیر نیوتنی نیز وجود دارد، مانند حلال های پلیمری و اکستروژن مربوط به ذوب پلیمر در لوله های مویرگی که به خاطر ناپایداری در مقادیر بالای تنش و این ناپایداری مربوط به زنجیره انقطاع پلیمرها و شکستگی در سطح تماس پلیمر و دیواره می شود که نشان از وجود لغزش در دیواره برای این نوع سیالات می باشد.

با توجه به توضیحات بالا مشخص می باشد که برای تعیین مقدار دقیق طول لغزش،

^۱ Air fraction

کمیت‌هایی از جمله، ویسکوزیته سیال، ویسکوزیته هوای روی سطح، اندازه گیری ضخامت لایه هوا، بررسی نیروی بین مولکولی سیال و بین سیال و دیواره، تعیین ابعاد دقیق میکرو کانال و ... باید تعیین شود که نیازمند انجام آزمایش‌های تجربی می‌باشد.

۳-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده

در این قسمت به بررسی برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی پاورلا و مطالعاتی که در زمینه انتقال حرارت و تولید انترپوی انجام شده است پرداخته می‌شود.

هانگ^۱ [۱۶] به صورت تحلیلی به بررسی یک نانو سیال در شرایط توسعه یافته حرارتی و هیدرولیکی در یک میکروکانال دایروی که تحت شار ثابت می‌باشد پرداخته است و مشاهده نمود که بین حالتی که تلفات ویسکوزیته وجود داشته باشد و حالتی که صرف نظر شود عدد ناسلت بسیار متفاوت می‌باشد و در نتیجه تلفات ویسکوزیته تاثیر بسیار زیادی بر روی میدان دمایی دارد و هم‌چنین در یک مقدار خاص از ذرات نانو، تاثیر تلاف ویسکوزیته در فرایند سرمایه‌گذاری چشم‌گیرتر از فرایند گرمایش می‌باشد.

قزوینی^۲ و همکارانش [۱۷] به بررسی عددی و تحلیلی تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی یک هیت سینک میکروکانالی که داخل آن یک نانو سیال جریان دارد پرداختند و دریافتند که، تلفات ویسکوزیته فقط برای نانو سیالاتی با کسر حجمی کم و کانالی با نسبت ابعاد پایین، قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

مورینی^۳ [۱۸] به صورت آزمایشگاهی 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،

^۱ *Y. M. Hung*

^۲ *M. Ghazvini*

^۳ *G. L. Morini*

گرمای تولیدی ناشی از تلفات لزجت می تواند تاثیر زیادی روی افزایش دمای سیال داشته باشد؛ اگرچه دیواره آدیاباتیک نیز باشد. علاوه بر این، او نتیجه گرفت که در این گرمای تولیدی می تواند باعث تغییر خواص سیال در مقاطع ورودی و خروجی شود و در بررسی های آزمایشگاهی باید به این نکته توجه شود.

تانک و بیازیتگلو^۱ [۱۹] به صورت عددی، کو و کلینستر^۲ [۲۰] به صورت آزمایشگاهی به بررسی وجود تلفات ویسکوزیته در یک میکروکانال مدور در شرایط پایدار پرداختند و یافتند که تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی ضریب اصطکاک با کاهش سایز سیستم افزایش پیدا می کند. همچنین دریافتند که عدم در نظر گرفتن اثر تلفات لزجت باعث کاهش دقت بررسی های عددی و اندازه گیری ضریب اصطکاک سیالات مختلف در میکروکانال می شود.

تسو و ماهولیکار^۳ [۲۱] به صورت عددی به بررسی نقش عدد برینکمن بر روی میدان دمایی پرداختند و یافتند که برای فرایند گرمایش برینکمن می تواند مثبت یا منفی باشد ولی برای فرایند سرمایش برینکمن حتما منفی می باشد و همچنین دریافتند که برینکمن فقط یک مقدار برای تاثیر تلفات ویسکوزیته نمی باشد بلکه محدودیت های ساختاری برای کاهش ابعاد میکروکانال ایجاد می کند و این تاثیر در جریان آرام نسبت درهم بیشتر می باشد.

لا و سیوبلا^۴ [۲۲] به مدل سازی عددی تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی انتقال حرارت و جریان سیال در یک میکروتیوب^۵ برای سه سیال مختلف و همچنین دو شار حرارتی در جهات مختلف پرداختند. آن ها یافتند که عدد ناسلت برای فرایند سرمایش بیشتر از گرمایش می باشد و همچنین در $Br = 0.5$ برای فرایند سرمایش عدد پوزیلی به مقدار ۶۴ میل می کند که در حقیقت این مقدار

^۱ G. Tunc & Y. Bayazitoglu

^۲ J. Koo & C. Kleinstreuer

^۳ C. P. Tso & S. P. Mahulikar

^۴ D. Lelea & A. E. Cioabla

^۵ Micro-tubes

مربوط به جریان جابجایی توسعه یافته می باشد.

آیدین^۱ [۲۳] به صورت تحلیلی به نقش تلفات ویسکوزیته برای سیال نیوتنی در یک میکروکانال دایروی تحت شرایط مرزی شار ثابت و دما ثابت، و توسعه یافته حرارتی و هیدرولیکی پرداخته است. در این تحقیق متوجه شد که برای مقادیر برینکمن کوچکتر از یک، تلفات ویسکوزیته تاثیر چشم گیری بر روی میدان دمایی دارد و برای مقادیر کوچکتر از آن می توان از تلفات ویسکوزیته صرف نظر کرد.

گریگلازوسکی^۲ و همکارانش [۲۴] به بررسی عددی تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی سیال پاورلا با خواص تابع دما در یک میکروکانال دایروی تحت شرایط در حال توسعه حرارتی و شرایط مرزی دما ثابت پرداختند. آن ها دریافتند که در گرمایش با حرکت در طول کانال سرعت محوری کاهش پیدا می کند هم چنین تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی سرعت در مرکز میکروکانال در فرایند سرمایش بیشتر از گرمایش می باشد. تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی میدان دمایی در هر دو حالت گرمایش و سرمایش چشم گیر می باشد.

لاوال و موجودمدار^۳ [۲۵] به صورت تحلیلی و عددی به بررسی تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی انتقال حرارت برای سیال پاورلا در شرایط در حال توسعه حرارتی و هیدرولیکی و شرایط مرزی دما ثابت در کانالی با سطح مقطع دلخواه پرداختند. آنها دریافتند زمانی که برینکمن کوچک می باشد با حرکت در جهت محوری ناسلت افزایش پیدا می کند و هم چنین در حالتی که دیوار در حال گرم شدن می باشد دمای میانگین سیال در حال افزایش می باشد تا جایی که با دمای دیواره برابر شود.

باکاراجو^۴ [۲۶] به صورت تحلیلی به بررسی انتقال حرارت سیال الکترواسموتیک^۵ پاورلا در

^۱ O. Aydın

^۲ P. Gryglaszewski

^۳ A. Lawal & A. S. Mujumdar

^۴ O. Bakaraju

^۵ Electro-osmotic

داخل میکروکانال اسلیت^۱ (بین دو صفحه موازی) در شرایط مرزی شار ثابت چرخیده است و دریافتند که نرخ انتقال حرارت در برینکمن های زیاد با افزایش شاخص پاورلا کاهش می یابد ولی برای سیالات دایلاتنت خلاف این موضوع صادق است.

هم چنین چن و تسو^۲ [۲۷] با بررسی عددی سیال پاورلا در کانالی بین دو صفحه موازی با محیط متخلخل^۳ مشخص کردند که توزیع دمای سیال ارتباط نزدیکی با توزیع سرعتش دارد. آن ها هم چنین به مقایسه سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی پرداخته و نشان دادند که با افزایش عدد برینکمن، عدد ناسلت سیالات نیوتنی بزرگتر از سیالات غیر نیوتنی می باشد.

دهکردی و محمدی^۴ [۲۸] به صورت عددی در یک میکروکانال دایروی تحت شار ثابت، به صورت عددی به بررسی سیال پاورلا در شرایط ناپایدار^۵ و در حال توسعه حرارتی پرداختند و مشاهده کردند که رفتار عدد ناسلت به شدت تحت تاثیر شاخص جریان و شار وارده می باشد. و هم چنین طول حرارتی ورودی با افزایش شار بی بعد افزایش می یابد در حالی که با افزایش شاخص پاورلا کاهش پیدا می کند.

بابایی^۶ و همکارانش [۲۹] به صورت عددی به بررسی سیال الکترواسموتیک پاورلا در یک میکروکانال اسلیت پرداخته اند و تعیین کردند که در شرایطی که جریان فشار هم جهت جریان باشد سیالات شبه پلاستیک به سرعت بالاتری نسبت به سیالات دایلاتنت دست پیدا می کنند در حالی که باگر جریان فشار مخالف جریان باشد عکس این موضوع صحیح می باشد. هم چنین برای جریان فشار مخالف جریان، برای سیالات شبه پلاستیک ویسکوزیته از مرکز میکروکانال به سمت دیواره کاهش پیدا می کند و عکس این موضوع برای سیالات دایلاتنت صدق می کند.

^۱ Slit

^۲ G. M. Chen & C. P. Tso

^۳ Porous medium

^۴ A. M. Dehkordi & A. A. Mohammadi

^۵ Unsteady

^۶ Babaie

تسو^۱ و همکارانش [۳۰] به صورت تحلیلی به بررسی انتقال حرارت سیال پاورلا بین دو صفحه موازی که هر دیواره، تحت شار متفاوتی می باشد و جریان توسعه یافته هیدرولیکی و حرارتی می باشد پرداخته اند. آن ها مشاهده کردند زمانی که دو دیواره تحت شار متفاوتی باشند تاثیر تلفات ویسکوزیته بسیار مهم می شود.

هم چنین وکیلی^۲ و همکارانش [۳۱] به صورت عددی انتقال حرارت سیال الکترواسموتیک پاورلا را داخل یک میکروکانال مستطیلی^۳ را مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که هرچه میکروکانال بیشتر به شکل مربعی نزدیک شود، گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته افزایش می یابد به دلیل تیزتر شدن شکل گرادیان سرعت؛ هم چنین دریافتند که تلفات ویسکوزیته برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سایر سیالات می باشد. با توجه به این که ابعاد میکروکانال ها از مرتبه میکرون می باشد بنابراین فرض عدم لغزش سیال روی دیواره با خطا همراه خواهد بود [۳۲].

نگوما و ارچیکویی^۴ [۳۳] به بررسی عددی جریان سیال نیوتنی بین دو صفحه موازی با فرض وجود لغزش سیال و عدم شرط پرش دمایی^۵ برای سیال روی دیواره پرداخته و اثرات ضریب لغزش سیال روی اختلاف دمای دیواره و سیال عامل و هم چنین عدد ناسلت را مورد تحلیل قرار دادند.

یزدی^۶ و همکارانش [۳۴] به حل تشابهی جریان لغزشی سیال روی سطح آزاد پرداختند. آن ها با در نظر گرفتن سرعت لغزش گاز و مایع روی دیواره و هم چنین 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 فاصله بین مولکول ها در حالت مایه، پرش دمایی در مایعات رخ نمی دهد.

^۱ C. P. Tso

^۲ M. A. Vakili

^۳ Rectangular

^۴ G. D. Ngoma & F. Erchiqui

^۵ Temperature jump condition

^۶ M. H. Yazdi

خان و یوانویچ^۱ [۳۵] به صورت تحلیلی به بررسی جریان آرام یک سیال گازی در داخل میکروکانال و نانوکانال مستطیلی تحت شرایط توسعه یافته و با وجود لغزش در دیواره و پرش دمایی پرداختند که مشاهده کردند که تلفات ناشی از اصطکاک با کاهش عدد نادسن و با افزایش نسبت ابعاد کانال کاهش پیدا می کند.

محمود^۲ [۳۶] به صورت عددی به بررسی تاثیر لغزش سطحی سیال پاورلا روی یک صفحه پیوسته در حال حرکت پرداخته است. مشاهدات نشان داد ضریب لغزش سطحی محلی با افزایش پارامتر لغزش کاهش پیدا می کند.

افزایش آگاهی از محدودیت منابع انرژی، امروزه جوامع علمی را بر آن داشته تا در پی راه کاری برای کاهش اتلاف انرژی از سیستم ها باشند. یکی از روش هایی که در مورد سیستم های انرژی به طور گسترده ای به کار برده می شود، بررسی سیستم ها از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک و سعی در کاهش میزان بازگشت ناپذیری^۳ آن ها می باشد. بازگشت ناپذیری عاملی است که باعث افزایش کار هدر رفته^۴ و کاهش کار مفید^۵ می شود [۳۷].

از آن جا که میزان تولید انترپی بیان گر میزان بازگشت ناپذیری سیستم می باشد، به وسیله قانون دوم ترمودینامیک بر روی سیستم ها می توان با کمینه کردن تولید انترپی، افت های اصطکاکی و حرارتی را به حداقل رساند [۳۸].

بیشتر فرایندهایی که در آن انتقال حرارت انجام می شود شامل دو بازگشت ناپذیری ناشی از انتقال حرارت و اصطکاک می باشند [۳۹].

¹ W. A. Khan & M. M. Yavanovich

² M. A. A. Mahmoud

³ Irreversibility

⁴ Work loss

⁵ Useful work

بیژن^۱ گام های مهمی در زمینه بررسی تولید انترویی برداشته است [۴۰]. به عنوان مثال در [۴۱] به صورت اجمالی بر کارهای انجام شده در زمینه بازگشت ناپذیری سیستم ها مروری کرده و می توان آن را مرجع کاملی در این زمینه دانست.

محمود و فریسر^۲ [۴۲] به صورت تحلیلی به بررسی قانون دوم یک سیال نیوتنی در یک کانال با مقطع دایروی و هم چنین بین دو صفحه موازی تحت شرایط مرزی شار ثابت و دما ثابت پرداختند. هم چنین به بررسی اجمالی انترویی متوسط سیال پاورلا بین دو صفحه موازی پرداختند.

عباسی^۳ [۴۳] به صورت تحلیلی به بررسی تولید انترویی سیال نیوتنی داخل هیت سینک حرارتی پرداخته است و مشخص کرد که نرخ تولید انترویی به شدت تحت تاثیر ابعاد کانال می باشد و هم چنین انترویی ناشی از اصطکاک با افزایش برینکمن افزایش پیدا می کند.

ماه^۴ و همکارانش [۴۴] نیز به صورت تحلیلی با در نظر گرفتن نانو سیال در یک میکروکانال مدور در جریان آرام در حالت عدم وجود لغزش سیال روی دیواره، به طور تحلیلی به بررسی اثر تلفات لزجت سیال روی تولید انترویی پرداخته و مشاهده کردند که مقادیر متوسط انترویی تولیدی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت با افزایش اثر تلفات لزجت، روند رو به رشدی داشته و باعث افزایش هدر رفته انرژی می شود.

هانگ^۵ [۴۵] به صورت تحلیلی با مقایسه تولید انترویی در دو حالت وجود و عدم وجود تلفات لزجت سیال در میکروکانال دایروی با فرض عدم لغزش سیال نیوتنی روی دیواره، به بررسی کمی مقدار خطای ایجاد شده پرداخت و مشاهده کرد خطای ایجاد شده برای انترویی کلی و عدد بیژن در دو حالت وجود و عدم وجود تلفات ویسکوزیته به ترتیب به بیش از ۴۰٪ و ۶۰٪ می رسد که مقدار

^۱ A. Bejan

^۲ S. Mahmud & R. A. Fraser

^۳ H. Abbassi

^۴ W. H. Mah

^۵ Y. M. Hung

قابل توجهی می باشد.

هومن^۱ [۴۶] نیز به صورت تحلیلی با بررسی تحلیل 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 انترویی تحلیل کرده است.

محمود و فریسر^۲ [۴۷] به صورت تحلیلی به بررسی انتقال حرارت و تولید انترویی در جریان سیال غیر نیوتنی پاورلا در یک میکروکانال دایروی بدون وجود تلفات ویسکوزیته و هم‌چنین بدون لغزش در دیواره پرداختند و دریافته‌اند که با افزایش شاخص پاورلا نرخ تولید انترویی افزایش پیدا می‌کند.

بیلباس و پاکدمیری^۳ [۴۸] به صورت تحلیلی به بررسی تولید انترویی برای سیال پاورلا در داخل یک لوله دایروی با شرایط ویسکوزیته متغیر پرداختند و دریافته‌اند که پارامتر غیر نیوتنی، عدد تولید انترویی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و هم‌چنین افزایش پارامتر ویسکوزیته باعث رشد انترویی تولیدی می‌شود.

تان و چن^۴ [۴۹] به بررسی انتقال حرارت و تولید انترویی در جریان سیال پاورلا در بین دو صفحه موازی با وجود تلفات ویسکوزیته و شرط عدم لغزش روی دیواره پرداختند. آن‌ها بررسی اثر تلفات ویسکوزیته بر روی تولید انترویی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت و عدد بیژن^۵ را در مطالعه خود انجام دادند و نشان دادند که صرف نظر از تلفات ویسکوزیته در معادله انرژی باعث بروز خطا می‌شود.

^۱ K. Hooman

^۲ S. Mahmud & R. A. Fraser

^۳ B. S. Y & M. Pakdemiri

^۴ L. Y. Tan & G. M. Chen

^۵ Bejan number

اسکاندون^۱ [۵۰] به صورت تحلیلی و شمشیری^۲ [۵۱] و همکارانش به صورت عددی، در جریان الکترواسموتیک برای سیال پاورلا بین دو صفحه موازی و میکروکانال دایروی به بررسی تولید انتروپی پرداخته و اثرات پارامترهای مرتبط با تولید انتروپی را نیز مورد تحلیل قرار داده‌اند.

۱-۳-۱ معرفی تحقیق حاضر و تعریف مساله

همان طور که مشاهده شد مشخص می‌باشد که برای یک میکروکانال دایروی تحت شرایط مرزی شار ثابت و دما ثابت برای جریان سیال پاورلا، انتقال حرارت در فرایند گرمایش و سرمایش و هم‌چنین تولید انتروپی، با جزئیات مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این پروژه به بررسی مفصل انتقال حرارت و تولید انتروپی برای جریان سیال پاورلا در یک میکروکانال دایروی که تحت شرایط مرزی شار ثابت و دما ثابت قرار دارد، در دو حالت عدم وجود لغزش در دیواره و وجود لغزش در دیواره خواهیم پرداخت.

۱-۳-۲ فرضیات و اهداف پژوهش

با استفاده از سیالات غیر نیوتنی همانند پاورلا به جای سیالات رایج مانند هوا، آب و روغن می‌توان راندمان سیستم خنک‌کاری را افزایش داد. در این پژوهش قصد داریم یک میکروکانال دایروی که جزئی از یک شبکه هیت سینک حرارتی می‌باشد را در نظر بگیریم که تحت شرایط مرزی شار ثابت قرار دارد و در ادامه به بررسی انتقال حرارت و تولید انتروپی سیال غیر نیوتنی پاورلا در آن بپردازیم و نتایج به دست آمده را با نتایج سیال نیوتنی مقایسه کرده تا مشخص شود راندمان ترمودینامیک سیستم مربوط به هیت سینک مورد نظر برای کدام نوع سیال بیشتر می‌باشد.

فرضیات در نظر گرفته شده برای این پژوهش عبارتند از جریان آرام، پایدار، تراکم ناپذیر، توسعه یافته هیدرولیکی و حرارتی، وجود تلفات ویسکوزیته در دیواره، وجود و عدم وجود لغزش سیال روی دیواره و خواص ثابت سیال.

^۱ J. Escandon

^۲ M. Shamshiri

در فصل بعد به بررسی معادلات و پارامترهای حاکم بر مساله پرداخته و روابط مورد نیاز برای تحلیل مساله را به دست خواهیم آورد. سپس در دو فصل جداگانه به تحلیل نتایج در دو حالت وجود و عدم وجود لغزش در دیواره خواهیم پرداخت. در انتها نیز به نتیجه گیری از پژوهش و ارائه پیشنهادات برای ادامه بررسی ها در این زمینه پرداخته خواهد شد.

فصل دوم

۲ معادلات حاکم و شرایط مرزی

- میدان سرعت
- میدان دما
- تولید انترپی

در این فصل به معرفی و ساده سازی روابط حاکم بر مساله و معرفی پارامترهای بی بعد پرداخته می شود. در این فصل، با فرض جریان آرام، پایدار و تراکم ناپذیر سیال غیر نیوتنی پاورلا با خواص ثابت در یک میکروکانال دایروی در ناحیه کاملاً توسعه یافته که تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد، در دو حالت عدم وجود لغزش و وجود لغزش سیال روی دیواره میکروکانال پرداخته شده است.

۱-۲ میدان سرعت

ابتدا معادله پیوستگی را برای مختصات استوانه ای می نویسیم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho V_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0 \quad (1-2)$$

با توجه به این که اشاره شد مساله ما پایدار می باشد و جریان تراکم ناپذیر می باشد، بنابراین عبارت مشتق نسبت به زمان از معادله بالا حذف می شود و همچنین به دلیل اینکه جریان در یک میکروکانال دایروی قرار دارد، بنابراین جریان یک بعدی است که فقط در راستای محوری میکروکانال جریان دارد، هم چنین با توجه به تقارن محوری، تغییرات سرعت در راستای محوری نداریم در نتیجه می توان معادله (۱-۲) را به صورت زیر ساده کرد:

$$r V_r = cte \quad (2-2)$$

با توجه به معادله بالا و این که در $r = r_0$ مقدار $V_r = 0$ می باشد، در نتیجه با استفاده از این شرط مرزی برای جریان داخل میکروکانال $V_r = 0$ می باشد. اکنون معادلات مومنوم در مختصات استوانه ای در سه جهت می نویسیم:

$$\rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (3-2)$$

$$+ \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \tau_{\theta r} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zr} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right] + \rho g_r$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (4-2)$$

$$+ \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \tau_{\theta\theta} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{z\theta} + \frac{\tau_{\theta r} - \tau_{r\theta}}{r} \right] + \rho g_\theta$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (5-2)$$

$$+ \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \tau_{\theta z} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right] + \rho g_z$$

که در این روابط، عبارت τ بیانگر تنش برشی بین سیال در جهات مختلف می‌باشد و p هم فشار سیال داخل میکروکانال می‌باشد. همانطور که پیش تر اشاره شد، در میکروکانال فقط سرعت محوری داریم و نتایجاً فقط تنش برشی τ_{rz} داریم. هم چنین لازم به ذکر می‌باشد که از اثر جاذبه داخل میکروکانال صرف نظر شده است. بنابراین پس از ساده سازی معادلات بالا به رابطه زیر برای مومنتوم می‌رسیم:

$$\frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) = -r \frac{\partial p}{\partial z} \quad (6-2)$$

برای سیالات غیر نیوتنی پاولا، معادله تنش به صورت زیر نوشته می‌شود [۹]:

$$\tau_{rz} = m \left(-\frac{dV_z}{dr} \right)^n \quad (7-2)$$

در رابطه (۷-۲)، m عبارت است از ضریب ثبات^۱ سیال و n شاخص سیال^۲ پاورلا می‌باشد که دو پارامتر تجربی می‌باشند و n مشخص کننده نوع رفتار سیال می‌باشد به طوریکه اگر مقدار آن بین صفر تا یک باشد، سیال را سودوپلاستیک و در صورتی که مقدار آن برابر یک باشد سیال را نیوتنی نیوتنی و اگر بیشتر از یک باشد، سیال را دایلاتنت می‌نامند.

^۱ Consistency factor

^۲ Power-law index

برای حل معادله مومنتوم ابتدا باید رابطه (۷-۲) را در معادله (۶-۲) جایگذاری کنیم و سپس معادله مومنتوم را بی‌بعد سازی کنیم، اما قبل از بی‌بعد سازی معادله مومنتوم ابتدا توضیحاتی در خصوص نوع سرعت لغزش در نظر گرفته شده در دیواره می‌دهیم.

۱-۱-۲ بررسی پارامترهای بی‌بعد در وجود و عدم وجود لغزش در دیواره

در این قسمت به توضیح برخی شرایط مرزی در مورد لغزش سیال روی دیواره پرداخته می‌شود.

یکی از این شرایط، تعریف بر اساس تنش برشی می‌باشد [۱۲]، که مطابق این شرط، سرعت لغزش سیال روی دیواره میکروکانال به صورت $V_s = \beta \tau_{xy}$ تعریف می‌شود که این شرط به طور عمده برای سیالات نیوتنی صادق است که در آن τ_{xy} تنش وارده به سیال از طرف دیواره بوده و β نیز به عنوان ضریب لغزش^۱ تعریف می‌شود که پس از بی‌بعد سازی این شرط، دیمانسیون مربوط به این

$$\text{پارامتر برابر } \left(\frac{m^2 s}{kg} \right) \text{ خواهد بود.}$$

شرط دیگر که می‌توان آن را برای تمامی سیالات نیز به کار 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 [۵۲].

$$u_w = \begin{cases} K_{H1} \text{Sinh}(\pm K_{H2} \tau_{xy,y} - \tau_c) , & |\tau_{xy}| \geq \tau_c \\ 0 , & |\tau_{xy}| \leq \tau_c \end{cases} \quad (۸-۲)$$

^۱ Slip coefficient

^۲ Non-linear boundary condition

که در رابطه بالا τ_c تنش بحرانی می باشد که در این حالت، با رسیدن به این تنش، سیال دارای لغزش روی دیواره خواهد بود. هم چنین ضرایب K_H به عنوان ضرایب اصطکاک دیواره مورد نظر می باشد که در بررسی های عددی می توان از این شرط بهره برد.

شرط دیگر لغزش روی دیواره یک شرط مرزی عمومی^۱ برای سرعت لغزش سیال روی دیواره میکروکانال ها می باشد و برای تمامی سیالات از جمله نیوتنی و غیر نیوتنی صادق می باشد، تعریف بر اساس نرخ برش می باشد که در این جا برای میکروکانال دایروی به صورت زیر بیان می شود:

$$V_s - V_w = -l \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (9-2)$$

که در آن V_w و V_s به ترتیب سرعت لغزش سیال روی دیواره میکروکانال و سرعت دیواره می باشد. هم چنین l نیز طول لغزش می باشد که به عنوان فاصله مجازی از دیواره میکروکانال تا مکانی است که سرعت در آن نقطه صفر می باشد. شایان ذکر است در این مساله از این شرط مرزی عمومی به عنوان شرط حاکم برای سرعت لغزش سیال روی دیواره میکروکانال استفاده شده است که با توجه به ثابت بودن دیواره میکروکانال، مقدار V_w صفر می باشد. در این نوع شرط مرزی β به عنوان ضریب لغزش تعریف شده و به صورت زیر، نسبت سرعت لغزش سیال روی دیواره به سرعت متوسط سیال داخل میکروکانال می باشد:

$$\beta = \frac{V_s}{V_m} \quad (10-2)$$

هم چنین طول لغزش بی بعد نیز به صورت نسبت طول لغزش به شعاع میکروکانال تعریف شده

است:

^۱ General boundary condition

$$L = \frac{l}{r_o} \quad (11-2)$$

با توجه به توضیحات داده شده برای سرعت لغزش در دیواره، ابتدا شرایط مرزی هیدرولیکی

مساله را در دو حالت عدم لغزش در دیواره و وجود لغزش در دیواره، به صورت ذیل در نظر می‌گیریم:

$$r = 0, \frac{\partial V_z}{\partial r} = 0 \quad (12-2)$$

$$r = r_o, V_z = 0$$

$$r = 0, \frac{\partial V_z}{\partial r} = 0 \quad (13-2)$$

$$r = r_o, V_z = V_s$$

معادله (12-2) مربوط به حالت عدم لغزش در دیواره می‌باشد که سرعت در دیواره صفر

می‌باشد و رابطه (13-2) برای حالتی می‌باشد که سیال چسبیده به دیواره دارای یک سرعت مبنا

می‌باشد که به آن سرعت لغزش می‌گوییم و با V_s نمایش داده می‌شود.

برای بی‌بعد سازی معادله (2-6) از کمیت‌های بی‌بعد زیر استفاده می‌کنیم:

$$R = \frac{r}{r_o}, Z = \frac{z}{r_o}, V = \frac{V_z}{V_m}, P = \frac{p}{\rho V_m^2}, \quad (14-2)$$

$$Re = \frac{\rho V_m^{2-n} D_h^n}{m}$$

عدد رینولدز^۱ هم برای سیالات غیر نیوتنی پاورلا به صورت بالا تعریف می‌شود. هم‌چنین عدد

رینولدز بحرانی برای سیال پاورلا به صورت زیر می‌باشد که برای سیال نیوتنی برابر ۲۰۹۹/۲۴۵

می‌باشد [۹]:

^۱ Reynolds number

$$Re_c = \frac{6464n}{(3n+1)^2} (2+n)^{\left(\frac{2+n}{1+n}\right)} \quad (15-2)$$

۲-۱-۲ میدان سرعت در شرایط عدم لغزش در دیواره

با استفاده از رابطه (۱۴-۲) فرم بدون بعد معادله (۶-۲) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d}{dR} \left(R \left(-\frac{dV}{dR} \right)^n \right) = -Re R \frac{\partial P}{\partial Z} \quad (16-2)$$

شرایط مرزی هیدرولیکی بی‌بعد مساله را با فرض عدم لغزش در دیواره، با استفاده از رابطه

(۱۴-۲) می‌توان به صورت ذیل نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dR} (R=0) &= 0 \\ V(R=1) &= 0 \end{aligned} \quad (17-2)$$

پس از دو بار انتگرالگیری از رابطه (۱۶-۲) و با استفاده از شرایط مرزی موجود در معادله

(۱۷-۲)، پروفیل بی‌بعد توزیع سرعت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(-\frac{Re}{2} \frac{\partial P}{\partial Z} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - R^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (18-2)$$

همان طور که از رابطه (۱۸-۲) مشخص می‌باشد، معادله توزیع سرعت بی‌بعد بر اساس عدد

رینولدز و گرادیان بی‌بعد فشار به دست آمده. برای این که این دو عبارت رو حذف کنیم از تعریف

سرعت متوسط استفاده می‌کنیم، بدین صورت که با فرض این که دبی داخل میکروکانال ثابت

می‌باشد، با متوسط گیری از معادله توزیع سرعت بی‌بعد در سطح مقطع لوله داریم:

$$V_m = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} V_z dA_c \quad (19-2)$$

با استفاده از رابطه (۲-۱۴) و جایگذاری آن در رابطه بالا داریم:

$$\int_0^1 VRdR = \frac{1}{2} \quad (2-20)$$

حال می‌توان با جایگذاری معادله توزیع سرعت بی‌بعد در رابطه (۲-۲۰) و انتگرالگیری از آن،

عبارت گرادیان فشار بی‌بعد را می‌توان به صورت ذیل به دست آورد:

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = -2\text{Re} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \quad (2-21)$$

همان‌طور که از معادله (۲-۲۱) مشخص می‌باشد عبارت گرادیان فشار بی‌بعد بر اساس عدد

رینولدز و شاخص جریان پاورلا به دست آمده، سپس با جایگذاری این رابطه در معادله (۲-۱۸)،

توزیع سرعت بی‌بعد برای حالت عدم لغزش در دیواره به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$V = \frac{3n+1}{n+1} \left(1 - R^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (2-22)$$

هم‌چنین ماکزیمم سرعت جریان داخل میکروکانال در مرکز آن رخ می‌دهد که به صورت زیر

بیان می‌شود:

$$V_{\max} = \frac{3n+1}{n+1} \quad (2-23)$$

در رابطه (۲-۲۲) اگر n را یک قرار دهیم، پروفیل سرعت برای سیالات نیوتنی به دست

خواهد آمد.

۳-۱-۲ میدان سرعت در شرایط وجود لغزش در دیواره

برای به دست آوردن توزیع سرعت در شرایطی که لغزش در دیواره وجود دارد باید از شرایط

مرزی هیدرولیکی مساله با در نظر گرفتن لغزش در دیواره که به صورت زیر می‌باشد استفاده کنیم:

$$V(R=1) = \beta$$

$$\frac{dV}{dR}(R=0) = 0 \quad (24-2)$$

برای به دست آوردن توزیع سرعت بی بعد با فرض لغزش در دیواره میکروکانال، پس از حل

معادله (۱۶-۲) داریم:

$$V = -R^{\frac{n+1}{n}} \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(-\frac{Re}{2} \frac{\partial P}{\partial Z} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(C_1 \frac{\left(\frac{1}{R} \right)^{n-1}}{n-1} \right) + C_2 \quad (25-2)$$

برای به دست آوردن ثابت های معادله (۲۵-۲)، از رابطه (۲۴-۲) استفاده می کنیم و پروفیل

توزیع سرعت بی بعد بر حسب عدد رینولدز و گرادیان فشار بی بعد به صورت زیر به دست می آید.

$$V = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(-\frac{Re}{2} \frac{\partial P}{\partial Z} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - R^{\frac{n+1}{n}} \right) + \beta \quad (26-2)$$

مانند حالت قبل در اینجا هم با متوسط گیری از پروفیل سرعت بی بعد، گرادیان فشار بی بعد را

به صورت زیر به دست می آوریم:

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = -\frac{2}{Re} \left(\frac{3n+1}{n} (1-\beta) \right)^n \quad (27-2)$$

سپس با جایگذاری رابطه (۲۷-۲) در معادله (۲۶-۲)، پروفیل سرعت بی بعد جریان با فرض

لغزش در دیواره به صورت زیر به دست می آید:

$$V = \frac{3n+1}{n+1} (1-\beta) \left(1 - R^{\frac{n+1}{n}} \right) + \beta \quad (28-2)$$

ماکزیم سرعت جریان، با فرض وجود لغزش در دیواره در مرکز میکروکانال به صورت زیر

حاصل می‌شود:

$$V = \frac{3n+1}{n+1}(1-\beta) + \beta \quad (29-2)$$

برای به دست آوردن ضریب بی بعد لغزش β ، با استفاده از تعریف سرعت لغزش، معادله (۹-۲) و (۱۰-۲) مقدار ضریب بی بعد لغزش را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\beta = -L \left(\frac{dV}{dR} \right)_{R=1} = \frac{L(3n+1)}{n+L(3n+1)} \quad (30-2)$$

با استفاده از رابطه (۳۰-۲) می‌توان معادله توزیع سرعت بی بعد را بر حسب طول بی‌بعد لغزش نیز نوشت:

$$V = \frac{3n+1}{n+1} \left[\frac{n \left(1 - R^{\frac{n+1}{n}} \right)}{n+L(3n+1)} \right] + \frac{L(3n+1)}{n+L(3n+1)} \quad (31-2)$$

۲-۱-۴ تعیین عدد پوآزی^۱

عدد پوآزی که یک عدد بی‌بعد می‌باشد و از حاصل ضرب بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز به دست می‌آید و نشان دهنده مقاومت بین سیال و دیواره میکروکانال می‌باشد را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$Po = f Re \quad (32-2)$$

در رابطه بالا f را ضریب اصطکاک داری می‌نامند و طبق [۵۳] به صورت زیر تعریف می‌شود:

^۱ Poiseuille number

$$f = \frac{2\tau_w}{\rho V_m^2} \quad (33-2)$$

پس از جایگذاری رابطه (۷-۲) در رابطه بالا و بی بعد کردن گرادیان سرعت و همچنین استفاده از معادله (۱۴-۲) به عنوان تعریف عدد رینولدز، می توان عدد پوآزی را به صورت زیر برای سیال پاورلا به دست آورد:

$$Po = 2^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n} (1-\beta) \right)^n \quad (34-2)$$

۲-۲ تعیین میدان دمایی

فرایندهای انتقال حرارت در بسیاری از زمیته های صنعتی نقش بسزایی دارد، بنابراین تحلیل توزیع دما در بسیاری از فرایندها ضروری می باشد.

برای جریان توسعه یافته حرارتی با خواص ثابت، تحت شار حرارتی ثابت از طرف دیواره، معادله انرژی در مختصات استوانه ای مطابق [۵۴] به شکل کلی زیر بیان می شود:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial q_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] - \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_p \frac{Dp}{Dt} - (\tau : \nabla V) \quad (35-2)$$

در رابطه بالا ρ چگالی سیال، T دمای مطلق سیال، c_p ضریب گرمای ویژه سیال در فشار ثابت، q_r, q_θ, q_z به ترتیب، انتقال حرارت هدایتی سیال بر واحد سطح در راستاهای شعاعی و محوری می باشد و هم چنین آخرین عبارت سمت راست رابطه (۳۵-۲) بیان گر تلفات ویسکوزیته در داخل میکروکانال می باشد. با توجه به این که اثر هدایت در راستای θ با توجه به شرایط مساله که شار ثابت می باشد صفر می شود و هدایت های محوری و شعاعی و هم چنین عبارت تلفات ویسکوزیته به صورت زیر نوشته می شود:

$$q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (36-2)$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (37-2)$$

$$\begin{aligned} \tau : \nabla V = ([\tau \cdot \nabla] \cdot V) = & \tau_{rr} \left(\frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \tau_{r\theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta}{r} \right) \\ & + \tau_{rz} \left(\frac{\partial V_r}{\partial z} \right) + \tau_{\theta r} \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial r} \right) + \tau_{\theta\theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} \right) + \tau_{\theta z} \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) \\ & + \tau_{zr} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \tau_{z\theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} \right) + \tau_{zz} \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (38-2)$$

در روابط بالا k ضریب هدایت سیال می‌باشد. با جایگذاری روابط (۳۶-۲) و (۳۷-۲) در معادله (۳۵-۲) و با توجه به اینکه فقط سرعت محوری در داخل میکروکانال می‌باشد، پس از ساده شدن رابطه (۳۸-۲) و جایگذاری آن در معادله (۳۵-۲)، معادله انرژی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\rho C_p V_z r \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + rm \left(-\frac{dV}{dr} \right)^{n+1} \quad (39-2)$$

۱-۲-۲ تعیین توزیع دمای سیال در حالت عدم لغزش

معادله (۳۹-۲) یک معادله با مشتقات جزئی می‌باشد، ولی با توجه به شرط مرزی شار ثابت،

گرادیان دمای محوری ثابت می‌باشد و بر اساس [۵۵] می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{dT_m}{dz} \quad (40-2)$$

در این رابطه T_m دمای میانگین (بالک) سیال می‌باشد که مطابق [۵۵] برای یک میکروکانال

استوانه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_m = \frac{2}{r_o^2 V_m} \int_0^{r_o} V_z T r dr \quad (41-2)$$

شرایط مرزی دمایی برای حالت شار ثابت نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} &= 0 \\ \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_o} &= q'' \end{aligned} \quad (42-2)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۳۹-۲) در سطح مقطع میکروکانال و استفاده از روابط (۲۲-۲)، (۴۰-۲)، (۴۱-۲) و (۴۲-۲)، می‌توان گرادیان دمای محوری که برابر گرادیان دمای متوسط محوری می‌باشد را برای حالتی که در دیواره لغزش نداریم به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{dT_m}{dz} = \frac{2}{\rho C_p V_m r_o^2} \left(q'' r_o + m \left[\frac{V_m}{r_o} \right]^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n r_o^2 \right) \quad (43-2)$$

که در این رابطه q'' شار حرارتی وارد بر دیواره می‌باشد. حال با جایگزین کردن رابطه (۴۳-۲) در رابطه (۳۹-۲) به رابطه زیر دست پیدا می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \frac{2V_z}{V_m r_o^2} \left(q'' r_o + m \left[\frac{V_m}{r_o} \right]^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n r_o^2 \right) &= \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ + m \left(-\frac{dV}{dr} \right)^{n+1} & \end{aligned} \quad (44-2)$$

برای حل معادله بالا ابتدا باید معادله فوق را بی‌بعد سازی کنیم، از همین رو کمیت‌های بی‌بعد

زیر را معرفی می‌کنیم:

$$\theta = \frac{T - T_w}{\frac{q'' D_h}{k}} \quad (45-2)$$

$$Br = \frac{m D_h \left(\frac{V_m}{D_h} \right)^{n+1}}{q''}$$

در این رابطه θ دمای بی بعد سیال، T_s دمای سیال چسبیده به دیواره و D_h قطر هیدرولیکی میکروکانال می باشد، هم چنین Br ^۱ که به عنوان عدد بیرینکمن شناخته می شود، نشان دهنده نسبت، گرمای تولید شده توسط تلفات ویسکوزیته به گرمای پخش شده به وسیله انتقال حرارت هدایت در راستای شعاعی می باشد، که در ادامه به معرفی آن خواهیم پرداخت. با استفاده از روابط (۱۴-۲) و (۴۵-۲)، بی بعد شده معادله (۴۴-۲) را می توان به صورت ذیل نوشت:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) = V \left(1 + 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \right) - \left(2^{n-1} Br \left(\frac{3n+1}{n} \right)^{n+1} R^{n+1} \right) \quad (46-2)$$

شرایط مرزی دمایی بی بعد به صورت زیر تعریف می شود:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right)_{R=0} = 0 \quad (47-2)$$

$$\theta(R=1) = 0$$

با دو بار انتگرالگیری از رابطه (۴۶-۲) و استفاده از شرایط مرزی فوق، پروفیل توزیع دمای

بی بعد برای حالتی که لغزش در دیواره نداریم به صورت زیر به دست می آید:

^۱ Brinkman number

$$\theta(R) = \frac{3n+1}{n+1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{R^2}{4} \left(1 + 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \right) - \\ R^{\frac{3n+1}{n}} \left(\frac{n}{3n+1} \right)^2 \left(1 + 2^{n-1} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^{n+1} \right) + \\ 2^{n-1} Br \left(\frac{3n+1}{n} \right)^{n-2} \left(\frac{n+1}{n} \right) - \\ \left(\frac{1}{4} - \left(\frac{n}{3n+1} \right)^2 \right) \left(1 + 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \right) \end{array} \right. \quad (48-2)$$

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

لازم به ذکر می‌باشد که در حالتی که سیال در دیواره دارای لغزش باشد، پرش دمایی نیز ممکن است وجود داشته باشد ولی در مساله ما پرش دمایی وجود ندارد که در ادامه به توضیح آن خواهیم پرداخت.

معادله (۴۸-۲)، توزیع دمای بی‌بعد را برای حالتی که در دیواره لغزش نداریم نشان می‌دهد، اما برای به دست آوردن پروفیل دمای بی‌بعد با در نظر گرفتن لغزش در دیواره، روند حل مانند حالت بدون لغزش می‌باشد، بنابراین ابتدا گرادیان دمای محوری را مانند حالت قبل با استفاده از روابط (۲۸-۲)، (۴۱-۲) و (۴۲-۲) و انتگرالگیری از رابطه (۳۹-۲)، به صورت ذیل به دست می‌آوریم:

$$\frac{\partial T_m}{\partial z} = \frac{2}{pc_p r_o^2 V_m} \left(q'' r_o + m (V_m (1-\beta))^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n r_o^{1-n} \right) \quad (49-2)$$

سپس مانند حالت قبل با جایگذاری رابطه (۴۹-۲) در معادله (۳۹-۲) داریم:

$$\frac{2V_z}{r_o^2 V_m} \left(q'' r_o + m (V_m (1-\beta))^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n r_o^{1-n} \right) = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + m \left(-\frac{dV}{dr} \right)^{n+1} \quad (50-2)$$

پس از بی بعد سازی رابطه (50-2)، معادله فوق به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) = V \left(1 + 2^n Br (1-\beta)^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \right) - \left(2^{n-1} Br (1-\beta)^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^{n+1} R^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (51-2)$$

با حل معادله بالا و استفاده از شرایط مرزی معادله (2-47)، معادله توزیع سرعت بی بعد به

صورت ذیل به دست می‌آید:

$$\theta(R) = \left(\begin{array}{c} \left[\frac{R^2}{4} \left(\frac{3n+1}{n+1} (1-\beta) + \beta \right) - \frac{n^2 (1-\beta)}{(n+1)(3n+1)} R^{\frac{3n+1}{n}} - \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) (1-\beta) \right] \\ \left[\frac{1}{4} - \left(\frac{n}{3n+1} \right)^2 - \frac{\beta}{4} \right] \\ + \left(2^{n-1} Br (1-\beta)^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^{n-1} \left(1 - R^{\frac{3n+1}{n}} \right) \right) \end{array} \right) \quad (52-2)$$

۳-۲-۲ تحلیل شرط مرزی عدم وجود پرش دمایی در مایعات

با توجه به این که سیالات به دو بخش گازها و مایعات طبقه بندی می‌شوند، اعمال شرط

مرزی پرش دمایی برای آن‌ها متفاوت می‌باشد. با توجه به متفاوت بودن فاصله بین مولکول‌های گاز

در حالات مختلف، پارامتری به عنوان عدد نادسن برای گازها تعریف می‌شود که بیانگر نسبت فاصله

بین مولکول‌های گاز به طول مشخصه‌ای از هندسه مورد بررسی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Kn = \frac{\lambda}{D_h} \quad (۵۳-۲)$$

با توجه به بازه‌های مختلف تعریف شده برای این پارامتر می‌توان شرط لغزش و یا عدم لغزش برای گازها روی دیواره را در هر مساله‌ای تعیین نمود و با توجه به روابط تعیین شده برای سرعت لغزش و پرش دما در هندسه مورد نظر به بررسی مساله پرداخت [۵۶، ۵۷].

اما عدد نادسن برای مایعات تعریف نشده و این پارامتر فقط برای گازها معتبر می‌باشد. زیرا که با توجه به نزدیکی مولکول‌ها در مایعات، می‌توان مایعات را محیطی پیوسته در نظر گرفت که دمای سیال چسبیده به دیواره را می‌توان با دمای دیواره برابر فرض کرد و به این ترتیب از شرط پرش دمایی برای مایعات می‌توان صرف نظر کرد [۳۴].

محققان هم اکنون در حال بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی این موضوع و یافتن رابطه‌ای معتبر برای پرش دمایی در مایعات می‌باشند.

[۱۰] 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 در نظر گرفته شده برای هر مایع خاص، از این شرط مرزی استفاده کرد که در رابطه زیر آمده:

$$T_f - T_w = l_k \left(\frac{\partial T}{\partial x_n} \right) \quad (۵۴-۲)$$

در این رابطه T_w و T_f به ترتیب دمای مایع چسبیده به دیواره و دمای دیواره می‌باشد و l_k

^۱ Prandtl number

طول مقاومت حرارتی سطحی دیواره^۱ یا طول کاپیتزا^۲ نامیده می‌شود که به صورت نسبت طول لغزش به عدد پرنتل تعریف شده است و نشان دهنده فاصله بین خلل و فرج روی دیواره جامد بوده که باعث تفاوت بین دمای سیال روی دیواره و دمای دیواره می‌شود:

$$l_k \approx \frac{l}{Pr} \quad (۵۵-۲)$$

بنابراین در بررسی‌های عددی برای مایعات، در صورت تفاوت قائل شدن بین دمای مایع چسبیده به دیواره و دیواره، می‌توان از رابطه (۵۴-۲) به عنوان شرط مرزی تعمیم یافته استفاده کرد و واضح می‌باشد 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 برابر دانست.

۴-۲-۲ بررسی عدد برینکمن

در شرایط دمایی شار ثابت عدد برینکمن به صورت معادله (۴۵-۲)، تعریف می‌شود که بیان‌کننده گرمای تولید شده ناشی از تلفات ویسکوزیته به گرمای منتقل شده به سمت سیال توسط انتقال حرارت هدایتی می‌باشد. در حقیقت در حالت وجود تلفات ویسکوزیته در دیواره، با تبدیل انرژی جنبشی سیال به انرژی حرارتی، این اثر مانند یک منبع گرمای داخلی عمل کرده که باعث افزایش گرمای رسیده به سیال و در نتیجه افزایش دمای متوسط سیال خواهد شد. از طرف دیگر با توجه به این که اثر این گرما در نواحی نزدیک دیواره مهم می‌باشد، در شرایط شار ثابت دمای دیواره افزایش پیدا می‌کند ولی در شرایط دما ثابت، تأثیری روی دمای دیواره نخواهد داشت.

۱-۴-۲-۲ تعیین برینکمن بحرانی در شرایط عدم وجود لغزش در دیواره

زمانی که عدد برینکمن مقدار منفی داشته باشد، با توجه به رابطه (۴۵-۲) به این معنی است

^۱ Interfacial thermal resistance length

^۲ Kapitza length

که علامت شار حرارتی منفی می‌باشد یا به عبارت دیگر؛ شار سرمایشی به سطح وارد می‌شود، در این حالت زمانی که دمای متوسط سیال به دمای دیواره برسد عملاً انتقال حرارتی بین سیال و دیواره وجود ندارد و نتایجاً توزیع دمای بی بعد به صفر میل می‌کند که با توجه به معادله (۶۲-۲) که در جلوتر آمده است، مقدار عدد ناسلت به مثبت یا منفی بی‌نهایت میل می‌کند، حال برای به دست آوردن برینکمنی که در آن عدد ناسلت به بی‌نهایت میل می‌کند کافی است عبارت $Nu \rightarrow \pm\infty$ را حل کنیم، ابتدا برای معادله (۶۳-۲) این حد را حل می‌کنیم که به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$Br_c = \frac{31n^2 + 12n + 1}{(15n^2 + 8n + 1) \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n 2^n} \quad (۵۶-۲)$$

۲-۴-۲-۲ تعیین برینکمن بحرانی با وجود لغزش در دیواره

برای به دست آوردن عدد برینکمن بحرانی برای حالتی که لغزش در دیواره وجود دارد کافی است معادله (۶۴-۲) را به سمت بی‌نهایت میل دهیم، که در اینصورت داریم:

$$Br_c = \frac{4n^2\beta^2 - 20n^2\beta - 4n\beta + 31n^2 + 12n + 1}{\left(4n^2\beta^3 - 20n^2\beta^2 + 31n^2\beta - 4n\beta^2 + \right) 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n} \quad (۵۷-۲)$$

۵-۲-۲ بررسی عدد ناسلت^۱ در شرایط عدم وجود لغزش

یکی از مهم ترین پارامترهای بی‌بعد در تحلیل فرایندهای که انتقال حرارت در آن انجام می‌شود، عدد ناسلت می‌باشد که بیان کننده نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی می‌باشد.

برای به دست آوردن عدد ناسلت از رابطه زیر داریم:

^۱ Nusselt number

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (58-2)$$

در این رابطه h ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌باشد که با استفاده از شرط مرزی (۲-۴۲) و رابطه (۲-۴۵)، ضریب انتقال حرارت جابجایی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_m)} \quad (59-2)$$

با جایگذاری رابطه (۲-۵۹) در (۲-۵۸) عدد ناسلت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Nu = \frac{q''D_h}{k(T_w - T_m)} \quad (60-2)$$

در این رابطه برای به دست آوردن عبارت $(T_w - T_m)$ ، از تعریف دمای متوسط (رابطه (۲-۴۴)) استفاده می‌کنیم و پس از بی بعد سازی می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$T_w - T_m = -\frac{2q''D_h}{k} \int_0^1 V\theta R dR \quad (61-2)$$

با جایگذاری معادله (۲-۶۱) در رابطه (۲-۶۰)، عدد ناسلت برای شرایط شار ثابت، به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$Nu = \frac{-1}{2 \int_0^1 V\theta R dR} \quad (62-2)$$

با جایگذاری توزیع دمای بی بعد و توزیع سرعت بی بعد برای شرایط عدم لغزش در دیواره و محاسبه انتگرال فوق توسط نرم افزار maple15، عدد ناسلت برای شرایط مرزی شار ثابت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Nu = \frac{8(n+1)^2(15n^2+8n+1)}{\left(\begin{aligned} &31n^4 + 1 + 5n^4 2^n Br\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n + 38n^3 2^n Br\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n + 74n^3 + \\ &32n^2 2^n Br\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n + 56n^2 + 14n + 10n 2^n Br\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n \\ &+ 2^n Br\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n + 1 \end{aligned} \right)} \quad (۶۳-۲)$$

۶-۲-۲ تعیین عدد ناسلت در شرایط وجود لغزش

برای به دست آوردن عدد ناسلت با فرض وجود لغزش در دیواره برای شرایط شار ثابت، بایستی با جایگذاری توزیع دما و سرعت بی بعد در رابطه (۶۲-۲)، عدد ناسلت برای حالتی که در دیواره لغزش داریم را به دست آورد که به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$Nu = \frac{8(n+1)^2(15n^2+8n+1)}{\left(\begin{aligned} &1+14n+2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n + 28\beta^2 n^2 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n \\ &-14\beta n Br 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n - 28n^2\beta - 20n^4\beta + \\ &15n^4 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n + 38n^3 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n \\ &+10n 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n + 32n^2 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n - \\ &2^n Br \beta \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n + 56n^2 + 74n^3 + 31n^4 + 4n^4\beta^2 \\ &+8n^3\beta^2 + 4n^2\beta^2 - 4n\beta - 44n^3\beta - 4n^2 2^n \beta^3 Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n \\ &-56\beta Br n^2 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n + 4\beta^2 Br n 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n - \\ &4n^4\beta^3 Br 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n - 8n^3\beta^3 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n \\ &+44\beta^2 n^3 Br 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n - 74\beta n^3 Br 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n \\ &-31\beta n^4 Br 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n + 20\beta^2 n^4 Br 2^n \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n (1-\beta)^n \end{aligned} \right)} \quad (۶۴-۲)$$

در رابطه (۶۳-۲) در صورتی که مقدار n را برابر یک قرار دهیم و هم چنین مقدار عدد برینکمن را هم صفر قرار دهیم، مقدار ناسلت برابر $۴/۳۶$ می شود که این مقدار عدد ناسلت جریان توسعه یافته حرارتی با شرط مرزی شار ثابت در داخل میکروکانال دایروی می باشد. لازم به ذکر می باشد که عدد ناسلت برای شرایط مرزی دما ثابت در جلوتر به دست آمده که به آن خواهیم پرداخت.

۳-۲ تعیین انتروپی تولیدی

انتروپی تولیدی کل، شامل انتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت^۱ و انتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک سیال^۲ (تلفات ویسکوزیته سیال) می‌باشد. نرخ انتروپی کل بر واحد حجم به صورت زیر می‌باشد [۳۹].

$$\begin{aligned}\dot{S}_{gen}''' &= \dot{S}_{HT}''' + \dot{S}_{FF}''' = \frac{k}{T^2} (\nabla T)^2 + \frac{\tau_{rz} \left(-\frac{dV_z}{dr} \right)}{T} \\ &= \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 \right] + \frac{m}{T} \left(-\frac{dV_z}{dr} \right)^{n+1}\end{aligned}\quad (۶۵-۲)$$

در رابطه (۶۵-۲)، عبارت اول سمت راست، نرخ انتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت هدایت در راستای محوری و راستای شعاعی می‌باشد و عبارت دوم، نرخ انتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک سیال می‌باشد. برای بی‌بعد کردن نرخ انتروپی تولیدی از کمیت‌های بی‌بعد زیر استفاده می‌کنیم:

$$\begin{aligned}N_s &= \frac{\dot{S}_{gen}''' r_o^2}{k} \\ \psi &= \frac{q'' D_h}{k T_w} \\ Pe &= \frac{\rho c_p V_m D_h}{k}\end{aligned}\quad (۶۶-۲)$$

در این رابطه N_s انتروپی تولیدی بی‌بعد می‌باشد، ψ نشان دهنده شار حرارتی بی‌بعد و Pe هم عدد بی‌بعد پکلت^۳ می‌باشد. برای حالت اول که لغزش در دیواره نداریم، با جایگذاری رابطه (۶۶-۲) در معادله (۶۵-۲) و استفاده از روابط (۱۴-۲)، (۴۳-۲) و (۴۵-۲) می‌توان نرخ انتروپی بی‌بعد را به صورت ذیل نوشت:

^۱ Entropy generation from heat transfer

^۲ Entropy generation from fluid friction

^۳ Peclet number

$$N_s = \frac{1}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)^2} \left[4 \left(\frac{1 + 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}{Pe} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial R}\right)^2 \right] + \frac{2^{n-1} Br}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)} \left(-\frac{dV}{dR}\right)^{n+1} \quad (۶۷-۲)$$

۲-۳-۱ تعیین انتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت

وجود انتقال حرارت در اثر اختلاف دما باعث بروز بازگشت ناپذیری در سیال شده که به صورت

زیر به دست می آید:

$$N_{HT} = \frac{1}{\left(\theta + 1/\psi\right)^2} \left[4 \left(\frac{1 + 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}{Pe} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial R}\right)^2 \right] \quad (۶۸-۲)$$

۲-۳-۲ تعیین انتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک

سهمی از تولید انتروپی در جریان داخلی سیال که ناشی از لزجت سیال و تولید اصطکاک

نزدیک دیواره می باشد که به عنوان بازگشت ناپذیری اصطکاکی بیان می شود و به صورت زیر می باشد:

$$N_{FF} = \frac{2^{n-1} Br}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)} \left(-\frac{dV}{dR}\right)^{n+1} \quad (۶۹-۲)$$

برای حالت دوم، یعنی با در نظر گرفتن لغزش در دیواره با استفاده از روابط (۲-۱۴)، (۲-۴۵)،

(۲-۴۹) و (۲-۶۶) می توان بی بعد شده نرخ انتروپی تولیدی را به صورت زیر بیان کرد:

$$N_s = \frac{1}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)^2} \left[4 \left(\frac{1 + 2^n Br(1-\beta)^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}{Pe} \right)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial R}\right)^2 \right] \quad (70-2)$$

$$+ \frac{Br2^{n-1}}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)} \left(-\frac{dV}{dR}\right)^{n+1}$$

انتروی تولیدی بی بعد مربوط به انتقال حرارت و مربوط به اصطکاک سیال، برای شرایطی که در دیواره لغزش داریم به صورت زیر حاصل می شود:

$$N_{HT} = \frac{1}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)^2} \left[4 \left(\frac{1 + 2^n Br(1-\beta)^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}{Pe} \right)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial R}\right)^2 \right] \quad (71-2)$$

$$N_{FF} = \frac{Br2^{n-1}}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)} \left(-\frac{dV}{dR}\right)^{n+1} \quad (72-2)$$

۳-۳-۲ انتروپی تولیدی متوسط

برای محاسبه انتروپی تولیدی متوسط بی بعد می بایست از انتروپی تولیدی کل در سطح مقطع میکروکانال انتگرال گیری کرد که می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\bar{N}_s = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} N_s dA_c = 2 \int_0^1 N_s R dR \quad (73-2)$$

در معادله بالا می توان با قرار دادن روابط (۶۷-۲) و (۷۰-۲) انتروپی تولیدی متوسط بی بعد را به ترتیب برای حالت عدم لغزش در دیواره و وجود لغزش در دیواره محاسبه نمود. انتگرال فوق به صورت عددی توسط نرم افزار maple15 محاسبه شده است.

۲-۳-۴ تعیین عدد بیژن

عدد بیژن^۱ یک کمیت بی بعد بسیار مهم می باشد که بیانگر نسبت انتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت به انتروپی تولیدی کل می باشد، به عبارت دیگر عدد بیژن نشان دهنده سهم انتروپی تولیدی مربوط به انتقال حرارت در انتروپی تولیدی کل می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$Be = \frac{\dot{S}_{HT}'''}{\dot{S}_{gen}'''} = \frac{N_{HT}}{N_S} \quad (۷۴-۲)$$

با استفاده از روابط (۶۷-۲) و (۶۸-۲) می توان عدد بیژن را برای حالت عدم لغزش در دیواره به دست آورد، و هم چنین با استفاده از روابط (۷۰-۲) و (۷۱-۲) می توان عدد بیژن را برای شرایطی که لغزش در دیواره داریم به دست آورد که به ترتیب به صورت زیر نوشته می شود:

$$Be = \frac{\frac{1}{(\theta + 1/\psi)^2} \left[4 \left(\frac{1 + 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n}{Pe} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right)^2 \right]}{\frac{1}{\left(\theta + \frac{1}{\psi} \right)^2} \left[4 \left(\frac{1 + 2^n Br \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n}{Pe} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right)^2 \right] + \frac{2^{n-1} Br}{\left(\theta + \frac{1}{\psi} \right)} \left(-\frac{dV}{dR} \right)^{n+1}} \quad (۷۵-۲)$$

^۱ Bejan number

$$Be = \frac{N_{HT}}{N_s} = \frac{\frac{1}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)^2} \left[4 \left(\frac{1 + 2^n Br(1-\beta)^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}{Pe} \right)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial R}\right)^2 \right]}{\frac{1}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)^2} \left[4 \left(\frac{1 + 2^n Br(1-\beta)^{n+1} \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}{Pe} \right)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial R}\right)^2 \right] + \frac{Br2^{n-1}}{\left(\theta + \frac{1}{\psi}\right)} \left(-\frac{dV}{dR}\right)^{n+1}} \quad (76-2)$$

۵-۳-۲ تعیین عدد بیژن متوسط

با توجه مهم بودن مقدار متوسط عدد بیژن به دلیل مستقل بودن آن از شرایط مکانی میکروکانال و در نتیجه تحلیل بهتر آن، لازم می‌باشد تا مقدار متوسط عدد بیژن را به دست آورد. برای محاسبه عدد بیژن متوسط می‌بایست بر روی سطح مقطع کانال از عدد بیژن انتگرالگیری شود که می‌توان به صورت ذیل نوشت:

$$\overline{Be} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} Be dA_c = 2 \int_0^1 Be R dR \quad (77-2)$$

در رابطه بالا با قرار دادن معادلات (۷۵-۲) و (۷۶-۲)، به ترتیب می‌توان عدد بیژن متوسط را برای حالت بدون لغزش و حالت وجود لغزش در دیواره، محاسبه نمود. انتگرال فوق نیز توسط نرم افزار maple15 به صورت عددی محاسبه شده است.

فصل سوم

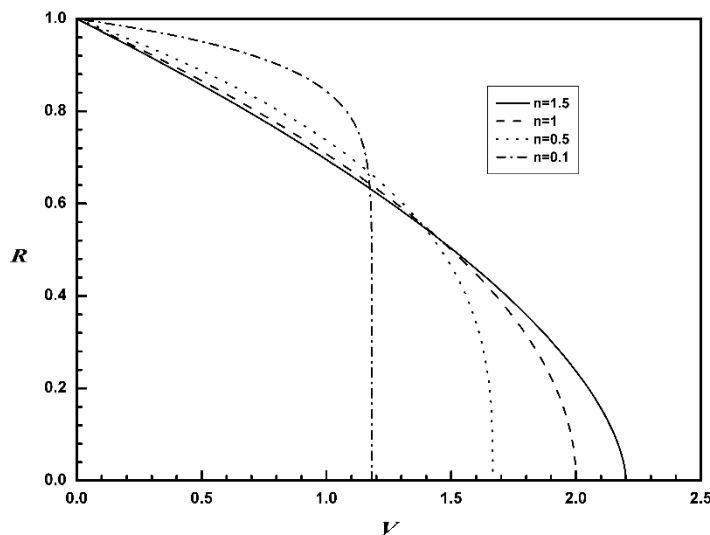
۳ تحلیل جریان سیال داخل میکروکانال با فرض عدم

لغزش در دیواره

- تحلیل میدان سرعت سیال
- تحلیل میدان دمایی سیال
- تحلیل انتروپی تولیدی سیال

۱-۳ تحلیل میدان سرعت

تغییرات سرعت بی بعد در راستای شعاعی میکروکانال، به ازای شاخص‌های مختلف جریان پاورلا، در شکل ۱-۳ رسم شده است. همان طور که مشخص می‌باشد سرعت هسته جریان، با افزایش شاخص جریان افزایش پیدا می‌کند، از این رو سرعت ماکزیمم سیال در میکروکانال برای سیالات دایلاتنت بیشتر از شبه پلاستیک می‌باشد و سرعت هسته جریان برای سیالات نیوتنی، بزرگتر از سیالات شبه پلاستیک و کمتر از سیالات دایلاتنت می‌باشد. اما این رفتار در نزدیک دیواره کاملاً عکس می‌باشد به طوریکه در نزدیکی دیواره با افزایش شاخص جریان، سرعت و گرادیان سرعت کاهش پیدا می‌کند که این به خاطر وجود پایستگی جرم می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت برای سیالات شبه پلاستیک، با کاهش شاخص جریان پاورلا، توزیع سرعت بیشتر به صورت یکنواخت می‌باشد به طوریکه در شاخص‌های نزدیک صفر، تغییرات سرعت تقریباً ناچیز می‌باشد و از همین رو تنش برشی ثابت می‌باشد.



شکل ۱-۳: تغییرات سرعت بی بعد در شاخص‌های مختلف پاورلا

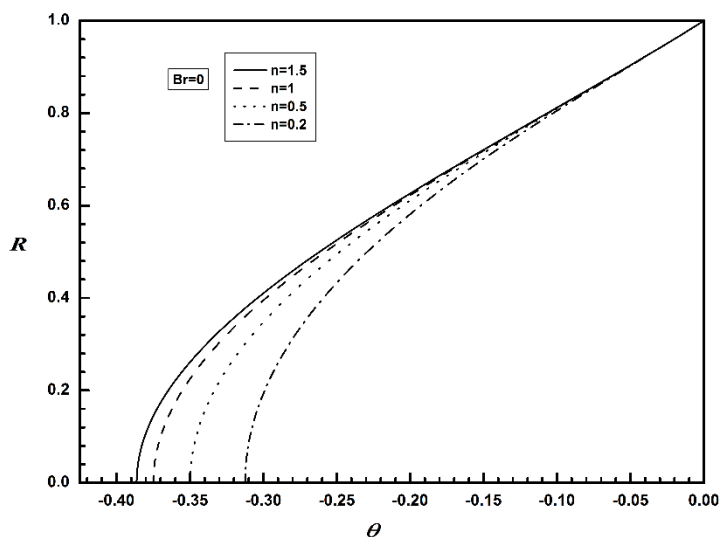
۲-۳ تحلیل میدان دمایی

بررسی میدان دما یکی از مهم‌ترین موارد تحلیل ویژگی‌های سیالات می‌باشد که در این بخش نتایج مربوط به میدان دمایی جریان سیال پاورلا در داخل میکروکانال در دو حالت فرایند

سرمایش و گرمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲-۱ تحلیل دمای بی‌بعد بدون تلفات ویسکوزیته

در حالت اول تغییرات دمای بی‌بعد در داخل میکروکانال را برای حالتی که تلفات ویسکوزیته^۱ در دیواره میکروکانال وجود ندارد مورد بررسی قرار می‌دهیم. همان طور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که دمای بی‌بعد در دیواره برابری صفر دارد که این ناشی از شرط مرزی مساله می‌باشد که، دمای سیال چسبیده به دیواره برابر دمای دیواره می‌باشد. هم چنین هر چه از دیواره میکروکانال به سمت مرکز حرکت می‌کنیم، اختلاف دمای بین سیال و دیواره در حال زیاد شدن می‌باشد، که این علامت منفی دمای بی‌بعد به خاطر کوچک تر بودن دمای سیال از دمای دیواره می‌باشد. از این رو سیال در حال دریافت گرما از سمت دیواره میکروکانال می‌باشد. با افزایش شاخص جریان با توجه به شکل ۳-۱ سرعت و گرادیان سرعت (هسته جریان) افزایش پیدا می‌کند در نتیجه می‌توان گفت با افزایش سرعت سیال، جریان سیال زمان کمتری برای جذب گرما از طرف دیواره داشته در نتیجه اختلاف دمای سیال و دیواره افزایش پیدا می‌کند.



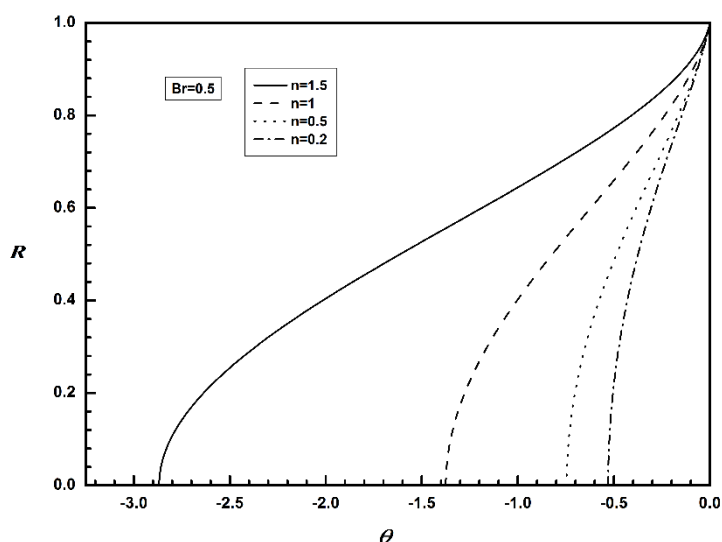
شکل ۳-۲: تغییرات دمای بی‌بعد در شاخص‌های مختلف پاورلا، بدون تلفات ویسکوزیته

^۱ Viscous Dissipation

۳-۲-۲ تحلیل دمای بی بعد با وجود تلفات ویسکوزیته در فرایند گرمایش

در صورتی که بخواهیم تلفات ویسکوزیته را در دیواره در نظر بگیریم، عبارت عدد برینکمن^۱ به معادله انرژی اضافه می شود. لازم به ذکر می باشد که این عدد در حقیقت نشان دهنده نسبت گرمای تولید شده توسط تلفات ویسکوزیته به گرمای منتقل شده به داخل سیال توسط هدایت می باشد. در این حالت ما برینکمن را برابر $0/5$ قرار دادیم، یعنی فرایند ما گرمایشی می باشد (دمای میانگین سیال کمتر از دمای دیواره می باشد). با مقایسه شکل ۳-۳ و شکل ۲-۳ مشاهده می شود، مقادیر دمای بی بعد افزایش قابل توجهی نسبت به حالتی که از تلفات ویسکوزیته صرف نظر شده است دارد. گرمای تولید شده توسط تلفات در دیواره مانند یک منبع حرارتی داخلی عمل می کند و باعث بالا رفتن دمای میانگین سیال می شود. همان طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می شود، مشابه شکل ۲-۳، با افزایش شاخص جریان پاورلا، اختلاف دمای سیال و دیواره با علامت منفی افزایش پیدا می کند، زیرا با افزایش شاخص جریان، اثر تلفات ویسکوزیته بیشتر می شود و به عبارتی گرمای بیشتری در دیواره تولید می شود از این رو با افزایش شاخص پاورلا، افزایش دمای دیواره، بیشتر از افزایش دمای سیال یا دمای میانگین سیال می باشد، در نتیجه با اینکه دمای میانگین سیال افزایش پیدا می کند، اختلاف دمای سیال و دیواره روند افزایشی دارد.

^۱ Brinkman number



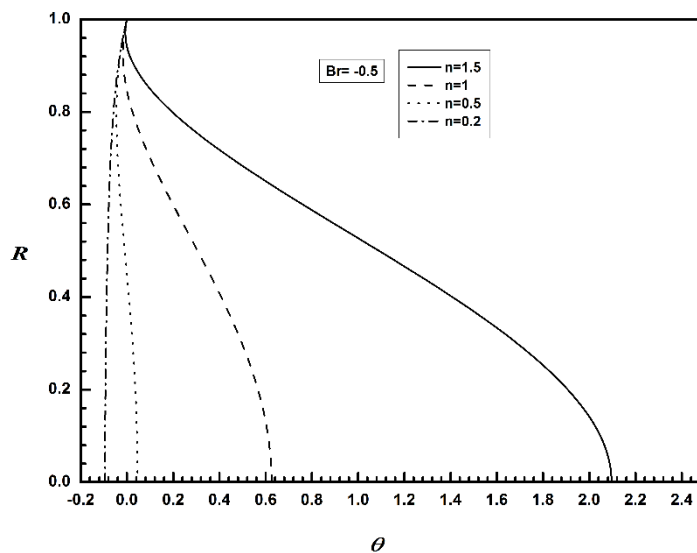
شکل ۳-۳: تغییرات دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، در فرایند گرمایش

۳-۲-۳ تحلیل دمای بی بعد با وجود تلفات ویسکوزیته در فرایند سرماییش.

در فرایند سرماییش، شاری که به دیواره میکروکانال وارد می شود شار سرماییشی می باشد، و سیال در حال از دست دادن حرارت خودش می باشد، اما گرمای تولید شده توسط تلفات ویسکوزیته در دیواره، باعث گرم شدن دمای میانگین سیال می شود، بنابراین در فرایند سرماییشی تقابل اثر شار سرماییشی با منبع گرمایی در نهایت باعث گرم شدن یا سرد سیال می شود که در این حالت، عدد برینکمن بحرانی^۱ تعریف می شود، بدین صورت که در یک برینکمن خاص، در حقیقت اثر شار سرماییشی واره شده به دیواره با اثر منبع گرمایی برابر می شود و یکدیگر را خنثی می کنند و این باعث می شود که در برینکمن بحرانی دمای میانگین سیال برابر دمای دیواره شود و در نتیجه انتقال حرارتی بین سیال و دیواره وجود ندارد. در فرایند سرماییش اگر علامت دمای بی بعد منفی باشد با توجه به این که علامت شار منفی می باشد به این معنی می باشد که دمای سیال بیشتر از دمای دیواره است و سیال در حال از دست دادن حرارت می باشد. همان طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می شود، برای سیالات برشی ضخیم و سیالات نیوتنی، علامت دمای بی بعد در ناحیه گسترده ای از میکروکانال به غیر از نواحی نزدیک دیواره مثبت می باشد، زیرا برای این نوع سیالات در این نواحی، هنوز دمای سیال از دمای دیواره کوچکتر می باشد با اینکه شار سرماییشی به سطح اعمال شده است،

^۱ Critical Brinkman number

به دلیل این که گرمای تولید شده از تلفات در دیواره غالب بوده در نتیجه باعث گرم شدن سیال در این نواحی می‌شود. در مورد سیال با شاخص پاورلا ۰/۵، اثر گرمای تولید شده ناشی از تلفات ویسکوزیته در دیوار کمتر از دو حالت قبل بوده بنابراین سیال در ناحیه گسترده تری از میکروکانال در حال سرد شدن می‌باشد. در مورد سیال با شاخص پاورلا ۰/۲، در کل مقطع عرضی میکروکانال، سیال در حال سرد شدن می‌باشد زیرا برای این شاخص پاورلا اثر شار سرمایشی بر گرمایی تولیدی غالب بوده و این باعث شده است که سیال در حال خنک شدن باشد. با توجه به شکل ۳-۴ می‌توان مشاهده کرد که برای تمامی سیالات برشی ضخیم، نیوتنی و برشی نازک، همیشه در نواحی نزدیک دیواره سیال در حال خنک شدن می‌باشد، زیرا در نواحی نزدیک دیواره سیال به شدت تحت تاثیر اثرات گرمایی ناشی از تلفات ویسکوزیته می‌باشد. در فرایند سرمایشی، تا زمانی که برینکمنی که برای مساله در نظر گرفته شده از برینکمن بحرانی کمتر باشد، با افزایش شاخص پاورلا دمای میانگین سیال کاهش پیدا می‌کند، ولی صورتیکه برینکمن مد نظر از برینکمن بحرانی بزرگتر باشد، در این حالت با افزایش شاخص پاورلا، دمای میانگین سیال افزایش پیدا می‌کند.

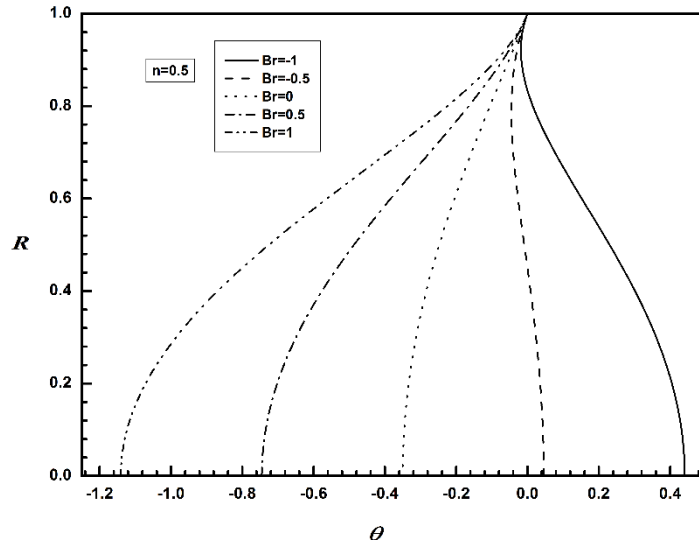


شکل ۳-۴: تغییرات دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، در فرایند سرمایش

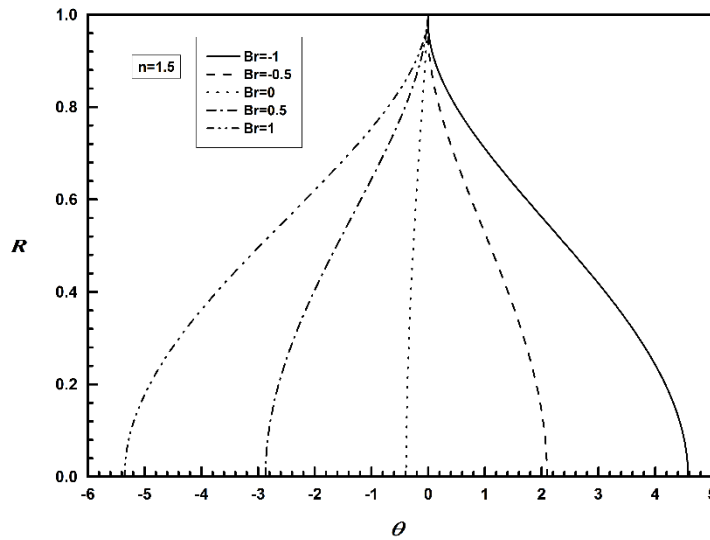
۳-۲-۴ تحلیل دمای بی بعد در فرایندهای سرمایشی و گرمایشی

تغییرات میدان دمایی برای سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت، برای حالت های سرمایشی و

گرمایشی دیواره، در شکل ۳-۵ و شکل ۳-۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در فرایند گرمایش، با افزایش برینکمن، به دلیل این که اثر تلفات ویسکوزیته در دیواره افزایش پیدا می کند باعث افزایش دمای سیال در نقاط مختلف میکروکانال می شود، که در حقیقت با افزایش دمای میانگین سیال، ظرفیت سیال برای دریافت گرما، کمتر می شود و هم چنین با افزایش برینکمن، دمای دیواره افزایش پیدا می کند با این تفاوت که، افزایش دمای دیواره نسبت به افزایش دمای میانگین سیال (هم چنین افزایش دمای سیال در نقاط مختلف میکروکانال) بیشتر می باشد که نتایج اختلاف دمای سیال و دمای دیواره با علامت منفی افزایش پیدا می کند. اما در مورد فرایند سرمایشی، زمانی که برینکمن را از صفر، با علامت منفی افزایش دهیم، تا زمانی که برینکمن مورد نظر ما از برینکمن بحرانی در شاخص پاورلا معین مساله کمتر باشد، یا به عبارت دیگر اثر شار سرمایشی بر گرمای تولید شده توسط تلفات ویسکوزیته غالب باشد، دمای میانگین سیال کاهش پیدا می کند در نتیجه اختلاف دمای میانگین سیال و دیواره با علامت مثبت کاهش پیدا می کند؛ اما وقتی که برینکمن مورد نظر ما از برینکمن بحرانی بزرگتر باشد، با افزایش برینکمن به دلیل اینکه گرمای تولید شده در دیواره بر شار سرمایشی به تدریج غلبه می کند، دمای میانگین سیال شروع به افزایش می کند و سیال در حال گرم شدن می باشد، البته لازم به ذکر می باشد که در این حالت با افزایش برینکمن، دمای دیواره هم به دلیل افزایش گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته، افزایش می یابد. با مقایسه شکل ۳-۵ و شکل ۳-۶ می توان مشاهده کرد برای سیالات دایلاتنت نسبت به سیالات شبه پلاستیک دمای میانگین سیال و دمای دیواره بیشتر افزایش پیدا می کند، در نتیجه اختلاف دمای سیال و دیواره در این حالت بیشتر از سیالات برشی نازک می باشد.



شکل ۳-۵: تغییرات دمای بی بعد در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک

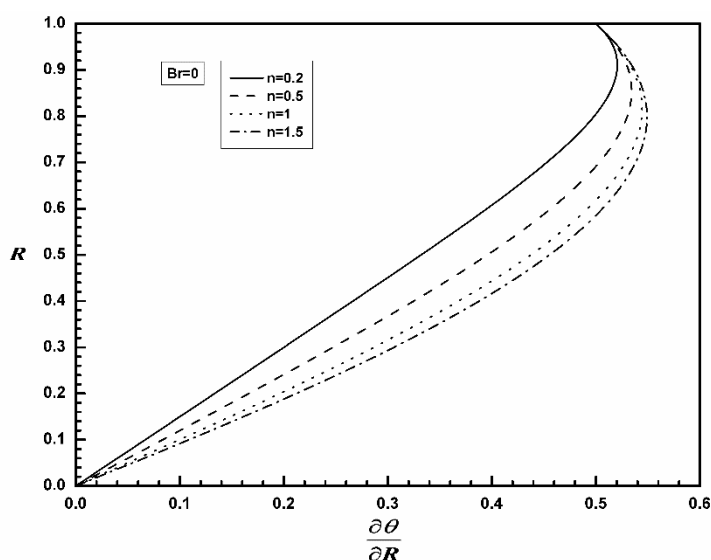


شکل ۳-۶: تغییرات دمای بی بعد در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت

۳-۲-۵ تحلیل گرادیان دمای بی بعد بدون تلفات ویسکوزیته

اطلاع از تغییرات گرادیان دمای بی بعد شعاعی یکی از مهم ترین موارد در تحلیل حرارتی سیال می باشد که بیان گر تاثیر انتقال حرارت هدایتی و جابجایی در نواحی مختلف میکروکانال می باشد. تغییرات گرادیان دمای بی بعد در راستای شعاعی، برای سیالات شبه پلاستیک، نیوتنی و دایلاتنت، برای حالتی که از تلفات ویسکوزیته در دیواره صرف نظر شده است، در شکل ۳-۷ رسم شده است. همان طور که از نمودار مشاهده می شود، مقدار گرادیان دما در دیواره، همیشه برابر 0.5 می باشد که به دلیل شار حرارتی ثابتی می باشد که بر دیواره وارد می شود و هم چنین مقدار گرادیان

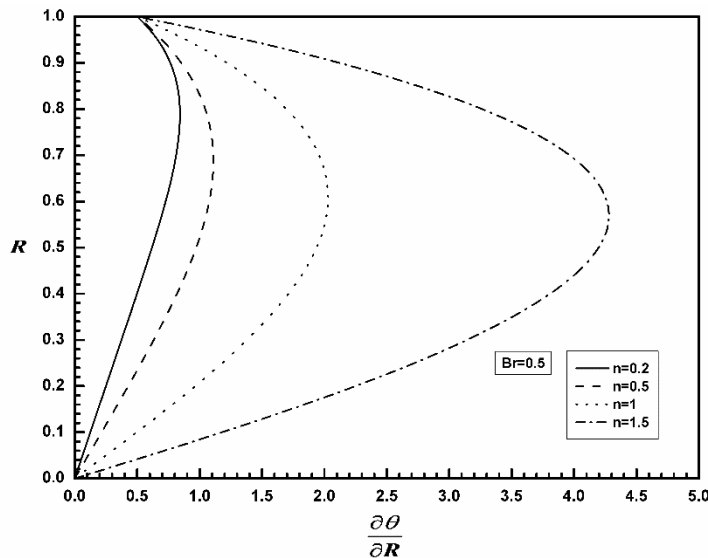
دمای بی‌بعد در مرکز به دلیل تقارن، برابر صفر می‌باشد. همان طور که از شکل ۳-۷ مشخص می‌باشد زمانی که از دیواره به سمت مرکز حرکت می‌کنیم، گرادیان دما از مقدار ثابت 0.5 شروع به افزایش می‌کند، زیرا انتقال حرارت هدایتی در مایعات بیشتر از جامدات می‌باشد. هم چنین با افزایش شاخص پاورلا، مقدار گرادیان دما افزایش پیدا می‌کند، زیرا با توجه به شکل ۳-۱ مقدار سرعت و گرادیان سرعت نزدیک دیواره، برای سیالات دایلاتنت کمتر از سیالات شبه‌پلاستیک می‌باشد و هرچه سرعت کمتر باشد سهم انتقال حرارت هدایتی بیشتر از جابجایی می‌باشد. پس از افزایش یافتن مقدار گرادیان دما، سپس شروع به کاهش می‌کند به دلیل اینکه هرچه به سمت مرکز میکروکانال حرکت می‌کنیم سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند، سهم انتقال حرارت جابجایی افزایش پیدا می‌کند. همان طور که در شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود، مقدار ماکزیم گرادیان دما برای سیالات دایلاتنت بزرگتر و با فاصله بیشتری از دیواره نسبت به سیالات شبه‌پلاستیک رخ داده است. هرچه به سمت مرکز میکروکانال حرکت می‌کنیم سرعت جریان برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات شبه‌پلاستیک می‌باشد، لذا در نزدیک مرکز میکروکانال، گرادیان دما برای سیالات دایلاتنت با شیب تندتری نسبت به سیالات شبه‌پلاستیک به صفر میل می‌کند.



شکل ۳-۷: تغییرات گرادیان دمای بی‌بعد در شاخص‌های مختلف پاورلا، بدون تلفات ویسکوزیته

۳-۲-۶ تحلیل گرادیان دمای بی بعد با وجود تلفات ویسکوزیته

تغییرات گرادیان دمای بی بعد در حالتی که تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود داشته باشد، برای شار گرمایشی در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. در فرایند گرمایش، علامت گرادیان دمای بی بعد برای حالتی که سیال در حال گرم شدن می باشد، مثبت می باشد. گرمای تولید شده در دیواره، باعث افزایش انتقال حرارت هدایتی می شود در نتیجه با مقایسه شکل ۳-۷ و شکل ۳-۸ می توان مشاهده کرد که تلفات ویسکوزیته تاثیر بسزایی بر روی گرادیان دمای محوری داشته و باعث افزایش چشم گیر انتقال حرارت هدایتی از دیواره به سمت سیال شده است. هم چنین با افزایش شاخص پاورلا، به دلیل اینکه اثر تلفات ویسکوزیته در دیواره افزایش پیدا می کند سبب می شود که گرادیان دمای بی بعد افزایش پیدا کند.

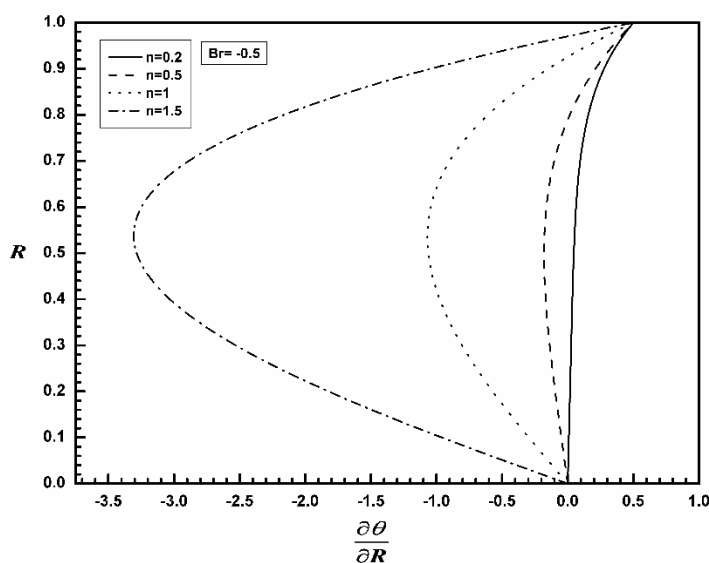


شکل ۳-۸: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا، در فرایند گرمایش

۳-۲-۷ تحلیل گرادیان دمای بی بعد با وجود تلفات ویسکوزیته در فرایند سرمایش

تغییرات گرادیان دمای بی بعد برای فرایند سرمایش در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. در فرایند سرمایش به دلیل اینکه علامت شار منفی می باشد، زمانی که علامت گرادیان دمای بی بعد منفی باشد، یعنی سیال در حال گرم شدن می باشد و در صورتی که مثبت باشد، یعنی سیال در حال خنک شدن می باشد. همان طور که در شکل ۳-۹ مشاهده می شود، با توجه به برینکمن در نظر گرفته شده،

سیالات دایلاتنت و نیوتنی، در تمام نواحی میکروکانال به جز نزدیک دیواره، دارای گرادیان دمایی منفی هستند و یا به عبارت دیگر سیال در حال گرم شدن می‌باشد و برای سیالات با شاخص‌های پاورلا ۰/۵ و ۰/۲، به دلیل اینکه اثر شار سرمایشی غالب بوده است بر گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته در دیواره، سیال در حال خنک شدن می‌باشد که ناشی از تاثیر بیشتر گرمای داخلی تلفات ویسکوزیته نسبت به شار سرمایشی می‌باشد. با مقایسه شکل ۳-۸ و شکل ۳-۹ می‌توان مشاهده کرد که ماکزیمم مقدار گرادیان دما در حالت سرمایش کمتر از گرمایش می‌باشد، زیرا با توجه به اینکه در فرایند سرمایش مقداری از سهم گرمای تولیدی تلفات ویسکوزیته صرف خنثی کردن اثر شار سرمایشی می‌شود در نتیجه انتقال حرارت هدایتی کمتری از دیواره به سمت سیال انجام می‌شود.

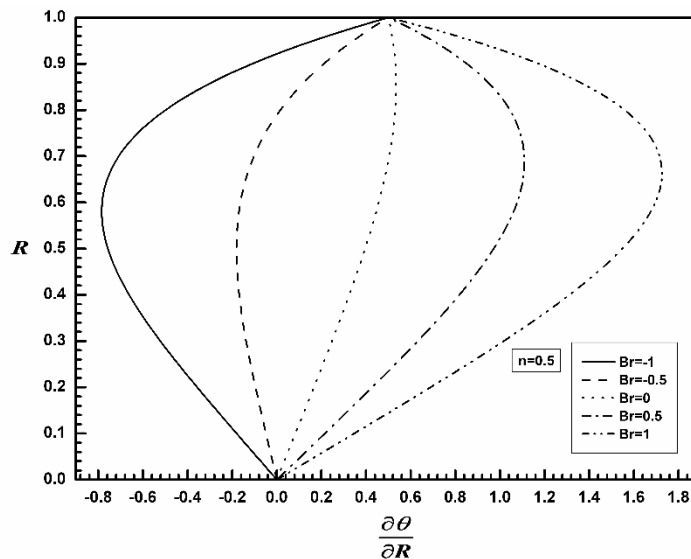


شکل ۳-۹: تغییرات گرادیان دمایی بی بعد در شاخص‌های مختلف پاورلا، در فرایند سرمایش

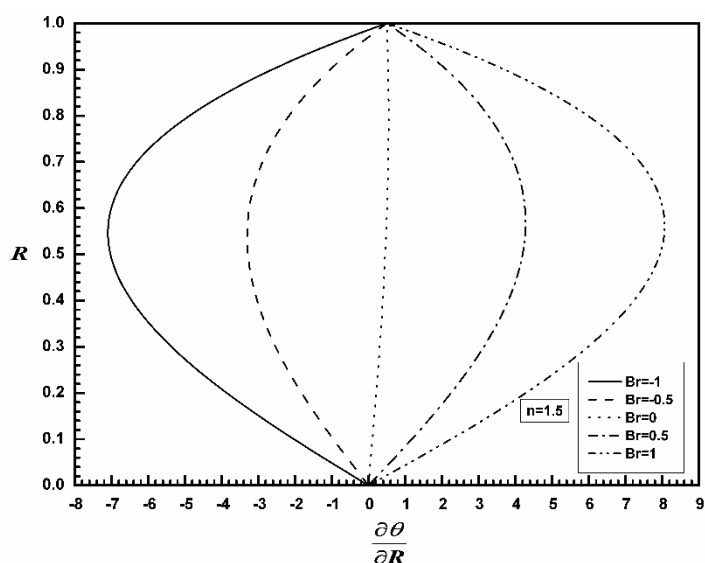
۳-۲-۸ تحلیل گرادیان دمایی بی بعد در فرایند سرمایش و گرمایش

تغییرات گرادیان دمایی بی بعد در برینکمن‌های مختلف در فرایند سرمایش و گرمایش، برای سیالات شبه‌پلاستیک و سیالات دایلاتنت در شکل ۳-۱۰ و شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارها مشخص می‌باشد، در فرایند گرمایش با افزایش برینکمن، انتقال حرارت هدایتی از سمت دیواره به سمت سیال افزایش پیدا می‌کند، زیرا با افزایش برینکمن، تلفات ویسکوزیته در دیواره

افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه گرمای حاصل شده از تلفات به وسیله انتقال حرارت هدایتی به سمت سیال جاری می‌شود، اما با مقایسه شکل ۳-۱۰ و شکل ۳-۱۱ مشخص می‌باشد که، این افزایش در گرادیان دما برای سیالات دایلاتنت به طور محسوسی بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می‌باشد، زیرا همان طور که قبلا اشاره شد، گرمای حاصل شده از تلفات ویسکوزیته برای سیالات دایلاتنت، بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می‌باشد. در مورد فرایند سرمایش نیز زمانی که برینکمن را از صفر با علامت منفی افزایش می‌دهیم، تا زمانی که برینکمن مورد نظر از برینکمن بحرانی در شاخص پاورلا معین کمتر باشد، گرادیان دما کاهش پیدا می‌کند، زیرا در این بازه با افزایش برینکمن با علامت منفی در حقیقت سیال در حال سرد شدن می‌باشد، سپس پس از عبور از برینکمن بحرانی، با افزایش برینکمن، سیال به تدریج شروع به گرم شدن می‌کند در نتیجه گرادیان دمای بی بعد هم به تدریج تغییر علامت می‌دهد و شروع به افزایش می‌کند.



شکل ۳-۱۰: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در برینکمن‌های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک



شکل ۳-۱۱: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت

۳-۲-۹ تحلیل عدد ناسلت^۱ در فرایند گرمایش

زمانی که یک سطح داشته باشیم و سیالی بر روی آن جاری باشد، به وسیله عدد ناسلت می توان سهم انتقال حرارت های انجام شده در راستای عمود بر سطح را مشخص کرد. در حقیقت عدد بی بعد ناسلت بیان کننده نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی می باشد که در ترم انتقال حرارت جابجایی، حرکت کپه ای^۲ سیال و حرکت پخشی^۳ سیال را در نظر می گیریم و در انتقال حرارت هدایتی، حرکت پخشی سیال مد نظر می باشد. با توجه به فصل دوم که رابطه تحلیلی ناسلت را به دست آوردیم، عدد ناسلت معکوس و قرینه دمای میانگین بی بعد می باشد. در شکل ۳-۱۲ تغییرات ناسلت بر حسب شاخص پاورلا، در برینکمن های مختلف نشان داده شده است. همان طور که مشخص می باشد، در حالتی که برینکمن صفر می باشد یا از تلفات ویسکوزیته در دیواره صرف نظر شده است، با افزایش شاخص پاورلا، ناسلت کاهش پیدا می کند، زیرا همان طور که در شکل ۳-۱۱ نشان داده شد، برای سیالات دایلاتنت، سرعت و گرادیان سرعت نزدیک دیواره کمتر از سیالات

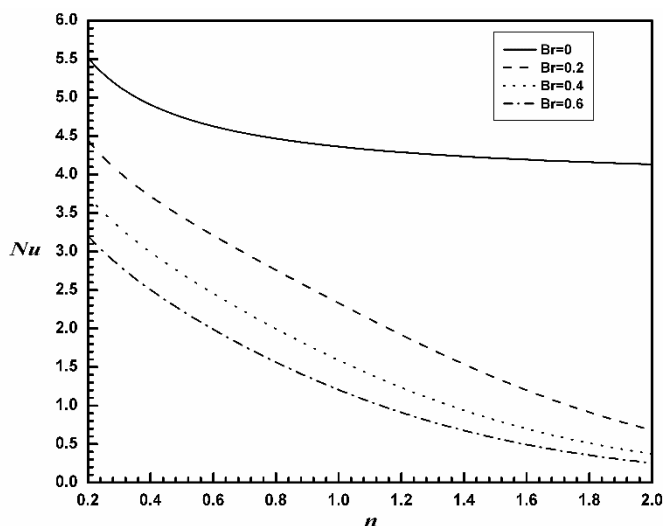
^۱ Nusselt number

^۲ Advection mechanism

^۳ Diffusion mechanism

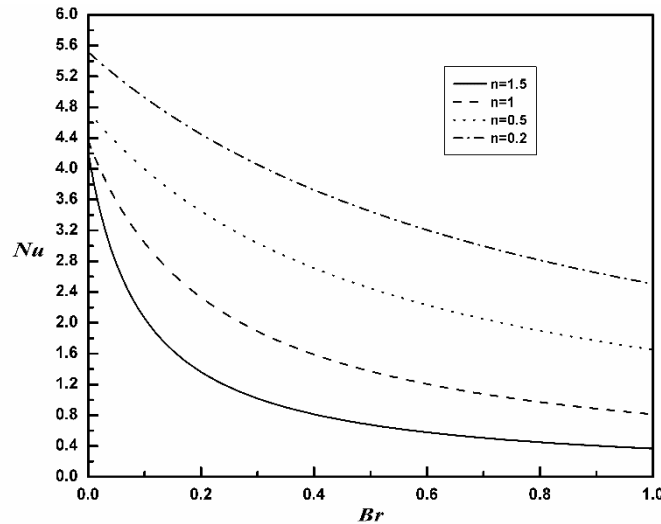
شبه پلاستیک می باشد در نتیجه انتقال حرارت جابجایی نزدیک دیواره با افزایش شاخص پاورلا کاهش پیدا می کند و از آنجایی که ناسلت بیان کننده نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی می باشد، ناسلت با افزایش شاخص پاورلا کاهش پیدا می کند. هم چنین همان طور که مشاهده می شود در این حالت که از تلفات ویسکوزیته صرف نظر کرده ایم، با افزایش شاخص پاورلا، کاهش در عدد ناسلت بسیار ملایم می باشد، به دلیل اینکه از تلفات در دیواره صرف نظر شده در نتیجه با افزایش شاخص پاورلا، دمای دیواره تغییری نمی کند و کاهش جزئی دمای میانگین سیال سبب کاهش عدد ناسلت می شود و در نهایت در صورتی که شاخص سیال را به سمت بی نهایت میل دهیم، ناسلت به مقدار $3/871$ همگرا می شود و ثابت باقی می ماند، زیرا وقتی شاخص پاورلا به سمت بی نهایت میل کند، سرعت و گرادیان سرعت در نزدیک دیواره ثابت باقی می ماند در نتیجه سهم انتقال حرارت جابجایی و انتقال حرارت هدایتی ثابت باقی می ماند. در حالتی که تلفات ویسکوزیته در دیواره را در نظر می گیریم، کاهش ناسلت با افزایش شاخص پاورلا بسیار محسوس می باشد، زیرا وقتی تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود دارد، به عنوان یک منبع گرمایی عمل می کند و هرچه شاخص پاورلا افزایش پیدا کند در حقیقت گرمای بیشتری در دیواره تولید می شود و این باعث می شود که، دمای میانگین سیال و دمای دیواره افزایش پیدا کند ولی از آنجایی که افزایش دمای دیواره بیشتر از افزایش دمای میانگین سیال می باشد، نتیجتاً اختلاف دمای میانگین سیال و دمای دیواره با علامت منفی افزایش پیدا می کند و این باعث کاهش شدید ناسلت می شود؛ هم چنین می توان گفت که با وجود تلفات ویسکوزیته در دیواره وقتی شاخص سیال را افزایش می دهیم سهم انتقال حرارت هدایتی در نزدیک دیواره به شدت افزایش پیدا می کند که سبب کاهش ناسلت می شود. هم چنین باید گفت در حالتی که تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود داشته باشد با افزایش شاخص پاورلا و میل دادن آن به سمت بی نهایت، ناسلت به صفر همگرا می شود: زیرا که با میل دادن شاخص پاورلا به سمت بی نهایت، در حقیقت تاثیر گرمای تولیدی ناشی از تلفات در دیواره بسیار زیاد می شود و این باعث می شود که دمای میانگین سیال بسیار افزایش پیدا کند و از طرفی دمای دیواره هم به شدت افزایش

می یابد و در نتیجه دمای میانگین بی بعد سیال افزایش می یابد و باعث می شود که ناسلت به سمت صفر میل کند.



شکل ۳-۱۲: تغییرات ناسلت با شاخص پاورلا، در برینکمن های مختلف

در شکل ۳-۱۳ تغییرات ناسلت با برینکمن برای فرایند گرمایش، برای سیالات دایلاتنت، نیوتنی و شبه پلاستیک نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش برینکمن، ناسلت کاهش پیدا می کند که در حقیقت به خاطر افزایش دمای میانگین سیال می باشد و هم چنین می توان گفت با افزایش برینکمن، به دلیل اینکه گرمای بیشتری در دیواره تولید در نتیجه سهم انتقال حرارت هدایتی افزایش پیدا می کند و در نتیجه باعث کاهش مقدار ناسلت می شود. هم چنین همان طور که در شکل ۳-۱۲ توضیح داده شد، ناسلت برای سیالات نیوتنی بیشتر از سیالات دایلاتنت و کمتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد: در حقیقت با افزایش شاخص پاورلا، هم تاثیر انتقال حرارت جابجایی کمتر می شود به دلیل سرعت کمتر در نزدک دیواره و هم اثر گرمای تولیدی در دیواره افزایش پیدا می کند که باعث می شود اختلاف دمای میانگین سیال و دمای دیواره افزایش پیدا کند.

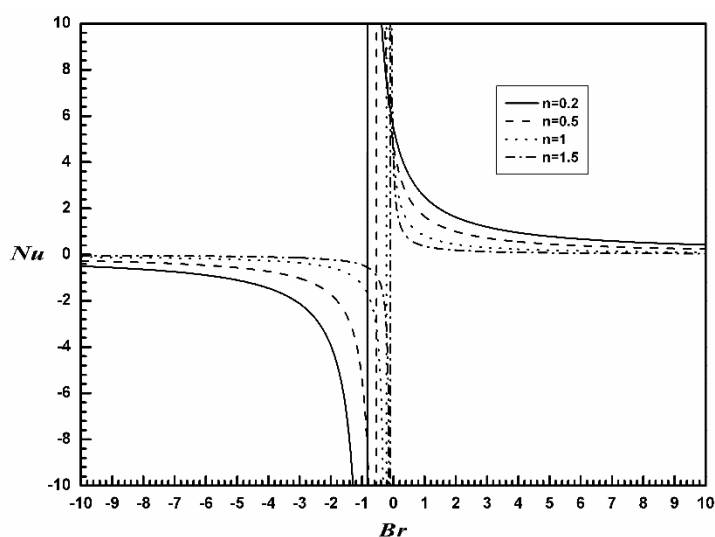


شکل ۳-۱۳: تغییرات ناسلت با برینکمن در حالت گرمایش، در شاخص های پاورلا مختلف

۳-۲-۱۰ تحلیل عدد ناسلت در فرایند سرمایش و گرمایش

در شکل ۳-۱۴ تغییرات ناسلت بر حسب برینکمن، برای فرایند های گرمایش و سرمایش در شاخص های مختلف پاورلا رسم شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، برای هر شاخص پاورلا معین، در برینکمن های خاصی که در حقیقت همان برینکمن بحرانی می باشد، ناسلت به سمت مثبت و منفی بی نهایت میل کرده است، در حقیقت در این برینکمن ها (برینکمن بحرانی)، به دلیل اینکه اثر گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته با شار سرمایشی وارد شده به سطح خنثی می شود، در نتیجه دمای میانگین سیال به دمای دیواره می رسد و باعث می شود که هیچ انتقال حرارتی بین سیال و دیواره صورت نگیرد در نتیجه ناسلت به سمت بی نهایت میل می کند. همان طور که در شکل ۳-۱۴ مشاهده می شود، در بازه بین برینکمن منفی بی نهایت تا برینکمن بحرانی، اگر برینکمن را با علامت منفی کاهش دهیم، ناسلت از مقدار صفر با علامت منفی در حال افزایش می باشد، زیرا علیرغم اینکه در فرایند سرمایش هستیم ولی به دلیل اینکه برینکمن در این بازه از برینکمن بحرانی بزرگتر می باشد پس عملاً مانند فرایند گرمایش عمل می کند ولی چون برینکمن از نظر مقداری کاهش می یابد، دمای میانگین سیال هم در حال کاهش می باشد و به دمای دیواره نزدیک تر می شود در نتیجه انتقال حرارت بین سیال و دیواره به تدریج کاهش پیدا می کند و ناسلت

هم به آرامی افزایش می‌یابد، اما در همسایگی برینکمن بحرانی، یک افزایش شدید در ناسلت دیده می‌شود که به دلیل کاهش شدید اختلاف دمای میانگین سیال و دیواره می‌باشد و این کاهش تا جایی ادامه می‌یابد که علامت اختلاف دمای میانگین سیال و دمای دیواره تغییر کند و همان طور که از شکل ۳-۱۴ مشخص می‌باشد، در برینکمن بحرانی علامت ناسلت از منفی به مثبت تغییر پیدا کرده است. در بازه بین برینکمن بحرانی و صفر، مشاهده می‌شود که با کاهش منفی برینکمن به سمت صفر، ناسلت کاهش شدیدی با علامت مثبت دارد، در حقیقت در این بازه دمای میانگین سیال بزرگتر از دمای دیواره می‌باشد و سیال در حال خنک شدن می‌باشد و به عبارتی دمای میانگین سیال در حال کاهش می‌باشد.

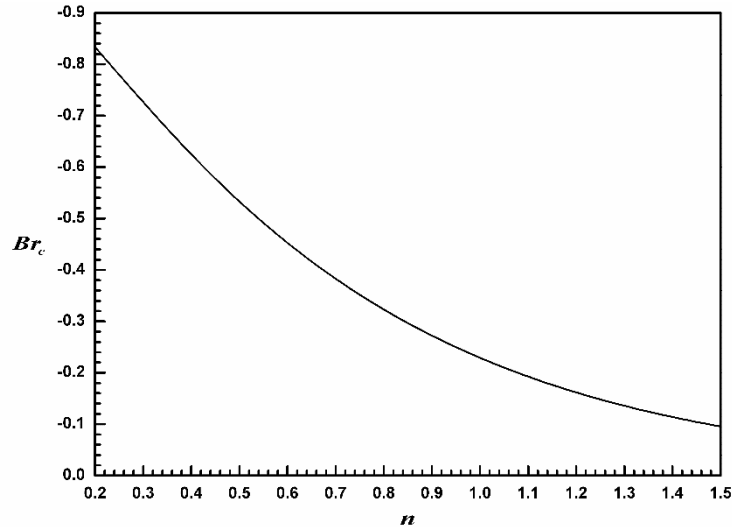


شکل ۳-۱۴: تغییرات ناسلت با برینکمن در فرایندهای سرمایش و گرمایش، در شاخص‌های مختلف پاورلا

۳-۲-۱۱ تحلیل برینکمن بحرانی

تغییرات برینکمن بحرانی با شاخص پاورلا، در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است. همان طور که از نمودار مشخص می‌باشد، برینکمن بحرانی فقط برای مقادیر منفی برینکمن ممکن می‌باشد زیرا که فقط در فرایند سرمایش، دمای میانگین سیال به دمای دیواره می‌رسد. با افزایش شاخص پاورلا، برینکمن بحرانی کاهش می‌یابد یا به عبارت دیگر در سیالات دایلاتنت در برینکمن بحرانی کوچکتری دمای میانگین سیال به دمای دیواره می‌رسد، زیرا اثر تلفات ویسکوزیته برای سیالات دایلاتنت بیشتر

از سیالات شبه پلاستیک می‌باشد در نتیجه برینکمن کوچکتری از نظر مقداری نیاز است تا گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته را با شار سرمایشی خنثی کند.



شکل ۳-۱۵: تغییرات برینکمن بحرانی با شاخص پاورلا

۳-۳ تحلیل تولید انترپی^۱

در فرایندهایی که در آنها انتقال حرارت جابجایی صورت می‌گیرد دو افت اجتناب ناپذیر حرارتی و اصطکاکی وجود دارد که در حقیقت این افت‌ها به دلیل تولید انترپی می‌باشد، حال به وسیله قانون دوم ترمودینامیک می‌توان میزان انترپی تولیدی حرارتی و انترپی تولیدی اصطکاکی و هم چنین انترپی تولیدی کل را به دست آورد و مقدار کمینه آن را مشخص نمود.

با توجه به رابطه (۲-۱۵) که در فصل دوم ارائه شد که بیانگر رینولدز بحرانی^۲ برای سیال پاورلا می‌باشد و با توجه به مقدار شاخص پاورلا، رینولدز بحرانی برای سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت به دست می‌آید. به عنوان مثال زمانی که شاخص پاورلا برابر یک باشد یا سیال نیوتنی باشد، مقدار رینولدز بحرانی برابر ۲۰۹۹/۲۴۵ می‌باشد و با کاهش مقدار شاخص پاورلا تا ۰/۴، مقدار رینولدز بحرانی افزایش پیدا می‌کند و جریان دیرتر آشفته می‌شود و با کاهش شاخص پاورلا از ۰/۴

^۱ Entropy generation

^۲ Critical Reynolds

تا ۰/۱، رینولدز بحرانی کاهش پیدا می‌کند به طوری‌که در شاخص پاورلا برابر ۰/۱ در رینولدز ۱۶۰۰ جریان تبدیل به جریان آشفته می‌شود. هم‌چنین برای شاخص های پاورلا بزرگتر از یک، با افزایش آن رینولدز بحرانی کاهش پیدا می‌کند که به طور مثال در صورتی که شاخص پاورلا برابر ۲ قرار دهیم در رینولدز ۱۶۷۵/۲۵۹ جریان از آرام تبدیل به جریان آشفته می‌شود. بنابراین با توجه به بازه مقادیر های بحرانی به دست آمده برای سیالات پاورلا با شاخص های پاورلا مختلف و با توجه به بازه مقادیر در نظر گرفته شده برای شاخص جریان پاورلا و هم‌چنین با در نظر گرفتن اینکه که شرایط مساله ما جریان آرام می‌باشد، مقدار رینولدز موجود در رابطه انتروپی تولیدی ناشی از حرارت برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر می‌باشد که تغییرات انتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت برای رینولدز های بسیار کوچک (جریان خزشی) محسوس می‌باشد و با توجه به این که جریان مساله ما خزشی نمی‌باشد در نتیجه تغییرات انتروپی تولیدی با رینولدهای مختلف در نظر گرفته نشده است. هم‌چنین مقدار دو برای عدد بی بعد پرانتل در نظر گرفته شده است و در کل برای گروه بی بعد رینولدز در پرانتل که به صورت عدد بی بعد پکلت بیان می‌شود، مقدار ثابت ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه (۲-۶۶) در فصل دوم، که نشان دهنده شار حرارتی بی‌بعد^۱ می‌باشد، برای

عبارت $\frac{1}{\psi}$ که در حقیقت معکوس شار حرارتی بی‌بعد می‌باشد مقدار ۱۵ در نظر گرفته شده است.

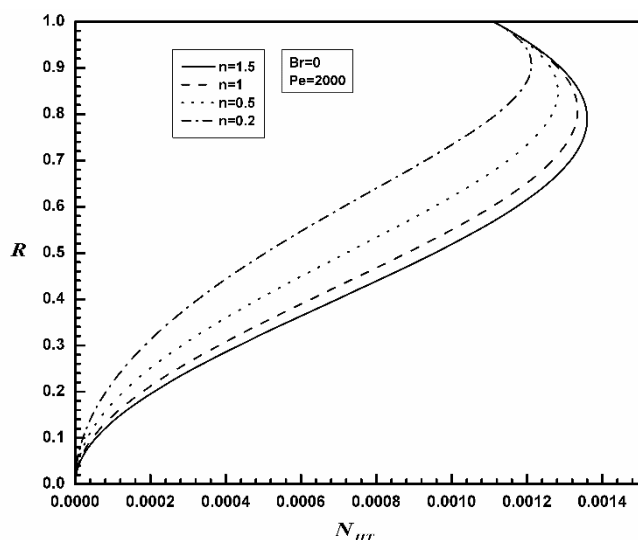
۳-۱-۳ تحلیل تولید انتروپی حرارتی^۲

فرایند انتقال حرارت عموماً همراه با بازگشت ناپذیری های ترمودینامیکی یا تولید انتروپی می‌باشد و این تولید انتروپی می‌تواند ناشی از منابع متعددی باشد. بر اساس معادله (۲-۶۸) که در فصل دوم به دست آمد، نرخ انتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت بر واحد حجم از دو عبارت تشکیل شده است که در حقیقت بیان کننده این می‌باشد که بازگشت ناپذیری حرارتی در داخل میکروکانال به وسیله انتقال حرارت هدایتی در راستای شعاعی و در راستای محوری ایجاد می‌شود.

^۱ Dimensionless Heat Flux

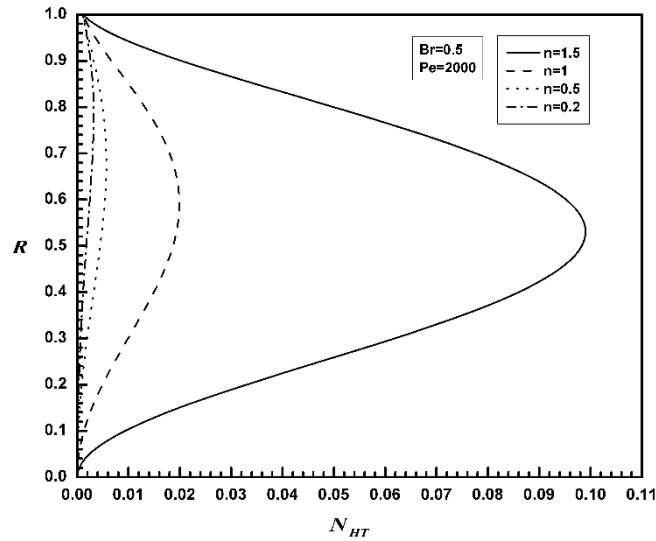
^۲ Entropy Generation due to heat transfer

شکل ۳-۱۶ انتروپی تولیدی حرارتی را در حالتی که تلفات ویسکوزیته در دیواره میکرو کانال وجود ندارد برای سیالات شبه پلاستیک، نیوتنی و دایلاتنت نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود رفتار این نمودار بسیار شبیه به شکل ۳-۷ می‌باشد، در حقیقت این نشان دهنده تاثیر بسیار زیاد گرادیان دمای شعاعی بر روی بازگشت ناپذیری ناشی از انتقال حرارت می‌باشد. رفتار نمودار بیان کننده تاثیر بسزای انتقال حرارت هدایتی در راستای شعاعی بر روی انتروپی تولید شده ناشی از انتقال حرارت می‌باشد. با توجه به شکل ۳-۱۶ مشخص می‌باشد که مقدار انتروپی تولیدی حرارتی برای سیالات شبه پلاستیک کمتر از سیالات دایلاتنت می‌باشد زیرا در سیالات شبه پلاستیک در نزدیکی دیواره سرعت و گرادیان بیشتر از سیالات دایلاتنت می‌باشد و در نتیجه انتقال حرارت هدایتی در راستای شعاعی برای سیالات برشی نازک به مراتب کمتر از سیالات برشی ضخیم می‌باشد، در نتیجه می‌توان گفت که اگر در سیستم از سیالات شبه پلاستیک استفاده شود به دلیل بازگشت ناپذیری کمتر حرارتی، سیستم عملکرد بهتری خواهد داشت. هم چنین همان طور که از شکل ۳-۱۶ قابل مشاهده می‌باشد بیشترین مقدار تولید انتروپی حرارتی در دیواره رخ نداده است بلکه در نزدیکی دیواره بیشترین مقدار بازگشت ناپذیری (تولید انتروپی حرارتی) اتفاق افتاده است، زیرا که بیشترین مقدار انتقال حرارت هدایتی (بیشترین مقدار گرادیان شعاعی دما) در نزدیکی دیواره می‌باشد و این به خاطر تاثیر انحاء دیواره می‌باشد؛ به طور مثال برای سیال نیوتنی در شعاع بی بعد برابر $0/81$ مقدار تولید انتروپی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و برای سیال دایلاتنت با شاخص پاورلا برابر $1/5$ در شعاع بی بعد برابر $0/79$ و برای سیال شبه پلاستیک با شاخص پاورلا برابر $0/2$ در شعاع بی بعد برابر $0/91$ ماکزیمم مقدار بازگشت ناپذیری حرارتی داخل میکروکانال اتفاق می‌افتد. هم چنین در مرکز میکروکانال، کمترین مقدار تولید انتروپی را داریم، زیرا در این ناحیه به دلیل اینکه سرعت به حداکثر مقدار خود رسیده است و انتقال حرارت جابجایی بر انتقال حرارت هدایتی غالب شده است.



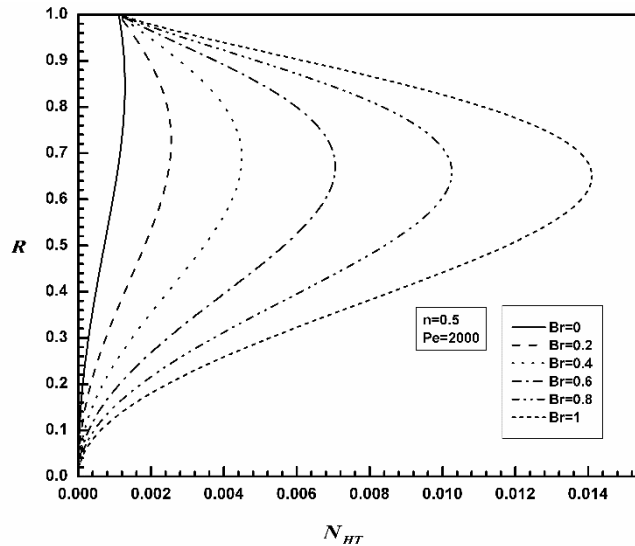
شکل ۳-۱۶: تغییرات تولید انترویی حرارتی در شاخس های مختلف پاورلا، بدون تلفات ویسکوزیته در دیواره

در شکل ۳-۱۷ تغییرات تولید انترویی برای حالتی که تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود دارد مورد بررسی قرار می دهیم. همان طور که مشخص می باشد در این حالت مقدار بازگشت ناپذیری حرارتی به طور چشم گیری بیشتر از حالت قبل (بدون تلفات ویسکوزیته در دیواره) می باشد و این به خاطر گرمای حاصل شده از وجود تلفات ویسکوزیته می باشد. همان طور که پیش تر به آن اشاره شد گرمای تولید شده در دیواره برای سیالات دایلاتنت بسیار بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد در نتیجه بیشترین مقدار تولید انترویی حرارتی برای سیال با شاخص پاورلا برابر با $1/5$ بسیار بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک می باشد که در شکل ۳-۸ کامل توضیح داده شد. بنابراین در میکروکانال دایروی کمترین مقدار بازگشت ناپذیری حرارتی در مرکز میکروکانال رخ می دهد و بیشترین مقدار بازگشت ناپذیری برای سیالات شبه پلاستیک و نیوتنی در نواحی نزدیک دیواره اتفاق می افتد، ولی برای سیالات دایلاتنت با افزایش شاخص پاورلا، بیشترین تولید انترویی در نواحی مرکزی میکروکانال اتفاق می افتد.

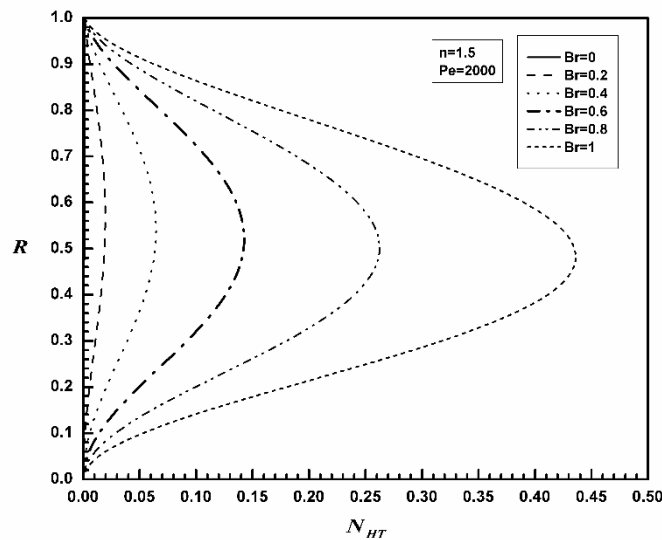


شکل ۳-۱۷: تغییرات تولید انترویی حرارتی در شاخص های مختلف پاورلا، با در نظر گرفتن تلفات ویسکوزیته

در شکل ۳-۱۸ و شکل ۳-۱۹ تغییرات تولید انترویی برای برینکمن های مختلف، به ترتیب برای سیالات شبه پلاستیک و سیالات دایلاتنت نشان داده شده است. با مقایسه شکل ۳-۱۸ و شکل ۳-۱۹ می توان دریافت که با افزایش برینکمن، مقدار انترویی تولیدی ناشی از حرارت برای هر دو نوع سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت افزایش پیدا می کند که این افزایش در بازگشت ناپذیری حرارتی برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد. نکته ای که حائز اهمیت می باشد این است که، همان طور که در معادله (۲-۴۵) فصل دوم نشان داده شده، برینکمن با قطر میکروکانال و شار حرارتی وارده به سطح رابطه عکس دارد، بدین معنی که در صورتیکه از کانال با ابعاد بزرگتری استفاده شود مقدار بازگشت ناپذیری حرارتی کمتر خواهد بود و عملکرد سیستم بهتر می باشد و هم چنین در صورتی که شار حرارتی بیشتری به دیواره وارد شود هم به دلیل کاهش برینکمن، و در نتیجه کاهش تولید انترویی حرارتی، میزان راندمان سیستم افزایش پیدا می کند.



شکل ۳-۱۸: تغییرات تولید انترویی حرارتی در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک

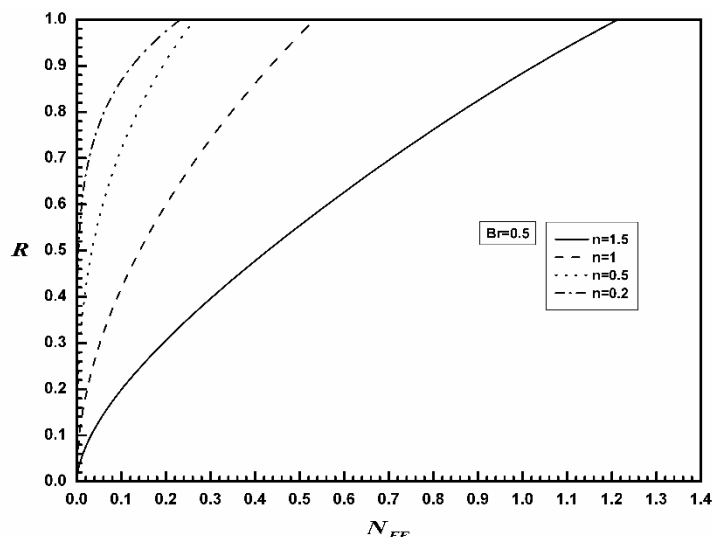


شکل ۳-۱۹: تغییرات تولید انترویی حرارتی در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت

۳-۳-۲ تحلیل تولید انترویی اصطکاکی

در این قسمت می خواهیم نقش اصطکاک در دیواره که ناشی از تلفات ویسکوزیته می باشد را در تولید انترویی مورد بررسی قرار دهیم. تولید انترویی اصطکاکی در اصل به خاطر وجود لزجت در سیال و ایجاد تنش برشی در دیواره، به وجود می آید و طبق رابطه (۲-۶۹) فصل دوم، مشاهده می شود در حقیقت انترویی تولیدی اصطکاکی سیال رابطه مستقیمی با گرادیان سرعت دارد که در حقیقت ارتباط مستقیمی با تنش برشی در دیواره دارد. شکل ۳-۲۰ تغییرات تولید انترویی اصطکاکی

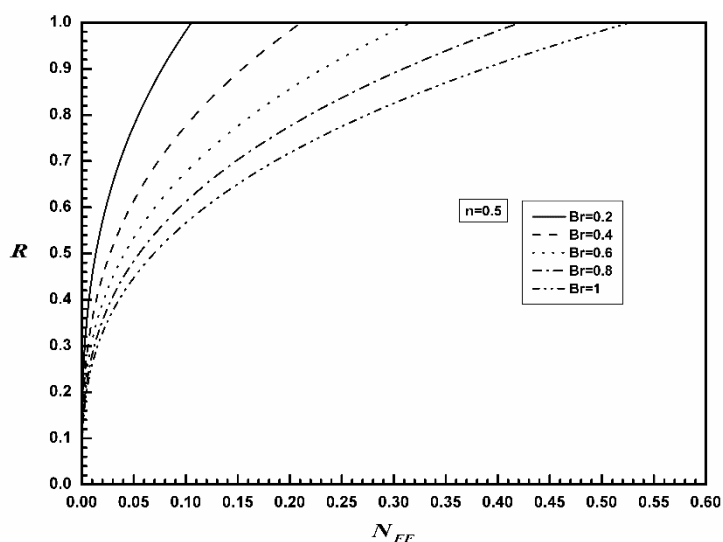
برای سیالات شبه پلاستیک، نیوتنی و دایلاتنت را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۳-۲۰ مشاهده می‌شود، تولید انتروپی اصطکاکی در دیواره بیشترین مقدار خود و در مرکز میکروکانال صفر می‌باشد، زیرا که در دیواره میکروکانال بیشترین تلفات ویسکوزیته یا به عبارت دیگر بیش‌ترین تنش برشی بین سیال و دیواره وجود دارد. همان طور که مشاهده می‌شود برای سیالات دایلاتنت مقدار تولید انتروپی بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک می‌باشد، زیرا با افزایش شاخص پاورلا ویسکوزیته ظاهری سیال افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه بازگشت ناپذیری اصطکاکی بیش‌تری به وجود می‌آید؛ البته ذکر این نکته قابل توجه می‌باشد که با افزایش شاخص پاورلا، گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره کاهش پیدا می‌کند ولی تاثیر تلفات ویسکوزیته افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه، تنش برشی افزایش پیدا می‌کند. همان طور که در شکل ۳-۲۰ مشخص می‌باشد برای سیالات شبه پلاستیک، با کاهش مقدار شاخص پاورلا، تولید انتروپی اصطکاکی در دیواره نسبت به سیالات دایلاتنت کمتر کاهش می‌یابد، زیرا گرادیان سرعت در دیواره با کاهش شاخص پاورلا افزایش پیدا می‌کند به طوریکه اگر شاخص پاورلا را برابر ۰/۱ قرار دهیم مقدار تولید انتروپی اصطکاکی در دیواره بیش‌تر از مقدار تولید انتروپی اصطکاکی برای شاخص پاورلا ۰/۲ خواهد بود.



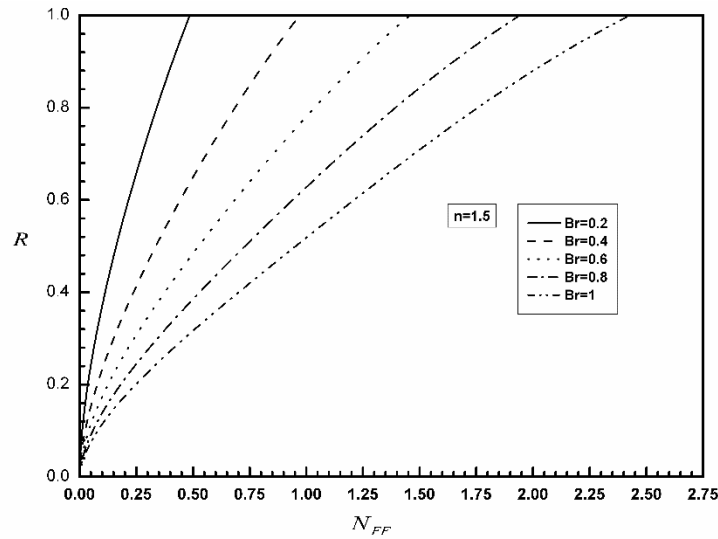
شکل ۳-۲۰: تغییرات تولید انتروپی اصطکاکی، در شاخص های مختلف پاورلا

در شکل ۳-۲۱ و شکل ۳-۲۲ تغییرات تولید انتروپی اصطکاکی در برینکمن های مختلف به

ترتیب برای سیال های شبه پلاستیک و دایلاتنت نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۳-۲۱ مشاهده می شود، با افزایش برینکمن مقدار بازگشت ناپذیری اصطکاکی افزایش پیدا می کند زیرا هنگامی که در یک شاخص پاور لا ثابت، مقدار برینکمن را افزایش می دهیم در حقیقت تاثیر تلفات ویسکوزیته را افزایش می دهیم که این عامل باعث می شود بازگشت ناپذیری اصطکاکی نیز افزایش پیدا کند، اما با مقایسه شکل ۳-۲۱ و شکل ۳-۲۲ می توان فهمید که مقدار افزایش برای سیالات دایلاتنت بسیار بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد زیرا با افزایش برینکمن در حقیقت مقدار تلفات ویسکوزیته در دیواره افزایش پیدا می کند اما در سیالات دایلاتنت، تاثیر تلفات ویسکوزیته بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد.



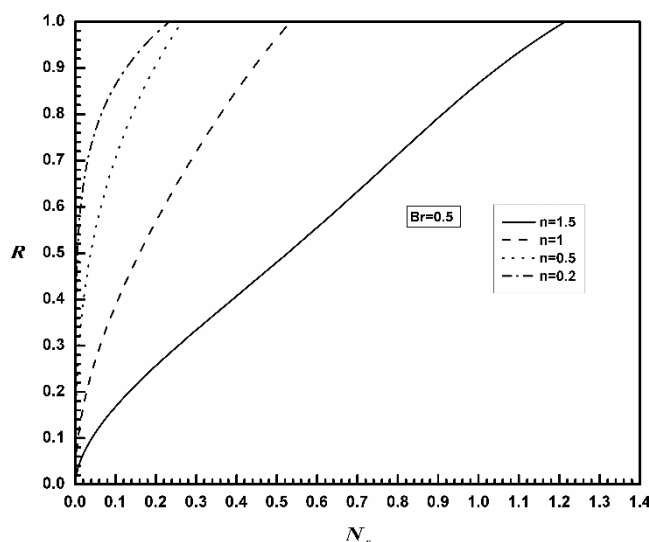
شکل ۳-۲۱: تغییرات تولید انترویپی اصطکاکی در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک



شکل ۳-۲۲: تغییرات تولید انتروپی اصطکاکی در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت

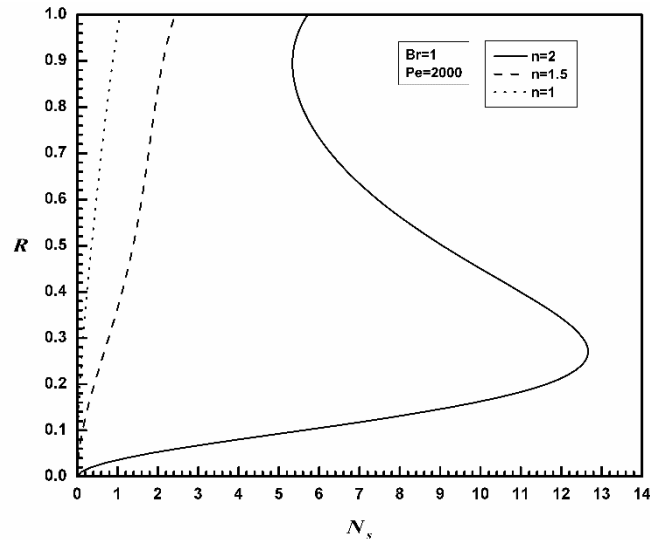
۳-۳-۳ تحلیل تولید انتروپی کل

همان طور که در شکل ۳-۲۳ مشاهده می شود تغییرات تولید بازگشت ناپذیری کل برای سیالات شیه پلاستیک، نیوتنی و دایلاتنت رسم شده است. تاثیرات بازگشت ناپذیری های اصطکاکی باعث شده است که ماکزیمم مقدار بازگشت ناپذیری کل نیز در دیواره میکروکانال رخ دهد. در حقیقت هر چه از سمت مرکز میکروکانال به سمت دیواره حرکت کنیم، سهم تولید انتروپی اصطکاکی بر حرارتی غلبه می کند. هم چنین مشاهده می شود که با افزایش شاخص پاورلا مقدار تولید انتروپی کل در دیواره افزایش محسوسی دارد، زیرا هر چه شاخص پاورلا بیشتر باشد تاثیر تلفات ویسکوزیته بیشتر و گرمای تولید شده ناشی از آن افزایش پیدا می کند و این باعث می شود که بازگشت ناپذیری های حرارتی و اصطکاکی هر دو با افزایش شاخص پاورلا رشد کنند. در مورد سهم تولید انتروپی حرارتی و اصطکاکی از تولید انتروپی کل در این نمودار نمی توان به خوبی اظهار نظر کرد و برای بررسی دقیق سهم هر یک از بازگشت ناپذیری ها از نمودارهای عدد بیژن که در ادامه آورده شده است استفاده می کنیم.



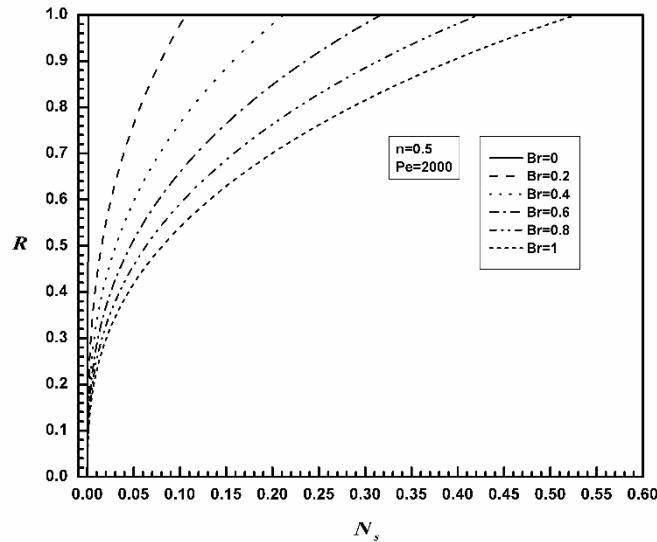
شکل ۳-۲۳: تغییرات تولید انتروپی کل، در شاخص های مختلف پاورلا

در شکل ۳-۲۴ تغییرات تولید انتروپی کل را برای سیالات نیوتنی و دایلاتنت در برینکمن برابر با یک، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود برای سیال نیوتنی و سیال دایلاتنت با شاخص پاورلا $1/5$ ، رفتار نمودار همانند شکل ۳-۲۳ می باشد ولی برای سیال دایلاتنت با شاخص پاورلا ۲، مشاهده می شود که رفتار تولید انتروپی کل متفاوت می باشد، در حقیقت در این حالت ماکزیمم مقدار بازگشت ناپذیری کل در دیواره رخ نداده است بلکه در $R = 0.27$ رخ داده است. این حالت نشان دهنده تاثیر تولید انتروپی حرارتی بر تولید انتروپی کل می باشد، به عبارت دیگر با افزایش شاخص پاورلا، انتقال حرارت هدایتی در راستای شعاعی افزایش یافته و این باعث می شود که مقدار بازگشت ناپذیری حرارتی افزایش پیدا کند به همین دلیل در این حالت ماکزیمم مقدار تولید انتروپی کل در جایی است که گرادیان دمای شعاعی بیشترین مقدار خود را دارد. این شکل نشان دهنده این می باشد که همیشه تولید انتروپی اصطکاکی بیشتر از حرارتی نمی باشد و بیانگر تاثیر بسیار شدید عدد برینکمن و شاخص پاورلا در سیالات دایلاتنت بر تولید انتروپی حرارتی می باشد و این که تاثیر عدد برینکمن و شاخص پاورلا بر تولید انتروپی حرارتی بیشتر از اصطکاکی می باشد.

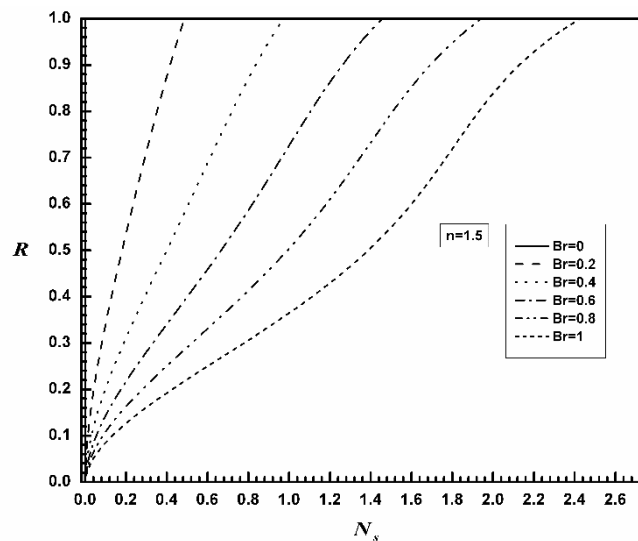


شکل ۳-۲۴: تغییرات تولید انتروپی کل، برای سیالات نیوتنی و دایلاتنت

تغییرات بازگشت ناپذیری کل با برینکمن برای سیالات برشی نازک و برشی ضخیم در شکل ۳-۲۵ و شکل ۳-۲۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۳-۲۵ مشخص می‌باشد با افزایش برینکمن مقدار تولید انتروپی کل نیز به صورت یکنواختی افزایش پیدا می‌کند که این نشان دهنده تاثیر تلفات ویسکوزیته بر بازگشت ناپذیری کل می‌باشد و هم چنین از نمودار مشخص می‌باشد که ماکزیم مقدار بازگشت ناپذیری کل در دیواره رخ داده است که نشان دهنده بیشتر بودن سهم بازگشت ناپذیری اصطکاکی از بازگشت ناپذیری حرارتی می‌باشد. همان طور که در شکل ۳-۲۶ مشاهده می‌شود، رفتار بازگشت ناپذیری کل مشابه سیال برشی نازک می‌باشد با این تفاوت که با افزایش برینکمن، با وجود اینکه ماکزیم مقدار تولید انتروپی کل در دیواره رخ می‌دهد ولی رفتار نمودار نشان دهنده زیاد شدن تاثیر بازگشت ناپذیری حرارتی می‌باشد که این را می‌توان برای برینکمن یک از روی تغییر رفتار نمودار مشاهده کرد.



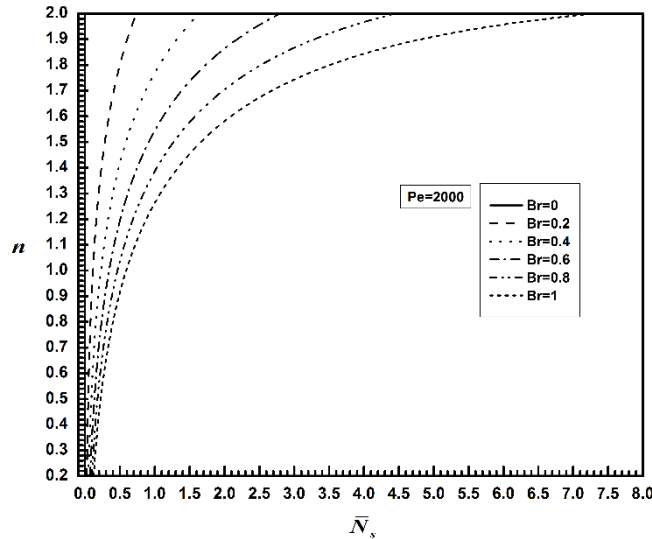
شکل ۳-۲۵: تغییرات تولید انتروپی کل در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک



شکل ۳-۲۶: تغییرات تولید انتروپی کل در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت

تغییرات تولید انتروپی متوسط کل در برینکمن های مختلف در شکل ۳-۲۷ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود برای سیالات دایلاتنت، نیوتنی و شبه پلاستیک با افزایش برینکمن، تولید انتروپی متوسط افزایش پیدا می کند ولی این رشد برای سیالات دایلاتنت بسیار بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک می باشد؛ برای حالتیکه از تلفات ویسکوزیته صرف نظر شده است مشاهده می شود مقدار بازگشت ناپذیری متوسط بسیار کوچک می باشد که این نشان دهنده تاثیر بالای تلفات ویسکوزیته بر روی بازگشت ناپذیری حرارتی می باشد. هم چنین با افزایش شاخص

پاورلا در یک برینکمن ثابت، تولید انتروپی متوسط کل افزایش می‌یابد که به خاطر تاثیر شدید تلفات ویسکوزیته بر روی بازگشت ناپذیری حرارتی و اصطکاکی می‌باشد.



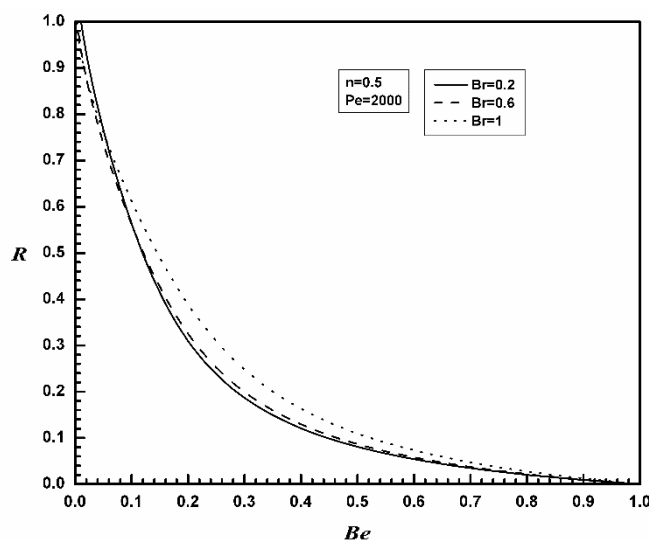
شکل ۳-۲۷: تغییرات تولید انتروپی متوسط کل در برینکمن های مختلف

۳-۳-۴ تحلیل عدد بیژن

در این بخش می‌خواهیم سهم هر یک از این بازگشت ناپذیری های اصطکاکی و حرارتی را از بازگشت ناپذیری کل مورد بررسی قرار دهیم. برای این امر از عدد بیژن استفاده می‌کنیم که در حقیقت بیان کننده نسبت بازگشت ناپذیری حرارتی به مجموع بازگشت ناپذیری های حرارتی و اصطکاکی می‌باشد و اساسا بیان کننده سهم تولید انتروپی حرارتی در تولید انتروپی کل می‌باشد.

شکل ۳-۲۸ نشان دهنده تغییرات عدد بیژن برای برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک می‌باشد. در مرکز میکروکانال بیژن برابر با یک می‌باشد که به خاطر نبود بازگشت ناپذیری اصطکاکی می‌باشد، هم چنین در دیواره میکروکانال مقدار بیژن بسیار کوچک می‌باشد که به خاطر تاثیر شدید تلفات ویسکوزیته در این ناحیه می‌باشد که باعث می‌شود بازگشت ناپذیری اصطکاکی افزایش پیدا کند در نتیجه سهم بازگشت ناپذیری حرارتی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به رفتار نمودار مشخص می‌باشد که هنگامی که از مرکز میکروکانال به سمت دیواره حرکت می‌کنیم عدد بیژن شروع به کاهش می‌کند که نشان دهنده کاهش سهم بازگشت ناپذیری حرارتی می‌باشد.

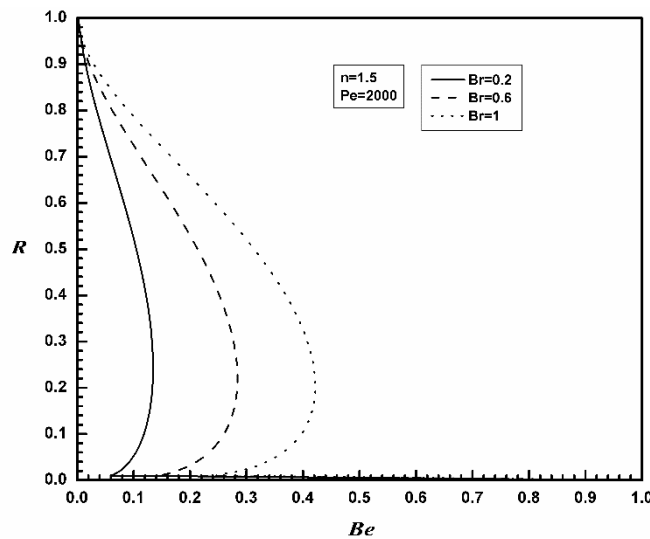
برای سیالات شبه پلاستیک، افزایش برینکمن تاثیر چشم گیری روی بیژن ندارد. هنگامی که عدد بیژن برابر 0.5 باشد به این معنا می باشد که سهم بازگشت ناپذیری حرارتی و اصطکاکی با یکدیگر برابر می باشد و فقط زمانی که عدد بیژن بزرگتر از 0.5 باشد، می توان گفت که بازگشت ناپذیری حرارتی بر بازگشت ناپذیری اصطکاکی غلبه کرده است. از همین رو با توجه به شکل در $Br = 0.2$ و $Br = 0.6$ تا شعاع $R = 0.08$ مقدار بیژن بزرگتر از 0.5 می باشد و برای $Br = 1$ تا شعاع $R = 0.1$ مقدار بیژن بزرگتر از 0.5 می باشد. با توجه به اعداد ذکر شده می توان گفت در سیالات شبه پلاستیک در بیشتر مقطع میکروکانال به جز نواحی کوچکی نزدیک مرکز میکروکانال، بازگشت ناپذیری اصطکاکی غالب می باشد بر بازگشت ناپذیری حرارتی سیستم. البته ذکر این نکته ضروری است که در برینکمن های بسیار کوچک برای سیالات شبه پلاستیک، این بازگشت ناپذیری حرارتی می باشد که غلبه می کند بر بازگشت ناپذیری اصطکاکی.



شکل ۳-۲۸: تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف، برای سیال شبه پلاستیک

تغییرات عدد بیژن برای سیال دایلاتنت در شکل ۳-۲۹ نشان داده شده است. رفتار عدد بیژن برای سیالات دایلاتنت کاملا متفاوت می باشد نسبت به سیالات شبه پلاستیک. در حرکت از مرکز میکروکانال به سمت دیواره، مقدار بیژن افت شدیدی دارد زیرا گرادیان سرعت در سیالات دایلاتنت وقتی از مرکز به سمت دیواره میکروکانال حرکت می کنیم بسیار سریع تر از سیالات شبه پلاستیک

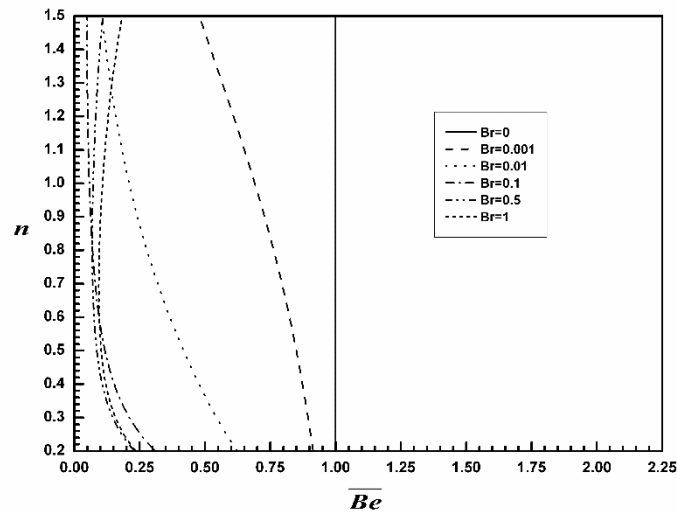
افزایش پیدا می‌کند و این باعث می‌شود که سهم بازگشت ناپذیری اصطکاکی به شدت افزایش پیدا کند؛ سپس در ادامه مشاهده می‌شود که پس از این افت شدید، عدد بیژن شروع به افزایش می‌کند و به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس کاهش پیدا می‌کند و در نهایت در دیواره میکروکانال به کمترین مقدار خود می‌رسد. اما افزایش یافتن بیژن به این دلیل می‌باشد که در این نواحی، میزان رشد گرادیان دمایی شعاعی بیشتر از رشد گرادیان سرعت می‌باشد، به عبارت دیگر از نظر تحلیل فیزیکی می‌توان گفت که برای سیالات دایلاتنت، با افزایش شاخص پاورلا در فاصله بیشتری از دیواره انتقال حرارت جابجایی بر انتقال حرارت هدایتی (گرادیان دمایی شعاعی) غلبه می‌کند در نتیجه گرادیان دمایی شعاعی دیرتر به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد که در نهایت باعث می‌شود بازگشت ناپذیری حرارتی نیز به ماکزیمم مقدار خود برسد و به عبارت دیگر در این نواحی رشد بازگشت ناپذیری حرارتی بیشتر از رشد بازگشت ناپذیری اصطکاکی می‌باشد.



شکل ۳-۲۹: تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف، برای سیال دایلاتنت

در شکل ۳-۳۰ تغییرات بیژن متوسط در برینکمن های مختلف به عنوان تابعی از شاخص جریان رسم شده است. برای حالتی که برینکمن برابر 0.001 می‌باشد مشاهده می‌شود که برای سیالات دایلاتنت و نیوتنی مقدار بیژن متوسط بیش تر از 0.5 می‌باشد که نشان دهنده غلبه بازگشت ناپذیری حرارتی بر اصطکاکی می‌باشد؛ در این برینکمن تا شاخص پاورلا برابر با $1/45$ مقدار بیژن

متوسط بیشتر از ۰/۵ می باشد و با افزایش شاخص پاورلا بیشتر از ۱/۴۵، به دلیل اینکه تاثیر تلفات ویسکوزیته افزایش پیدا می کند و در نتیجه سهم بازگشت ناپذیری اصطکاکی بیشتر از بازگشت ناپذیری حرارتی می شود. برای برینکمن های ۰/۵ و ۱ مشاهده می شود که بیژن متوسط با افزایش شاخص پاورلا تا مقادیر ۰/۸۵ و ۰/۶۹ ابتدا کاهش پیدا می کند و پس از آن شروع به افزایش می کند، زیرا با افزایش شاخص پاورلا بیشتر از مقادیر ذکر شده، مقدار گرادیان دمایی شعاعی افزایش پیدا می کند در نتیجه رشد بازگشت ناپذیری حرارتی بیشتر از رشد بازگشت ناپذیری اصطکاکی می شود که نهایتاً باعث افزایش بیژن متوسط می شود.



شکل ۳-۳: تغییرات عدد بیژن متوسط در برینکمن های مختلف

فصل چهارم

۴ تحلیل جریان سیال داخل میکروکانال با در نظر

گرفتن وجود لغزش در دیواره

- تحلیل میدان سرعت سیال
- تحلیل میدان حرارتی سیال
- تحلیل تولید انتروپی سیال

برای دقت بیشتر در تحلیل جریان سیالات در میکروکانال ها باید شرط وجود لغزش در دیواره را در نظر گرفت. در این فصل به بررسی میداین سرعت و دما و هم چنین تولید انترپی با فرض وجود لغزش در دیواره می پردازیم.

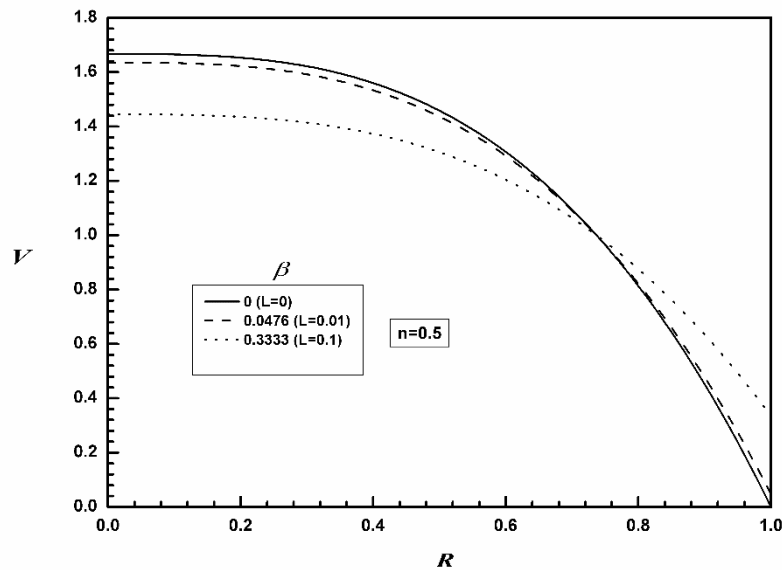
۱-۴ تحلیل میدان سرعت

در این بخش رفتار پروفیل سرعت سیال با وجود لغزش در دیواره مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۱-۴ تغییرات سرعت بی بعد را برای سیالات شبه پلاستیک، در سرعت های مختلف لغزش در دیواره (ضریب لغزش^۱) نشان می دهد. با توجه به این که نوع سیال تغییر نکرده است (ویسکوزیته ظاهری ثابت می باشد) عملاً نوع سطح یا پوشش روی سطح، تغییر کرده و به عبارتی از سطحی با زبری و آب گریزی بیشتر استفاده شده است، که در نتیجه آن طول لغزش تغییر کرده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش ضریب لغزش مقدار سرعت در دیواره و هسته جریان، به ترتیب افزایش و کاهش پیدا کرده است، هم چنین در مقایسه با حالت بدون لغزش، با افزایش ضریب لغزش، کاهش قابل توجهی در گرادیان سرعت در دیواره میکروکانال و هسته جریان^۲ مشاهده می شود زیرا با افزایش ضریب لغزش در دیواره، اختلاف فشار اعمالی کاهش و در نتیجه تنش روی دیوار کاهش می یابد؛ در حقیقت با افزایش سرعت لغزش در دیواره، تغییرات سرعت در میکروکانال کاهش می یابد و توزیع سرعت به سمت جریان پلاگین^۳ میل می کند.

^۱ Slip coefficient

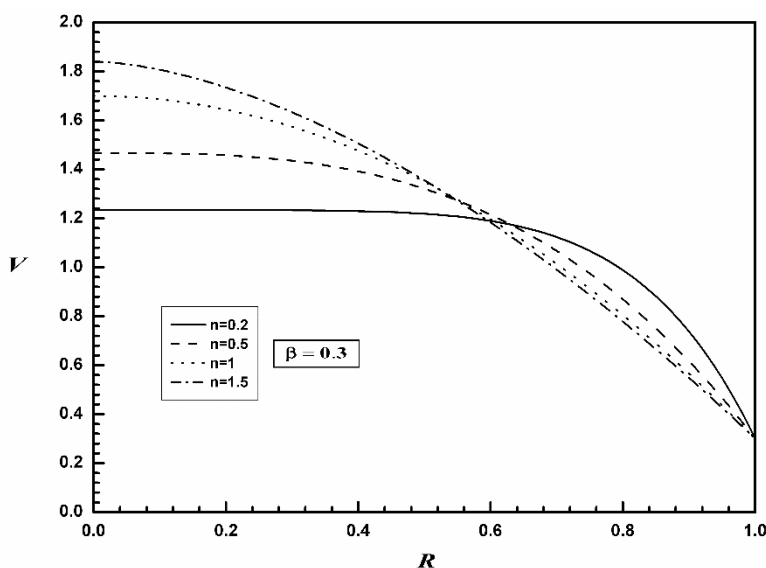
^۲ Core velocity

^۳ Plug Flow



شکل ۴-۱: تغییرات سرعت بی بعد برای سیال برشی نازک در ضریب لغزش های مختلف

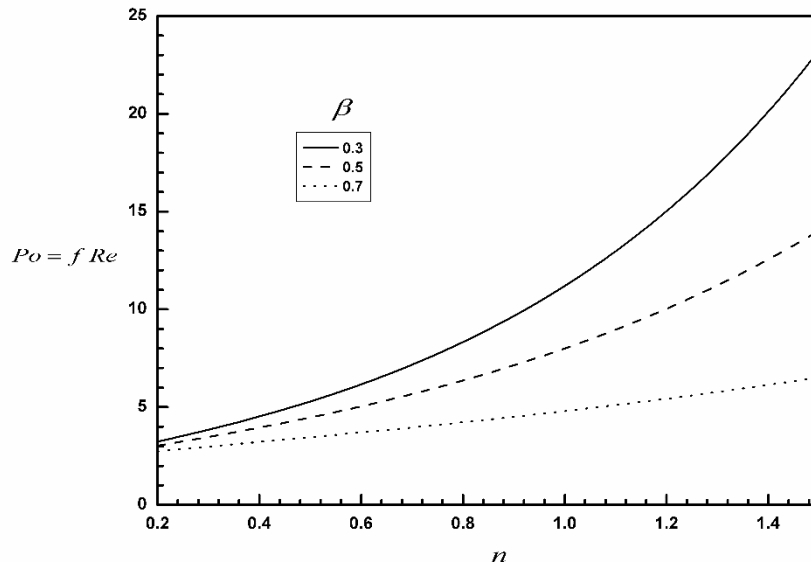
در شکل ۴-۲ تغییرات سرعت بی بعد برای شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین نشان داده شده است. در این حالت برای این که مقایسه صحیحی داشته باشیم بین سیالات شبه پلاستیک، نیوتنی و دایلاتنت، سرعت لغزش روی دیواره را برای همه این نوع سیالات ثابت و یکسان فرض کردیم، علی رغم این که وقتی شاخص پاورلا تغییر کند ویسکوزیته ظاهری سیال نیز تغییر می کند و این باعث می شود که طول لغزش تغییر کند و به دنبال آن سرعت لغزش روی دیواره نیز تغییر کند در نتیجه برای داشتن سرعت لغزش یکسان در عمل باید هر کدام از این نوع سیالات بر روی میکروکانال خاصی با زبری متفاوت آزمایش شود به طوریکه مقدار سرعت لغزش در دیواره برای تمام این سیالات یکسان به دست آید. از شکل ۴-۲ مشخص می باشد با افزایش شاخص پاورلا، مقدار سرعت هسته جریان افزایش پیدا می کند در حالی که گرادیان سرعت کاهش پیدا می کند. هم چنین مشاهده می شود که پروفیل سرعت سیالات شبه پلاستیک، با کاهش شاخص پاورلا به صورت یکنواخت تری رفتار می کند ولی برای سیالات دایلاتنت عکس این قضیه صحت دارد.



شکل ۴-۲: تغییرات سرعت بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا

۴-۱-۱ تحلیل عدد پوآزی

در شکل ۴-۳ تغییرات عدد پوآزی در برابر شاخص پاورلا، در سرعت لغزش های متفاوت نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در یک سرعت لغزش معین با افزایش شاخص پاورلا، مقدار عدد پوآزی که نشان دهنده اصطکاک بین سیال و دیواره می باشد، افزایش پیدا می کند، همان طور که پیش تر بدان اشاره شد با افزایش شاخص سیال مقدار گرادیان سرعت در دیواره کاهش پیدا می کند ولی ذکر این نکته مهم می باشد که ویسکوزیته ظاهری سیال یا همان لزجت سیال افزایش پیدا می کند و به طور کلی برای سیالات دایلاتنت همواره لزجت سیال بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد و این امر سبب می شود که اصطکاک بین مولکول های سیال و دیواره افزایش پیدا کند؛ هم چنین در نمودار ذیل مشاهده می شود که با افزایش سرعت لغزش در دیواره مقدار عدد پوآزی کاهش پیدا می کند زیرا عملاً چسبندگی سیال در تماس با دیواره به شدت کاهش پیدا می کند و نتایجاً باعث کاهش اصطکاک بین سیال و دیواره می شود.



شکل ۴-۳: تغییرات عدد پوزیلی با شاخص پاورلا، در ضریب لغزش های مختلف

۲-۴ تحلیل میدان دمایی

در این فصل همانند فصل سوم، به تحلیل میدان دمایی در فرایندهای گرمایش و سرمایش اما با وجود لغزش در دیواره می پردازیم.

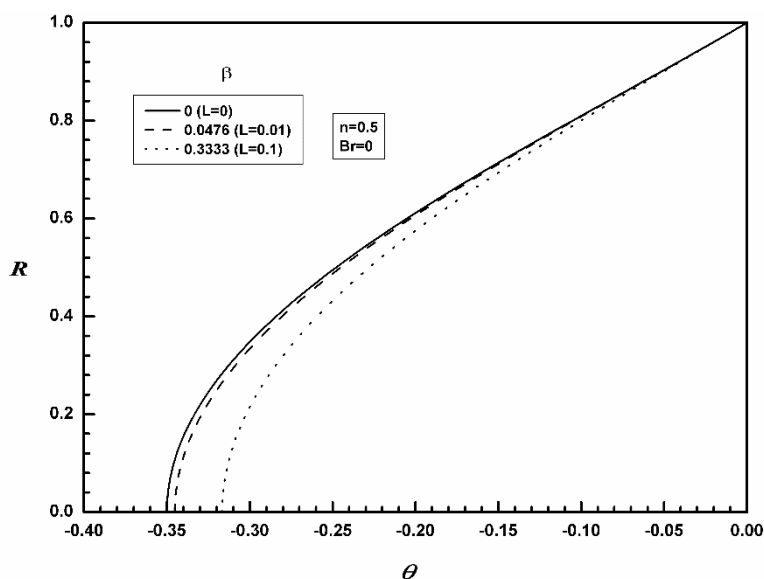
۱-۲-۴ تحلیل میدان دمایی بدون تلفات ویسکوزیته

در این بخش رفتار پروفیل دمای بی بعد سیال را در داخل میکروکانال با وجود شرط لغزش در دیواره و عدم پخش دمایی مورد بررسی قرار می دهیم.

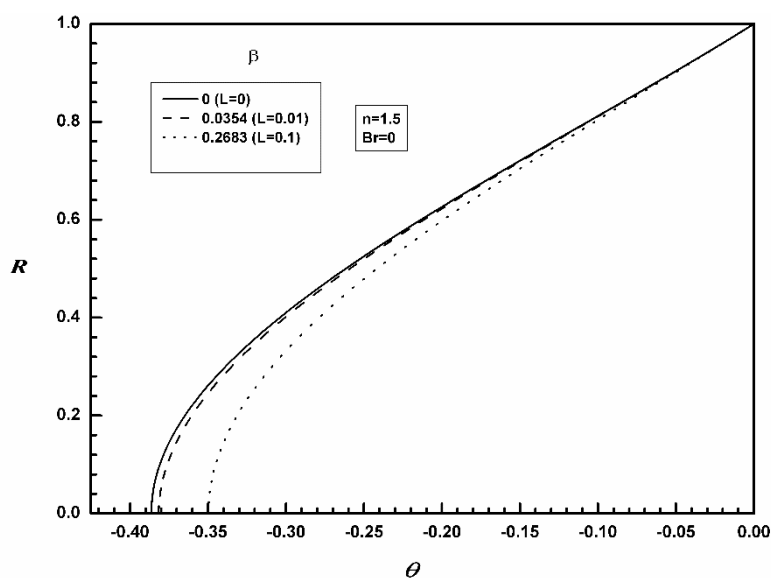
در شکل ۴-۴ و شکل ۵-۴ تغییرات رفتار توزیع دما در طول لغزش های متفاوت یا به عبارتی سرعت لغزش های متفاوت در دیواره، به ترتیب برای سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت در حالتی که از تلفات ویسکوزیته صرف نظر شده نشان داده شده است؛ همان طور که مشخص می باشد با افزایش سرعت لغزش در دیواره، دمای بی بعد با علامت منفی کاهش می یابد در حقیقت مقدار اختلاف دمای بین سیال و دیواره کاهش پیدا می کند که این رفتار برای هر دو نوع سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت مشاهده می شود؛ زیرا همان طور که در شکل ۱-۴ نشان داده شد با افزایش ضریب لغزش، مقدار سرعت در مرکز و هم چنین گرادیان سرعت در دیواره کاهش پیدا می کند و این عامل باعث

می‌شود که جریان فرصت بیشتری برای جذب گرما از دیواره داشته باشد و باعث نزدیک شدن دمای میانگین سیال به دمای دیواره می‌شود که در نهایت باعث کاهش اختلاف دمای سیال و دمای دیواره می‌شود. هم چنین با مقایسه شکل ۴-۴ و شکل ۵-۴ مشخص می‌باشد که حداکثر اختلاف دمای سیال و دیواره در مرکز میکروکانال برای سیال دایلاتنت بیشتر از سیال شبه پلاستیک می‌باشد، که این هم به خاطر بیشتر بودن سرعت هسته جریان در سیالات دایلاتنت نسبت به شبه پلاستیک

می‌باشد.



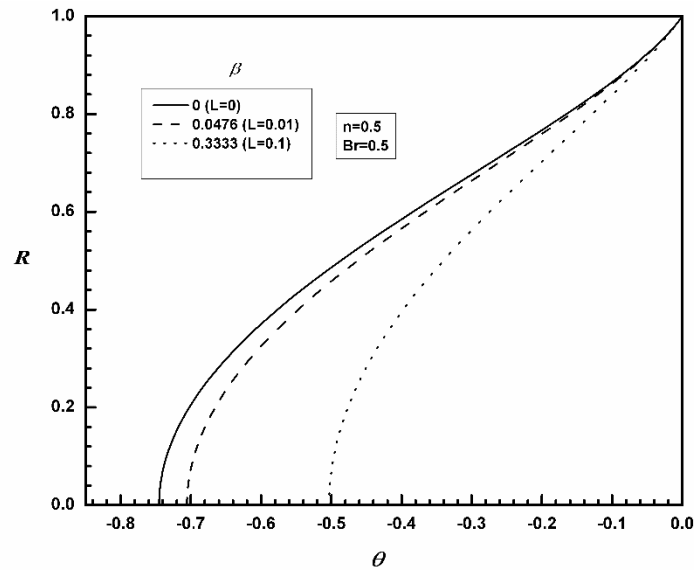
شکل ۴-۴: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک



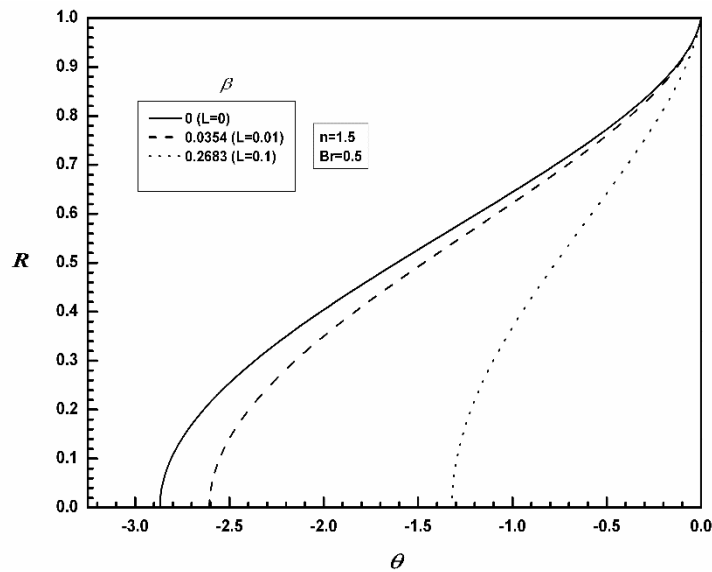
شکل ۵-۴: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت

۲-۲-۴ تحلیل میدان دمایی در فرایند گرمایش

در دو شکل قبل از اثر گرمایش ناشی از تلفات ویسکوزیته صرف نظر شده بود اما در شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ اثر تلفات ویسکوزیته در نظر گرفته شده است. در این حالت نیز آشکار می‌باشد که با افزایش سرعت لغزش، اختلاف دمای سیال و دیواره در مقطع عرضی کانال کاهش یافته اما در این حالت به دلیل اینکه اثر تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود دارد بنابراین توزیع دمای سیال علاوه بر اثر جابجایی به گرمای تولید شده توسط تلفات در دیواره نیز بستگی دارد و اثر تلفات ویسکوزیته تحت تاثیر گرادیان سرعت در دیواره می‌باشد و همان طور که قبلا اشاره شد با افزایش سرعت لغزش در دیواره، گرادیان سرعت در دیواره کاهش پیدا می‌کند و این باعث می‌شود که در یک شاخص پاورلا معین با افزایش سرعت لغزش در دیواره، گرمای کمتری ناشی از تلفات ویسکوزیته در دیواره تولید شود که این خود باعث می‌شود دمای میانگین سیال کمتر افزایش پیدا کند و سیال داخل میکروکانال گرمای کمتری ناشی از تلفات ویسکوزیته جذب کند؛ این در حالی است که کمتر شدن اثر تلفات ویسکوزیته باعث می‌شود که دمای دیواره کمتر افزایش پیدا کند و در نهایت اختلاف دمای سیال و دیواره در عرض میکروکانال کاهش پیدا کند. با مقایسه شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ مشخص می‌باشد که در سیال دایلاتنت مقدار اختلاف دمای سیال و دیواره به طور چشمگیری بیشتر از سیال شبه پلاستیک می‌باشد که این به دلیل بیشتر بودن تاثیر تلفات ویسکوزیته برای سیالات دایلاتنت نسبت به شبه پلاستیک می‌باشد و در نتیجه گرمای تولید شده در دیواره برای این نوع سیالات بسیار بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می‌باشد و این عامل باعث می‌شود دمای دیواره در این حالت بیشتر افزایش پیدا کند و در نتیجه اختلاف دمای سیال و دیواره افزایش محسوسی می‌یابد؛ هم چنین با مقایسه شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ برای سیالات شبه پلاستیک و شکل ۴-۵ و شکل ۴-۷ برای سیالات دایلاتنت، اثر انکار ناپذیر تلفات ویسکوزیته در دیواره مشاهده می‌شود، هر چند که با وجود لغزش در دیواره اثر تلفات ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند ولی همچنان قابل توجه می‌باشد.



شکل ۴-۶: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک

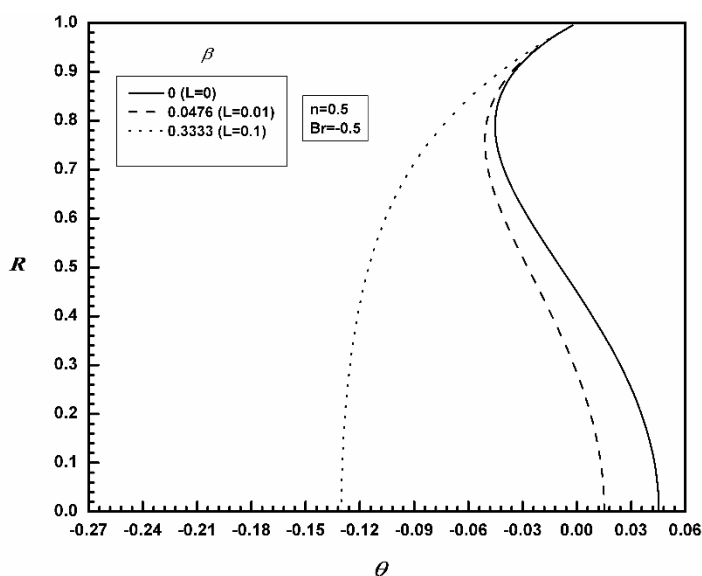


شکل ۴-۷: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال داپلاتنت

۴-۲-۳ تحلیل میدان دمایی در فرایند سرمایش

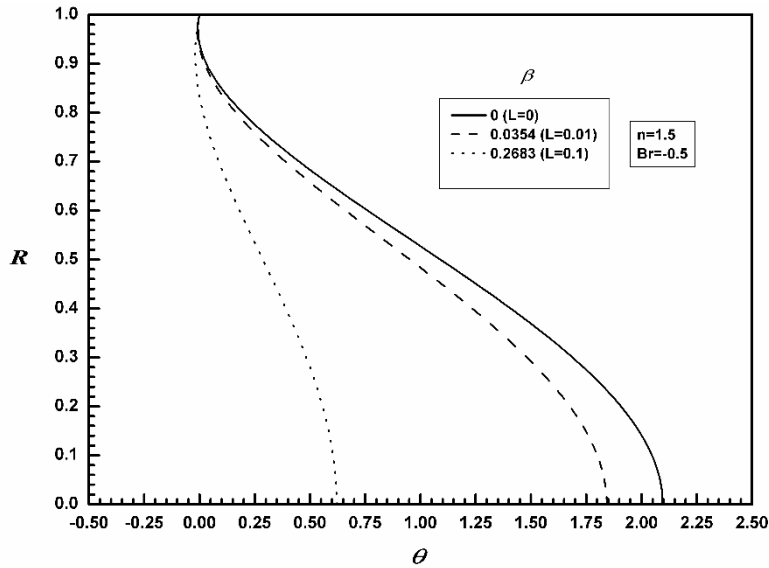
شکل ۴-۸ تغییرات بی بعد دما را برای سیال شبه پلاستیک در سرعت لغزش های متفاوت در فرایند سرمایش نشان می دهد. در فرایند سرمایش به دلیل این که شار سرمایشی به دیواره خارجی میکروکانال وارد می شود سیال در حال سرد شدن می باشد ولی گرمای ناشی از تلفات ویسکوزیته در سطح داخلی میکروکانال در طرف مقابل باعث گرم شدن سیال می شود که براینند این دو منبع

گرمایش و سرمایش را با عدد برینکمن بحرانی نشان می‌دهیم که در ادامه برای شرایط لغزش در دیواره توضیح داده می‌شود. همان طور که در شکل ۴-۸ مشخص می‌باشد برای حالتی هایی که طول لغزش برابر صفر و $0/01$ می‌باشد علی‌رغم این که شار سرمایشی به سطح وارد می‌شود ولی در تمام مقطع عرضی میکروکانال سیال در حال سرد شدن نمی‌باشد و هر چه به سمت مرکز میکروکانال حرکت می‌کنیم مشاهده می‌شود که علامت اختلاف دمای سیال و دمای دیواره منفی می‌شود که به این معنی می‌باشد که دمای سیال در این نواحی کوچکتر از دمای دیواره است و در حال دریافت گرما می‌باشد در حالی که برای طول لغزش $0/1$ ، در تمام مقطع عرضی میکروکانال سیال در حال خنک شدن می‌باشد؛ دلیل این رفتار این می‌باشد که هنگامی که اثر لغزش را در دیواره در نظر می‌گیریم باعث می‌شود که تاثیر گرمای ناشی از تلفات ویسکوزیته کاهش پیدا کند در نتیجه اثر شار سرمایشی بیشتر از منبع داخلی گرمایی می‌شود؛ و به همین دلیل مشاهده می‌شود که در طول لغزش های 0 و $0/01$ به طور کامل در مقطع عرضی میکروکانال سرمایش نداریم زیرا تاثیر شار سرمایشی به طور محسوسی بیشتر از منبع گرمایی نمی‌باشد و این باعث شده است که در نقاط دور تر از دیواره اثر شار سرمایشی به سیال نفوذ نکند. در مورد طول لغزش برابر $0/1$ مشاهده می‌شود که در تمام مقطع عرضی میکروکانال سیال در حال خنک شدن می‌باشد و این دقیقا به خاطر افزایش سرعت لغزش در دیواره و کاهش دادن اثر گرمای تلفات ویسکوزیته و در نتیجه غالب شدن شار سرمایشی در کل عرض میکروکانال می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که دلیل اینکه برینکمن بحرانی معیاری برای سنجش کوچکتر بودن و یا بزرگتر بودن دمای میانگین سیال از دمای دیواره می‌باشد بنابراین در این حالت که دمای محلی سیال عامل را در نقاط مختلف میکروکانال بحث می‌کنیم، نمی‌توانیم به درستی از تحلیل برینکمن بحرانی استفاده کنیم.



شکل ۴-۸: تغییرات دمایی بعد از ضربه لغزشی برای سیال شبه پلاستیک

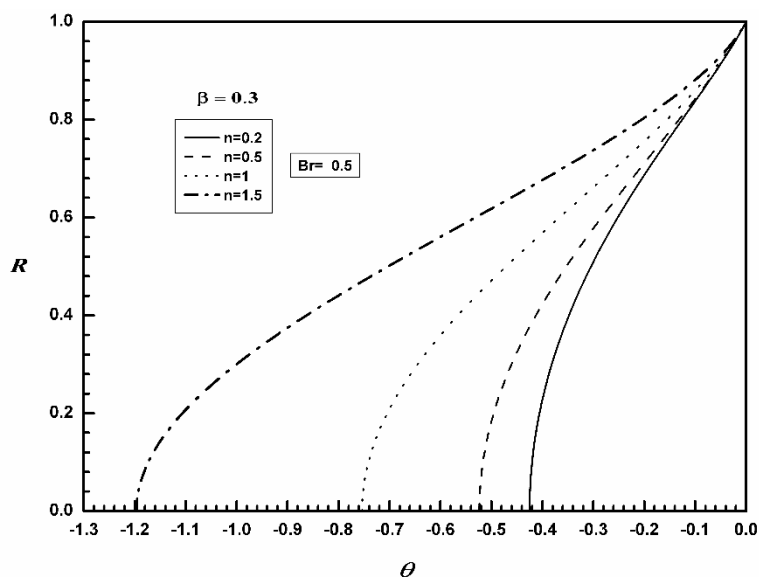
شکل ۴-۹: تغییرات دمایی بعد از لغزش برای سیال دایلاتنت نشان می‌دهد. همان طور که قبلاً توضیح داده شد افزایش شاخص پاور لا به خصوص برای سیالات دایلاتنت باعث افزایش ویسکوزیته ظاهری سیال و در نتیجه افزایش تاثیر تلفات ویسکوزیته می‌شود؛ بنابراین همان طور که در شکل ۴-۹ مشخص می‌باشد با وجود اینکه مقدار برینکمن برابر شکل ۴-۸ می‌باشد ولی مشاهده می‌شود که برای حالت هایی که طول لغزش برابر صفر، $0/1$ و $0/01$ می‌باشد نه تنها شار سرمایشی تاثیری بر سرمایش سیال داخل میکروکانال نداشته بلکه گرمای ناشی از تلفات ویسکوزیته بر شار سرمایشی غلبه کرده و باعث گرمایش سیال شده است که این نشان دهنده تاثیر چشمگیر تلفات ویسکوزیته برای سیال دایلاتنت می‌باشد که با وجود این که شرایط لغزش در دیواره را لحاظ کردیم ولی باز هم اثر منبع گرمایی غالب بر شار سرمایشی بوده است.



شکل ۴-۹: تغییرات دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف در فرایند سرمایش برای سیال دایلاتنت

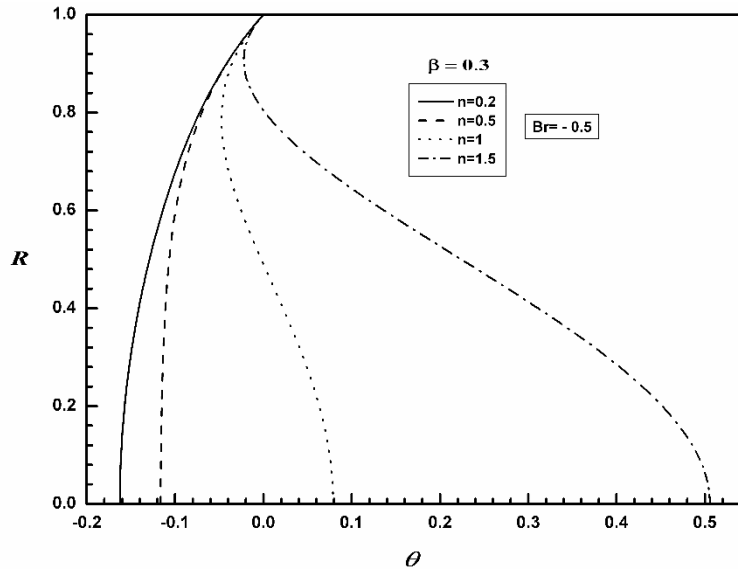
۴-۲-۴ تحلیل میدان دمایی در فرایند های سرمایش و گرمایش

شکل ۴-۱۰ تغییرات توزیع دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا در یک سرعت لغزش ثابت و معین برای فرایند گرمایش نشان داده است. دمای دیواره برای هر شاخص پاورلا مشخص ثابت می باشد؛ اما با افزایش شاخص پاورلا مشاهده می شود که اختلاف دمای سیال و دیواره به طور محسوسی افزایش پیدا می کند، چون که تلفات ویسکوزیته را در نظر گرفتیم بنابراین با افزایش شاخص پاورلا گرمای تولیدی تلفات ویسکوزیته در دیواره افزایش پیدا می کند و این عامل سبب می شود که دمای دیواره نیز به شدت افزایش پیدا کند و در نتیجه اختلاف دمای سیال و دیواره در مقطع عرضی میکروکانال با علامت منفی افزایش پیدا کند. با مقایسه شکل ۴-۱۰ با شکل ۳-۳ فصل سوم، مشخص می باشد که وقتی لغزش روی دیواره وجود داشته باشد اختلاف دمای سیال و دیواره کاهش پیدا می کند زیرا علاوه بر این که با وجود لغزش در دیواره سرعت هسته جریان کاهش پیدا می کند و جریان زمان بیشتری برای جذب گرما دارد، افزایش دمای دیواره نیز در حالت لغزش کمتر می باشد.



شکل ۴-۱۰: تغییرات دمایی بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین برای فرایند گرمایش

شکل ۴-۱۱: تغییرات توزیع دمایی بی بعد را در شاخص های مختلف پاورلا در یک سرعت لغزش یکسان، برای فرایند سرمایش نشان می دهد. برای سیالات دایلاتنت و نیوتنی با شاخص های پاورلا ۱/۵ و ۱ مشاهده می شود که علامت توزیع دمایی بی بعد زمانی که از دیواره به سمت مرکز میکروکانال حرکت می کنیم از منفی به مثبت تغییر پیدا می کند زیرا در این نوع سیالات، اثر منبع گرمایی داخلی بیشتر از شار سرمایشی می باشد و سیال در حال گرم شدن می باشد، در حالی که برای سیالات شبه پلاستیک با شاخص پاورلا ۰/۵ و ۰/۲ مشاهده می شود که در تمام مقطع عرضی میکروکانال علامت اختلاف دمایی سیال و دیواره مثبت می باشد و دمایی میانگین سیال بیشتر از دمایی دیواره می باشد که مطابق انتظار می باشد، زیرا همان طور که قبلا اشاره شد تاثیر تلفات ویسکوزیته برای سیالات شبه پلاستیک بسیار کمتر از سیالات دایلاتنت می باشد و هم چنین وجود شرط لغزش در دیواره باعث کاهش اثر تلفات ویسکوزیته می شود و این دو عامل باعث شده است که برای سیالات شبه پلاستیک شار سرمایشی بر گرمایی تولیدی از تلفات ویسکوزیته غلبه کند.

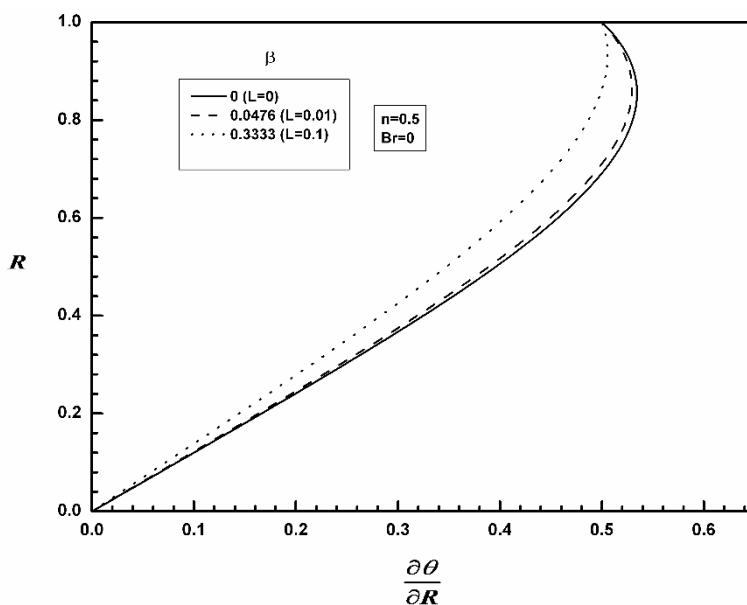


شکل ۴-۱۱: تغییرات دمایی بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین برای فرایند سرمایش

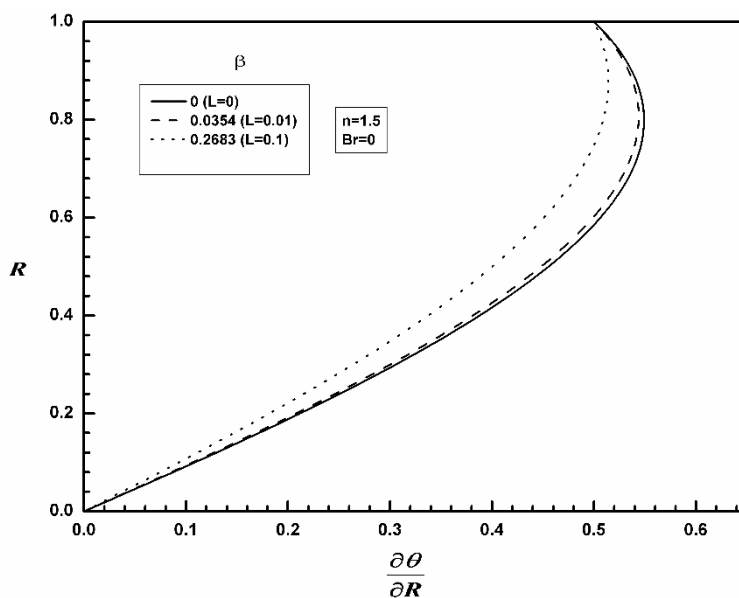
۴-۲-۵ تحلیل گرادیان دمایی بی بعد بدون تلفات ویسکوزیته

در این بخش تغییرات گرادیان دمایی شعاعی که در حقیقت نشان دهنده اثر انتقال حرارت هدایتی در راستای شعاعی می باشد را مورد بررسی قرار می دهیم. تغییرات گرادیان دمایی شعاعی بی بعد برای سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت در سرعت های لغزش مختلف در حالتیکه تلفات ویسکوزیته وجود ندارد، به ترتیب در شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. همان طور که از نمودار ها مشخص می باشد با افزایش ضریب لغزش یا سرعت بی بعد در دیواره، مقدار گرادیان دما در میکروکانال کاهش پیدا می کند که این رفتار برای هر دو نوع سیال شبه پلاستیک و دایلاتنت قابل مشاهده می باشد، زیرا هنگامی که سرعت لغزش در دیواره افزایش پیدا می کند در حقیقت سرعت سیال چسبیده به دیواره و نواحی نزدیک به دیواره افزایش پیدا می کند و این باعث می شود که سهم انتقال حرارت جابجایی نسبت به انتقال حرارت هدایتی افزایش پیدا کند در نتیجه، اثر انتقال حرارت هدایتی کاهش پیدا کند؛ هم چنین مشاهده می شود که وقتی از دیواره میکروکانال به سمت مرکز میکروکانال حرکت می کنیم گرادیان دما ابتدا افزایش پیدا می کند که این افزایش به دلیل بیشتر بودن انتقال حرارت هدایتی در مایعات نسبت به جامدات (روی دیواره میکروکانال) و هم چنین افزایش حرکت جنبشی مولکول های سیال نزدیکه دیواره می باشد و سپس پس از رسیدن به ماکزیمم

مقدار خود، شروع به کاهش می کند که در این نقطه انتقال حرارت جابجایی غلبه می کند بر انتقال حرارت هدایتی؛ هم چنین مشخص می باشد که با افزایش ضریب لغزش، مقدار ماکزیمم گرادیان دما شعاعی کاهش می یابد و سریع تر رخ می دهد.



شکل ۴-۱۲: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک

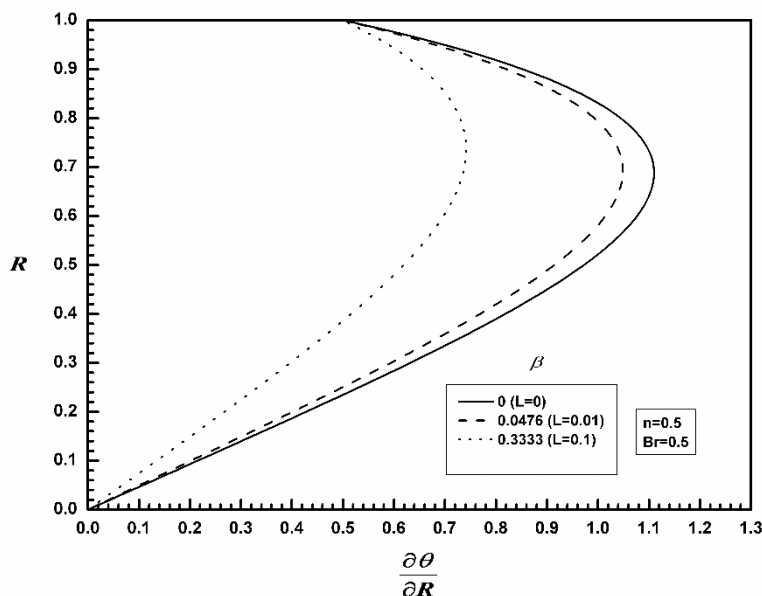


شکل ۴-۱۳: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت

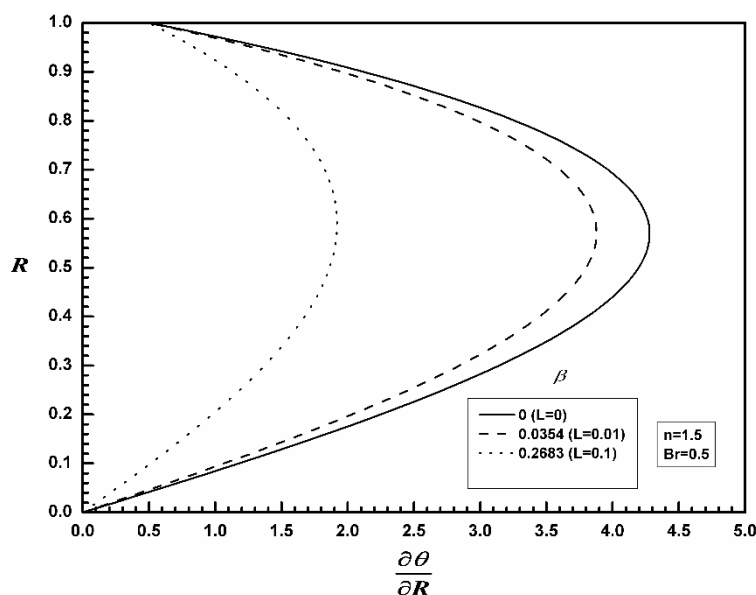
۴-۲-۶ تحلیل گرادیان دمای بی بعد در فرایند گرمایش

در شکل ۴-۱۴ و شکل ۴-۱۵ تلفات ویسکوزیته در دیواره با فرض فرایند گرمایشی در نظر

گرفته شده. مشخص می‌باشد زمانی که تلفات ویسکوزیته را در دیواره در نظر می‌گیریم رفتار کلی گرادیان دما مشابه حالتی می‌باشد که از تلفات ویسکوزیته صرف نظر شده است ولی مقادیر گرادیان دما به طور محسوسی در مقطع عرضی میکروکانال افزایش پیدا می‌کند، زیرا گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته در دیواره به وسیله انتقال حرارت هدایتی پخش می‌شود و این عامل سبب افزایش گرادیان دما می‌شود، البته با مقایسه شکل ۴-۱۴ و شکل ۴-۱۵ مشخص می‌باشد که افزایش انتقال حرارت هدایتی برای سیال دایلاتنت بیشتر بوده و باعث افزایش بیشتر در گرادیان دما می‌شود. قابل ذکر می‌باشد که در سرعت‌های لغزش بالا، مشاهده می‌شود که علی‌رغم در نظر گرفتن تلفات ویسکوزیته در دیواره، تغییر محسوسی در مقدار گرادیان دما ظاهر نشده و این نشان دهنده تاثیر شدید سرعت لغزش بر روی انتقال حرارت جابجایی می‌باشد.



شکل ۴-۱۴: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش‌های مختلف برای سیال شبه پلاستیک

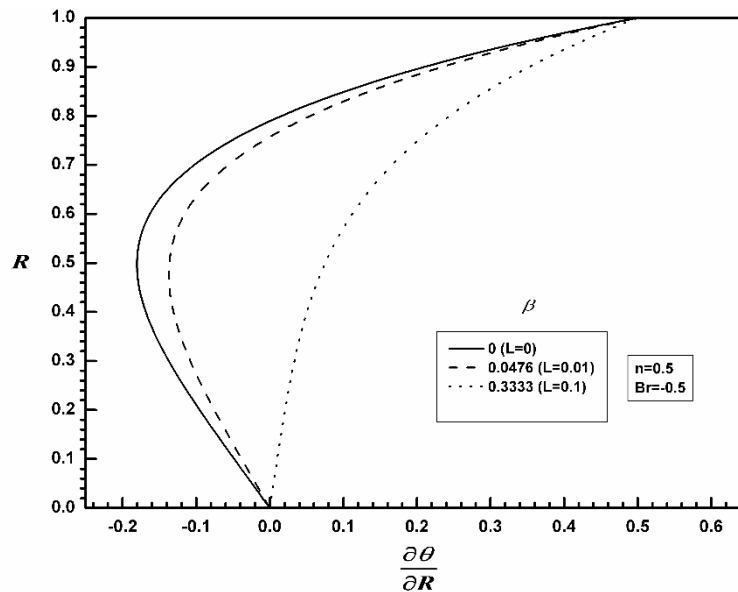


شکل ۴-۱۵: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت

۴-۲-۷ تحلیل گرادیان دمای بی بعد در فرایند سرمایشی

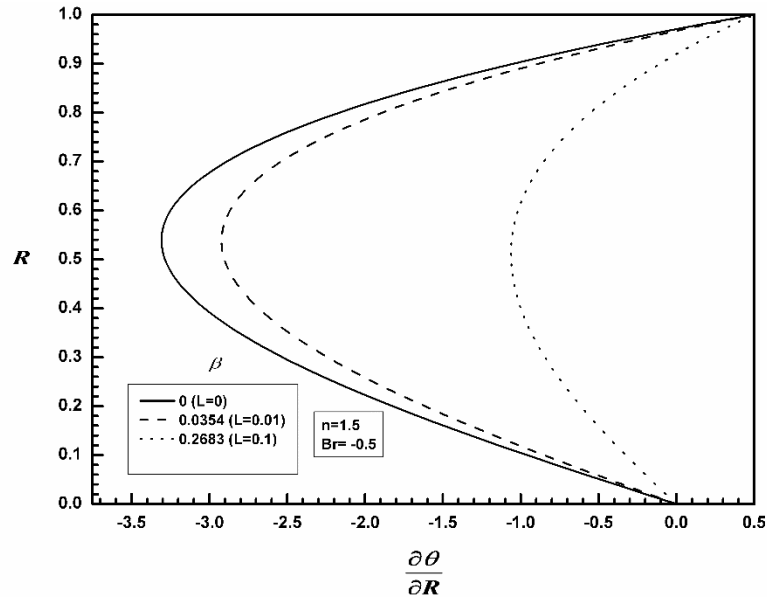
تغییرات گرادیان دما برای سیال شبه پلاستیک در سرعت‌های لغزش متفاوت برای فرایند سرمایش در شکل ۴-۱۶ نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای سرعت لغزش برابر 0.333 گرادیان دما در تمام مقطع عرضی میکروکانال مثبت می‌باشد، در حقیقت نشان دهنده این باشد که در این سرعت‌های لغزش، سیال در حال خنک شدن می‌باشد و شار سرمایشی بر گرمای تولیدی از تلفات ویسکوزیته غلبه کرده است؛ هم‌چنین در این دو حالت بیشترین مقدار گرادیان دما در خود دیواره بوده که بیانگر انتقال غالب انتقال حرارت جابجایی در تمام مقطع عرضی میکروکانال بر انتقال حرارت هدایتی می‌باشد. برای سرعت لغزش 0.476 و حالت بدون لغزش مشاهده می‌شود گرادیان دما در حرکت از سمت دیواره به سمت مرکز میکروکانال از مثبت به منفی تغییر علامت می‌دهد و این نشان دهنده این می‌باشد که شار سرمایشی در کل مقطع میکروکانال بر گرمای ناشی از تلفات ویسکوزیته غلبه نکرده است؛ با توجه به نمودار مشخص می‌باشد که در این دو حالت نیز ماکزیمم مقدار گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره بوده و سپس گرادیان دما روند کاهشی دارد تا این که به مقدار صفر رسد و سپس با علامت منفی شروع به افزایش می‌کند و سپس به سمت صفر میل

می‌کند؛ در حقیقت تغییر علامت گرادیان دما از مثبت به منفی، به این معنی می‌باشد که جهت انتقال حرارت هدایتی به تدریج عوض می‌شود و از دیواره به سمت مرکز می‌باشد؛ هم چنین با مقایسه شکل ۴-۱۴ و شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود با وجود اینکه مقدار برینکمن در هر دو شکل برابر می‌باشد ولی در حالت سرمایش به دلیل اینکه بخش قابل توجهی از گرمای تولیدی ناشی از ویسکوزیته به وسیله شار سرمایشی خنثی می‌شود ماکزیمم مقدار گرادیان دما در حالت سرمایش کمتر بوده.



شکل ۴-۱۶: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک در فرایند سرمایش

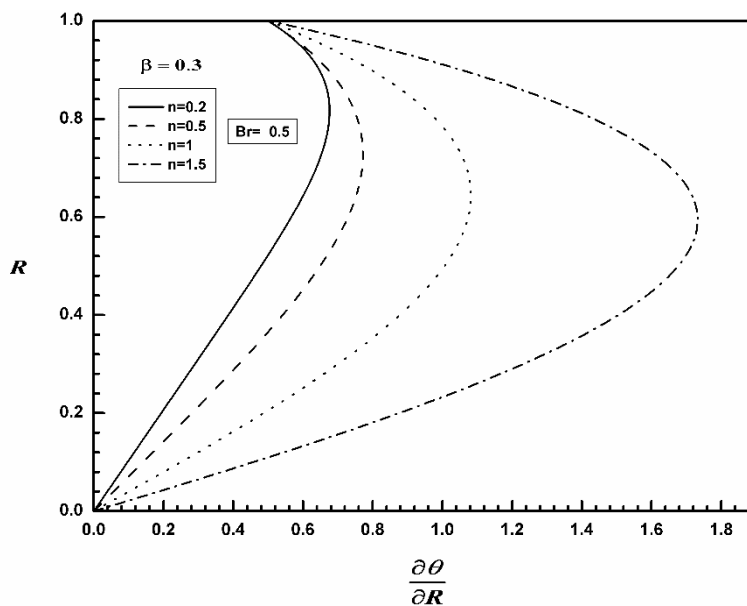
تغییرات رفتار گرادیان دما برای سرعت لغزش های متفاوت در فرایند سرمایشی، برای سیال دایلاتنت در شکل ۴-۱۷ رسم شده است. برای این سیال مشاهده می‌شود که برای تمامی سرعت های لغزش، علامت گرادیان دما به جز نواحی نزدیک دیواره که به شدت تحت تاثیر گرمای ناشی از تلفات ویسکوزیته می‌باشد در سایر نواحی میکروکانال منفی می‌باشد، در حقیقت نشان دهنده غالب بودن گرمای تولیدی ناشی از تلفات می‌باشد.



شکل ۴-۱۷: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت در فرایند سرمایش

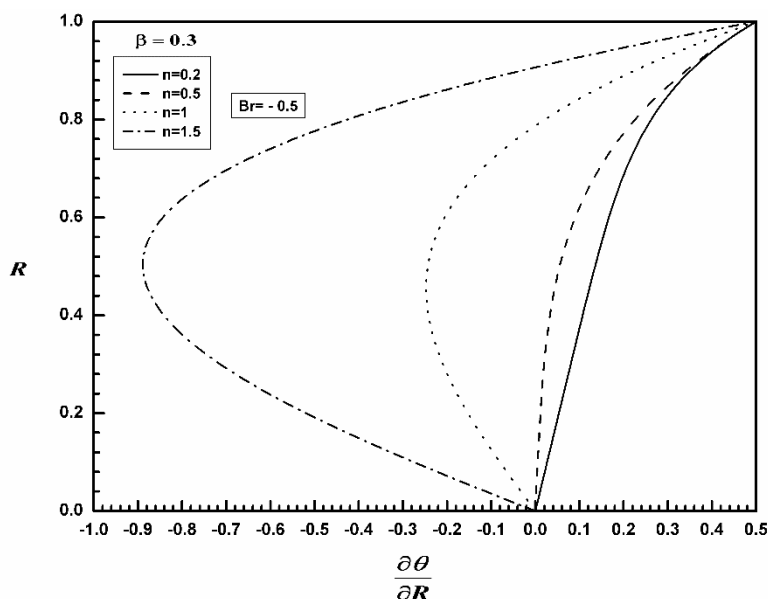
۴-۲-۸ تحلیل گرادیان دمای بی بعد در فرایند سرمایشی و گرمایشی

شکل ۴-۱۸ تغییرات گرادیان دما را در شاخص های مختلف پاورلا در یک سرعت لغزش ثابت، برای فرایند گرمایش نشان می دهد. از رفتار نمودار مشخص می باشد که با افزایش شاخص پاورلا، گرادیان دما به طور کلی در میکروکانال افزایش پیدا می کند، زیرا با افزایش شاخص پاورلا مقدار سرعت و گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره کاهش پیدا می کند و این عامل سبب می شود که اثر انتقال حرارت جابجایی دیرتر بر انتقال حرارت هدایتی غلبه کند و طبیعتاً در فاصله بیشتری از دیواره گرادیان دما به ماکزیمم مقدار خود برسد و از طرفی با افزایش شاخص پاورلا، گرمای پخش شده توسط انتقال حرارت هدایتی افزایش پیدا می کند و در نتیجه ماکزیمم مقدار گرادیان دما برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد.



شکل ۴-۱۸: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین

اثر تغییرات شاخص پاورلا بر روی گرادیان دما در یک سرعت لغزش ثابت در دیواره برای فرایند سرمایش در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. همان طور که از نمودار مشخص می‌باشد برای سیالات شبه پلاستیک با شاخص پاورلا ۰/۲ و ۰/۵، شار سرمایشی بر گرمای تولیدی از تلفات ویسکوزیته غلبه کرده است. برای سیال نیوتنی و سیال برشی ضخیم با شاخص پاورلا ۱/۵، مشاهده می‌شود که گرادیان دما از دیواره به سمت مرکز میکروکانال تغییر علامت می‌دهد زیرا، ابتدا انتقال حرارت هدایتی از سمت سیال به سمت دیواره می‌باشد و به تدریج جهت انتقال حرارت هدایتی از دیواره به سمت سیال می‌باشد، در نتیجه گرادیان دما افزایش می‌یابد تا نقطه ای که انتقال حرارت جابجایی بر انتقال حرارت هدایتی غالب شود.



شکل ۴-۱۹: تغییرات گرادیان دمای بی بعد در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین در فرایند سرمایش

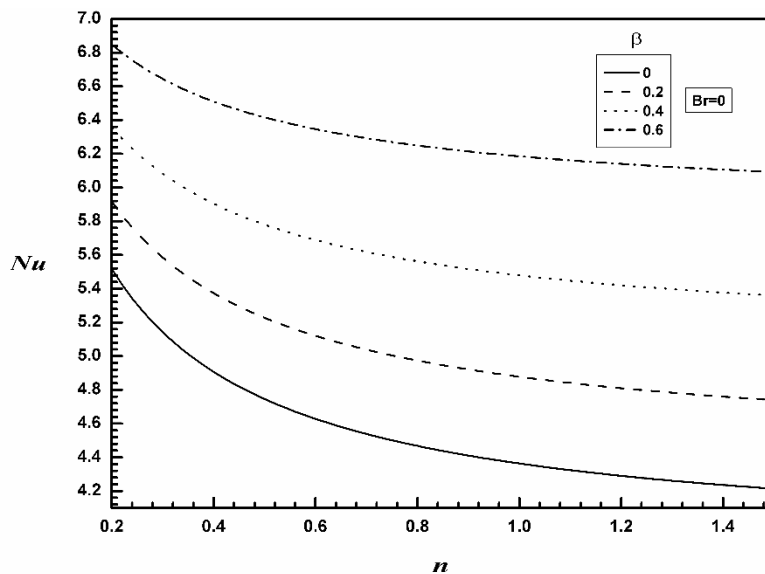
۴-۳ تحلیل عدد ناسلت

در این بخش به تحلیل عدد بی بعد ناسلت در حالتی که در دیواره لغزش وجود دارد می پردازیم. همان طور که قبلا اشاره شد عدد ناسلت نشان دهنده نسبت انتقال حرارت ناشی از حرکت کپه ای و پخشی سیال (جابجایی) به انتقال حرارت ناشی از حرکت پخشی سیال (هدایت) می باشد که بر اساس مفهوم دمای میانگین بی بعد بیان می شود.

۴-۳-۱ تحلیل عدد ناسلت بدون تلفات ویسکوزیته

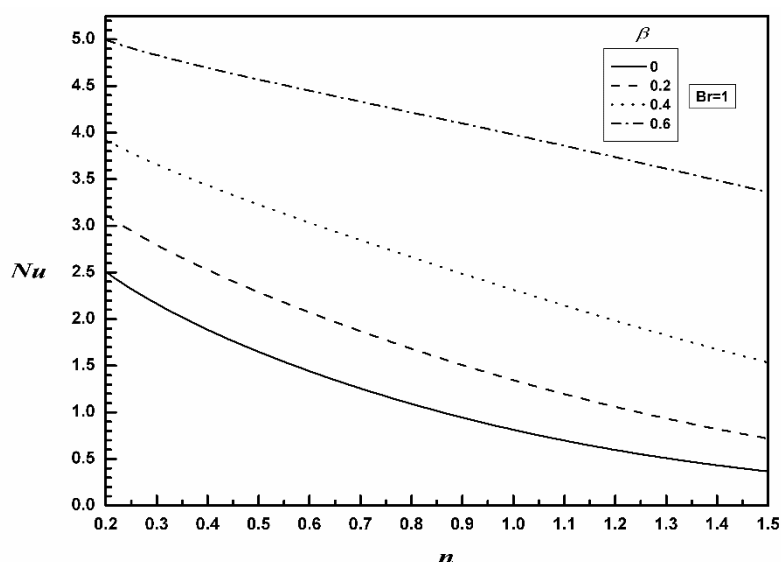
همان طور که در شکل ۴-۲۰ مشاهده می شود تغییرات ناسلت با شاخص پاورلا، در سرعت لغزش های مختلف برای حالتی که تلفات نداریم رسم شده است. در این حالت با افزایش شاخص پاورلا در هر سرعت لغزش معین، مقدار ناسلت کاهش پیدا می کند زیرا که با افزایش شاخص پاورلا در حقیقت مقدار سرعت و گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره میکروکانال کاهش پیدا می کند و موجب کاهش سهم انتقال حرارت جابجایی می شود. هم چنین می توان گفت به دلیل این که از تلفات ویسکوزیته صرف نظر کرده ایم با افزایش شاخص پاورلا در حقیقت دمای میانگین سیال کاهش می یابد و دمای سطح تغییری نمی کند، در نتیجه اختلاف دمای میانگین سیال و دمای دیواره افزایش

پیدا می‌کند که موجب کاهش عدد ناسلت می‌شود. در صورتی که شاخص پاورلا را به سمت بی نهایت میل دهیم، در هر سرعت لغزش معین ناسلت به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود که به صورت زیر م باشد؛ در سرعت لغزش‌های صفر، $0/2$ ، $0/4$ و $0/6$ به ترتیب عدد ناسلت به $3/871$ ، $4/4118$ ، $5/076$ و $5/871$ میل می‌کند. مشاهده می‌شود هرچه سرعت لغزش در دیواره افزایش پیدا کند ناسلت نهایتاً به مقدار بزرگتری همگرا می‌شود. هم چنین مشاهده می‌شود که افزایش ناسلت به ازای افزایش سرعت لغزش برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می‌باشد به طوریکه اگر سرعت لغزش را $0/6$ در نظر بگیریم، درصد افزایش ناسلت برای سیال دایلاتنت با شاخص پاورلا $1/5$ برابر $44/568\%$ می‌باشد در صورتی که برای سیال شبه پلاستیک با شاخص پاورلا $0/2$ برابر $24/14\%$ می‌باشد، در حقیقت این نشان دهنده تاثیر بیشتر سرعت لغزش بر روی سیالات دایلاتنت می‌باشد؛ زیرا همان طور که در شکل ۲-۴ اشاره شد، رفتار توزیع سرعت سیالات شبه پلاستیک یکنواخت تر از سیالات دایلاتنت می‌باشد در نتیجه افزایش سرعت لغزش در دیواره موجب افزایش بیشتر انتقال حرارت جابجایی نزدیک دیواره برای سیالات دایلاتنت می‌شود، علی‌رغم این که سرعت و گرادیان سرعت نزدیک دیواره برای سیالات دایلاتنت کمتر از شبه پلاستیک می‌باشد.



شکل ۲-۴: تغییرات ناسلت در ضریب لغزش های متفاوت

در شکل ۴-۲۱ تغییرات ناسلت را برای حالتی که تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود دارد بررسی می‌کنیم. همان طور که از نمودار پیداست در این حالت رفتار کلی ناسلت مشابه حالت بدون تلفات می‌باشد با این تفاوت که با افزایش شاخص پاورلا ناسلت به سیر نزولی خود ادامه می‌دهد به طوریکه وقتی شاخص پاورلا به سمت بی‌نهایت میل کند، ناسلت به سمت صفر همگرا می‌شود که در حقیقت به خاطر رشد دمای میانگین سیال می‌باشد، البته لازم به ذکر می‌باشد با افزایش گرمای تولیدی تلفات ویسکوزیته در حقیقت دمای دیواره میکروکانال هم افزایش پیدا می‌کند و در مجموع اختلاف دمای دیواره و دمای میانگین سیال افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند.

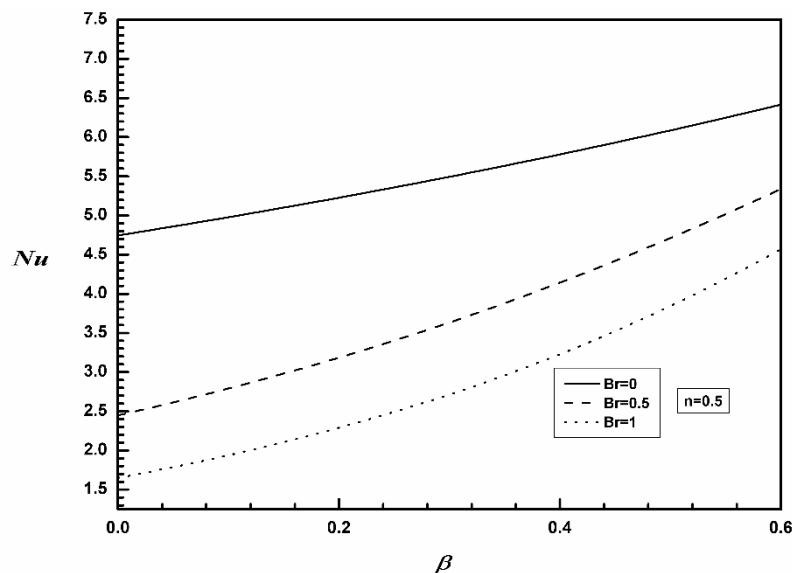


شکل ۴-۲۱: تغییرات ناسلت در ضریب لغزش های متفاوت

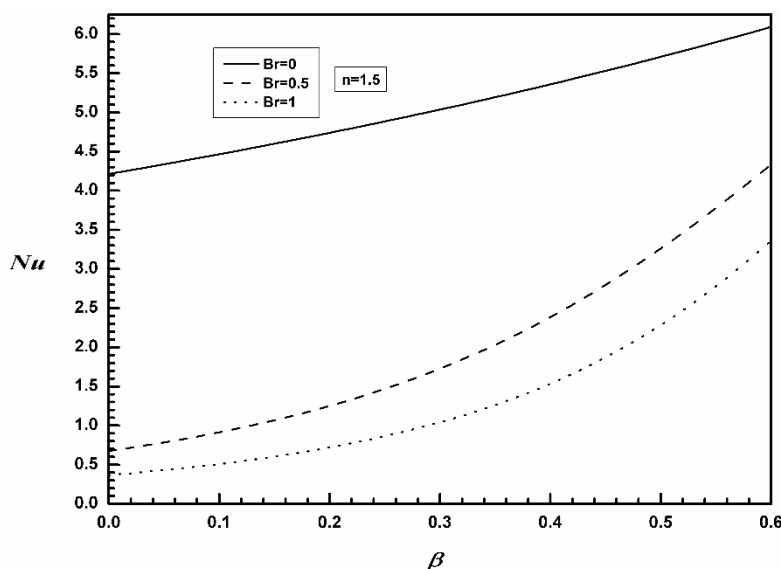
۴-۳-۲ تحلیل عدد ناسلت در فرایند گرمایش

تغییرات ناسلت به عنوان تابعی از سرعت لغزش در برینکمن‌های مختلف، برای سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت، به ترتیب در شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. همان طور که از نمودارها مشخص می‌باشد، با افزایش سرعت لغزش مقدار ناسلت به طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند که در حقیقت به خاطر افزایش سرعت جریان نزدیک دیواره و کاهش گرمای تولیدی تلفات ویسکوزیته می‌باشد که این دو عوامل سبب افزایش انتقال حرارت جابجایی نزدیک دیواره و

کاهش انتقال حرارت هدایتی می شود. با مقایسه دو شکل ۲۲-۴ و شکل ۲۳-۴ مشاهده می شود که میزان افزایش ناسلت برای سیال دایلاتنت بیشتر از شبه پلاستیک می باشد که در شکل ۲۰-۴ کامل توضیح داده شد. با افزایش برینکمن ناسلت به شکل محسوسی کاهش پیدا می کند زیرا، مقدار گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته به شدت افزایش پیدا می کند و این سبب افزایش دمای میانگین سیال و دمای دیواره می شود؛ اما از نظر فیزیکی با افزایش مقدار برینکمن در حقیقت سهم انتقال حرارت هدایتی در نزدیک دیواره افزایش پیدا می کند. هم چنین با مقایسه شکل ۲۲-۴ و شکل ۲۳-۴ مشخص می باشد که کاهش ناسلت در یک سرعت لغزش ثابت به ازای افزایش یکسان برینکمن، برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد به طوری که در شکل ۲۲-۴ به ازای افزایش برینکمن از صفر تا یک در سرعت لغزش ۰/۲، مقدار ناسلت ۵۶/۲٪ کاهش پیدا می کند در حالی که در شکل ۲۳-۴ با شرایط مشابه، مقدار ناسلت ۸۴/۸٪ کاهش پیدا می کند که این نشان دهنده بیشتر بودن تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی ناسلت برای سیالات دایلاتنت می باشد.



شکل ۲۲-۴: تغییرات ناسلت در برینکمن های مختلف برای سیال شبه پلاستیک

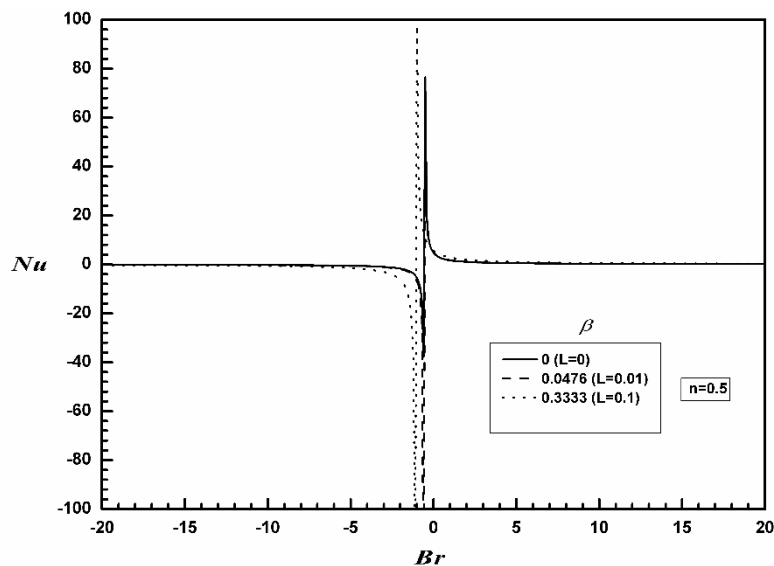


شکل ۴-۲۳: تغییرات ناسلت در برینکمن های مختلف برای سیال دایلاتنت

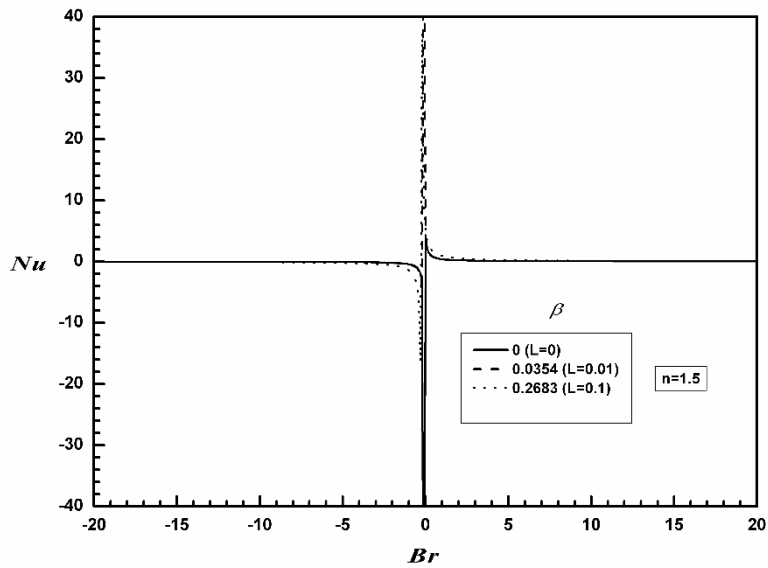
۴-۳-۳ تحلیل عدد ناسلت در فرایند گرمایش و سرمایش

شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵ تغییرات ناسلت را در سرعت های لغزش مختلف به ترتیب برای سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت، در فرایند سرمایشی و گرمایشی نشان می دهد. همان طور که مشخص می باشد در هر دو شکل مقدار ناسلت در برینکمن خاصی (برینکمن بحرانی) به مثبت یا منفی بی نهایت میل می کند؛ همان طور که در فصل سوم بدان اشاره شد در برینکمن بحرانی دمای میانگین سیال برابر با دمای دیواره می شود. همان طور که مشخص می باشد هر چه سرعت لغزش در دیواره بیشتر باشد نقطه تکین ناسلت در برینکمن بحرانی بزرگتری رخ می دهد که دقیقاً مطابق انتظار می باشد زیرا، با افزایش سرعت لغزش عملاً اصطکاک و چسبندگی سیال کاهش پیدا می کند در نتیجه اثر گرمای تولیدی تلفات ویسکوزیته کاهش پیدا می کند و مقدار برینکمن باید بیشتر باشد تا گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته برابر با شار سرمایشی وارده به سطح باشد. به طوریکه، در شکل ۴-۲۴ برای سیال شبه پلاستیک برای سرعت لغزش برابر $0/3333$ مقدار برینکمن بحرانی برابر با $1/047$ می باشد در حالیکه برای سرعت لغزش های کمتر، مقادیر برینکمن بحرانی کوچکتر می باشد، هم چنین در شکل ۴-۲۵ برای سیال دایلاتنت مشاهده می شود که برای ضریب لغزش $0/2683$ مقدار برینکمن بحرانی $6/654$ می باشد که نسبت به سیال شبه پلاستیک با طول لغزش

یکسان، مقدار برینکمن بحرانی کمتر می‌باشد. در مورد تحلیل کلی رفتار ناسلت برای هر دو نوع سیال شبه‌پلاستیک و دایلاتنت در هر سرعت لغزش معین می‌توان گفت که، در بازه $-\infty < Br < Br_c$ با کاهش مقدار برینکمن، قدر مطلق ناسلت افزایش پیدا می‌کند زیرا اثر گرمای تولیدی تلفات ویسکوزیته غالب می‌باشد بر شار سرمایشی، سپس در همسایگی برینکمن بحرانی افزایش ناگهانی در ناسلت رخ می‌دهد که ناشی از کاهش شدید انتقال حرارت بین سیال و دیواره می‌باشد، در بازه $Br_c < Br \leq 0$ اثر شار سرمایشی بر گرمای تولیدی از تلفات ویسکوزیته غالب می‌باشد و ناسلت به شدت کاهش پیدا می‌کند و نهایتاً در بازه $0 < Br$ که شروع فرایند گرمایش می‌باشد و ناسلت به تدریج کاهش می‌یابد و به صفر میل می‌کند؛ زیرا با افزایش برینکمن مقدار انتقال حرارت هدایتی نزدیک دیواره به شدت افزایش پیدا می‌کند که موجب کاهش ناسلت می‌گردد.



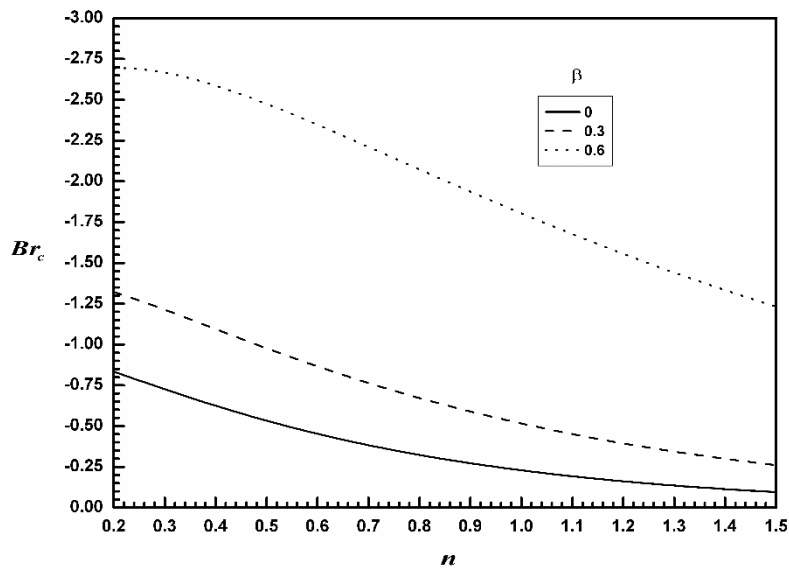
شکل ۴-۲۴: تغییرات ناسلت در ضریب لغزش‌های مختلف برای سیال شبه‌پلاستیک در فرایند سرمایش و گرمایش



شکل ۴-۲۵: تغییرات ناسلت در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت در فرایند سرمایش و گرمایش

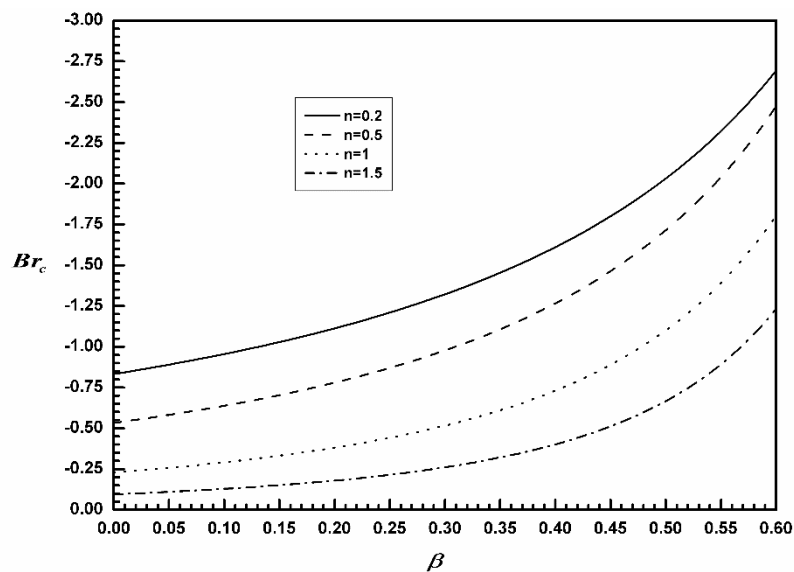
۴-۳-۴ تحلیل برینکمن بحرانی

تغییرات برینکمن بحرانی با شاخص پاورلا در سرعت های مختلف لغزش های مختلف در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است. در هر سرعت لغزش معین با افزایش شاخص پاورلا، مقدار برینکمن بحرانی کاهش پیدا می کند، زیرا با افزایش شاخص پاورلا در حقیقت به دلیل افزایش تاثیر تلفات ویسکوزیته، دمای میانگین سیال افزایش یافته در نتیجه در برینکمن کوچکتری دمای میانگین سیال برابر دمای دیواره می شود.



شکل ۴-۲۶: تغییرات برینکمن بحرانی در ضریب لغزش های مختلف

شکل ۴-۲۷ تغییرات برینکمن بحرانی را در برابر سرعت لغزش به ازای شاخص های مختلف پاورلا نشان می دهد. با افزایش سرعت لغزش مقدار برینکمن بحرانی به صورت یکنواختی افزایش پیدا می کند که بیان گر این موضوع است که گرمای بیشتری از تولید تلفات ویسکوزیته نیاز می باشد تا دمای میانگین سیال برابر با دمای دیواره شود زیرا که هر چه سرعت لغزش در دیواره افزایش پیدا کند تاثیر تلفات ویسکوزیته کاهش پیدا می کند.



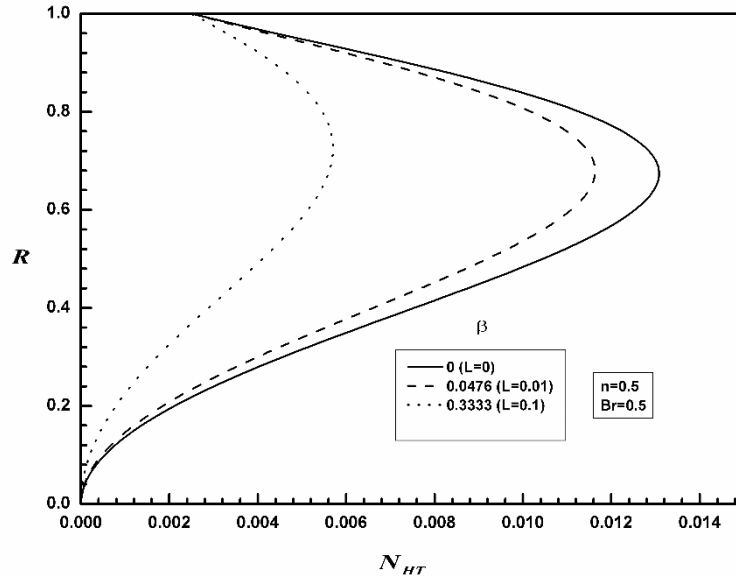
شکل ۴-۲۷: تغییرات برینکمن بحرانی در شاخص های مختلف پاورلا

۴-۴ تحلیل تولید انتروپی

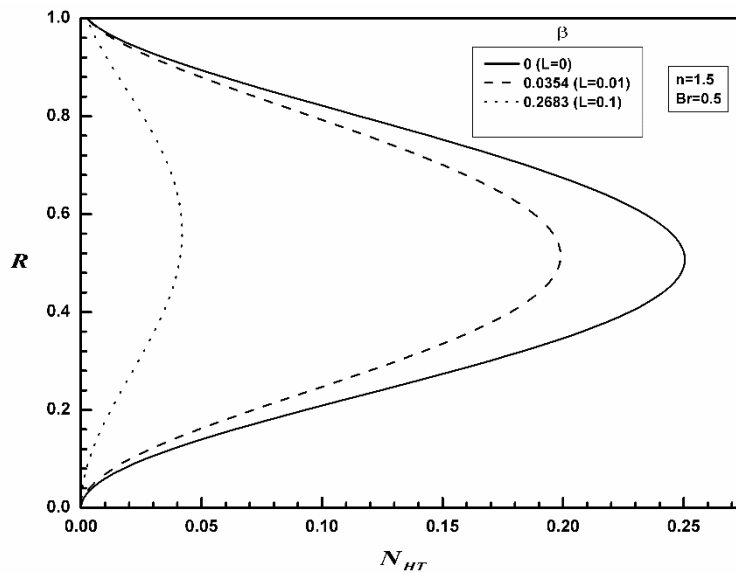
در فرایندهایی که پدیده انتقال حرارت وجود دارد همیشه همراه با تولید انتروپی خواهد بود که باعث تخریب کار مفید سیستم می‌شود، بنابراین باید بازگشت ناپذیری‌های فرایند شامل انتقال حرارت مورد بررسی قرار گیرد و نحوه عملکرد تولید انتروپی و طریقه کاهش آن را تحلیل و بررسی نماییم. در این قسمت برای عبارت گروه بی بعد پرانتل در رینولدز که به صورت عدد پکلت بیان می‌شود مقدار ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است، و هم چنین برای عبارت $\frac{\mu}{k}$ که بیان کننده شار حرارتی بی بعد می‌باشد مقدار ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

۴-۴-۱ تحلیل تولید انتروپی حرارتی

تغییرات بازگشت ناپذیری حرارتی در سرعت‌های لغزش مختلف برای سیالات شبه‌پلاستیک و دایلاتنت به ترتیب در شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص می‌باشد برای هر دو نوع سیال شبه‌پلاستیک و دایلاتنت، با افزایش سرعت لغزش در دیواره مقدار بازگشت ناپذیری حرارتی کاهش پیدا می‌کند، زیرا با افزایش سرعت لغزش در دیواره، گرادیان سرعت نزدیک دیواره کاهش ولی سرعت نزدیک دیواره افزایش پیدا می‌کند که این عامل باعث کاهش گرمای تولید شده در دیواره و کاهش سهم انتقال حرارت هدایتی در راستای شعاعی می‌شود و نتیجتاً مقدار تولید انتروپی حرارتی کاهش پیدا می‌کند. با مقایسه شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ با شکل ۴-۱۴ و شکل ۴-۱۵ آشکار می‌باشد که رفتار نمودار گرادیان دمای شعاعی بسیار منطبق بر رفتار بازگشت ناپذیری حرارتی می‌باشد که در حقیقت این خود نشان دهنده تاثیر بسیار بالا انتقال حرارت هدایتی در راستای شعاعی بر روی تولید انتروپی حرارتی می‌باشد. همان‌طور که از توضیحات بالا مشخص می‌باشد در صورتی که سطح میکروکانال از جنس‌های فوق‌العاده آب‌گریز استفاده شود تا طول لغزش افزایش پیدا کند و به تبع آن سرعت لغزش افزایش یابد مقدار بازگشت ناپذیری حرارتی به طور چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند که با مقایسه شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ مشاهده می‌شود که، این کاهش در سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات شبه‌پلاستیک می‌باشد.



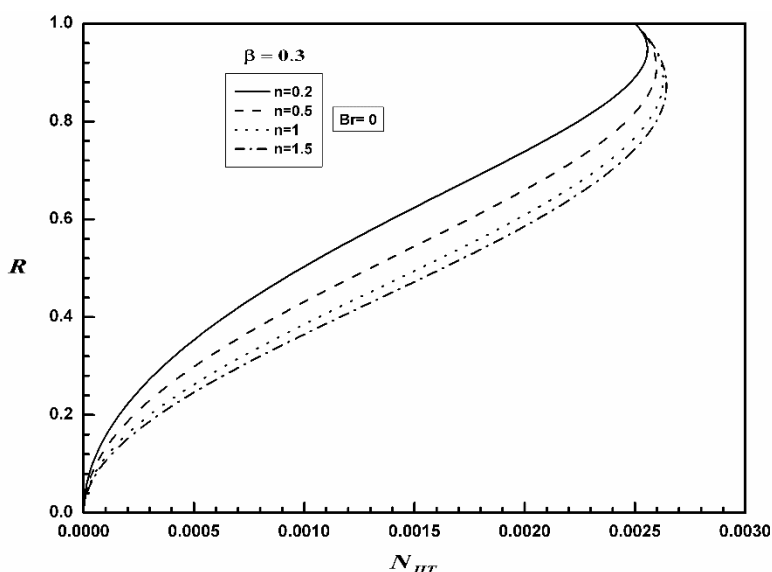
شکل ۴-۲۸: تغییرات تولید انتروپی حرارتی در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک



شکل ۴-۲۹: تغییرات تولید انتروپی حرارتی در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت

شکل ۴-۳۰ تغییرات تولید انتروپی حرارتی را برای سیالات شبه پلاستیک، نیوتنی و دایلاتنت در یک سرعت لغزش معین برای حالتی که از تلفات ویسکوزیته صرف نظر شده نشان می دهد. همان طور که مشخص می باشد با افزایش شاخص پاورلا، مقدار بازگشت ناپذیری حرارتی در کل مقطع میکروکانال افزایش پیدا می کند؛ در حقیقت در این حالت که تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود ندارد عملاً با افزایش شاخص پاورلا به دلیل کاهش سرعت و گرادیان سرعت نزدیک دیواره، سهم انتقال

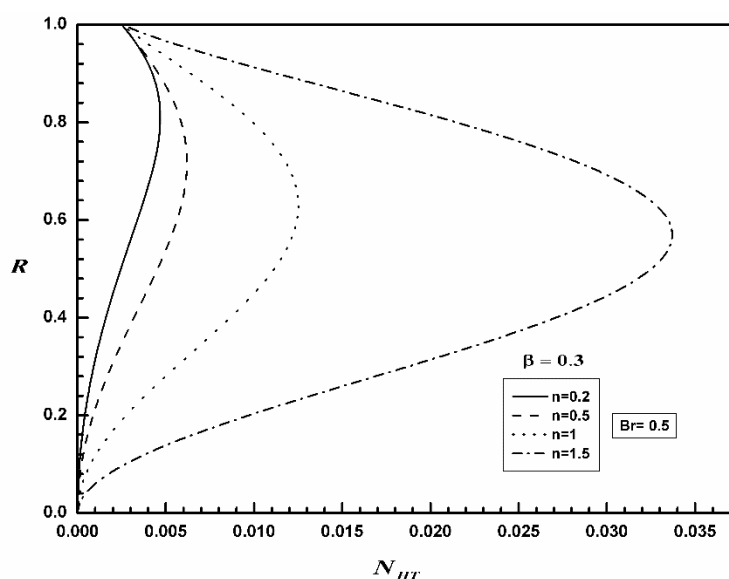
حرارت هدایتی در راستای شعاعی نسبت به انتقال حرارت جابجایی افزایش پیدا می‌کند و این سبب می‌شود که بازگشت ناپذیری حرارتی برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک باشد. بنابراین مشخص می‌باشد که استفاده از سیالات شبه پلاستیک به دلیل بازگشت ناپذیری کمتر حرارتی در سیستم، کارایی بهتری دارند و هم چنین راندمان سیستم افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۴-۳۰: تغییرات تولید انترویی حرارتی در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین

در واقعیت تاثیر وجود تلفات ویسکوزیته انکار ناپذیر می‌باشد، بنابراین در شکل ۴-۳۱ شرایط مشابه حالت قبل با این تفاوت که تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود دارد مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این حالت مشخص می‌باشد که بازگشت ناپذیری حرارتی نسبت به شکل ۴-۳۰ به شدت افزایش پیدا کرده است و این افزایش در تولید انترویی برای سیالات دایلاتنت محسوس تر می‌باشد؛ زیرا همان طور که پیش تر اشاره شد زمانی که تلفات ویسکوزیته در دیواره وجود دارد با افزایش شاخص پاورلا گرمای تولیدی توسط اصطکاک بین سیال و دیواره افزایش پیدا می‌کند و این در حالی است که با افزایش شاخص پاورلا سرعت‌های نزدیک دیواره کاهش پیدا می‌کند و این دو عامل سبب می‌شود که گرمای منتقل شده توسط انتقال حرارت هدایتی در راستای شعاعی به شدت افزایش پیدا کند که این نشان دهنده تاثیر بالا تلفات ویسکوزیته در بازگشت ناپذیری حرارتی می‌باشد. با توجه به

توضیحات بالا می‌توان نتیجه گرفت که برای کاهش تولید انترویی حرارتی سیستم چندین راهکار وجود دارد که عبارتند از: ۱- استفاده از میکروکانال‌هایی که سطوح داخلی آن‌ها آب گریز یا فوق العاده آب گریز باشد جهت کاهش اصطکاک بین سیال و دیواره ۲- حدالمقدور استفاده از پلیمرهایی که جز سیالات شبه پلاستیک باشد ۳- کاهش تلفات ویسکوزیته که می‌توان به وسیله کاهش برینکمن انجام داد که می‌تواند این کار را با افزایش ابعاد میکروکانال یا افزایش شار حرارتی وارده به سیستم انجام داد.

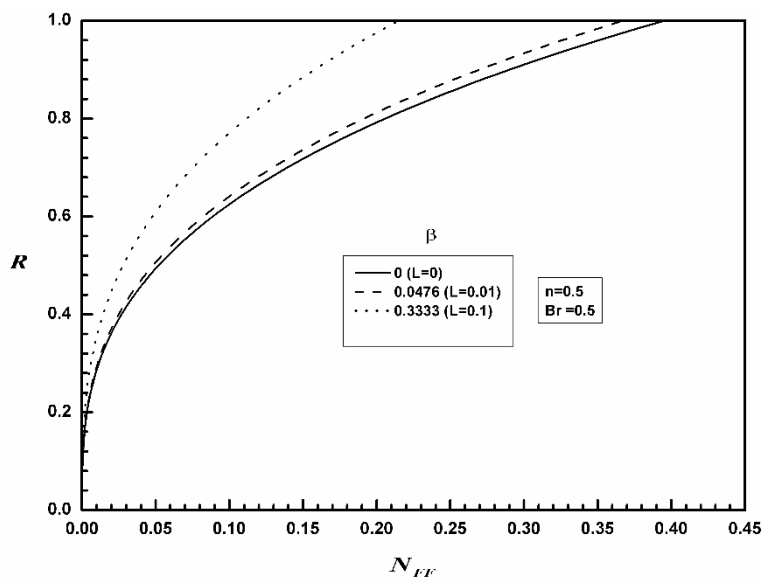


شکل ۴-۳۱: تغییرات تولید انترویی حرارتی در شاخص‌های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین

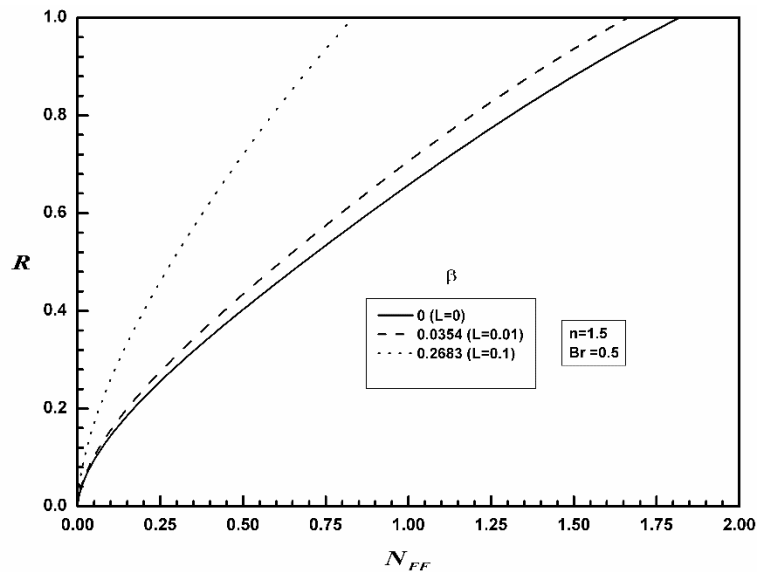
۴-۲ تحلیل تولید انترویی اصطکاکی

در این قسمت بازگشت ناپذیری مربوط به اصطکاک بین سیال و دیواره را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل ۴-۳۲ و شکل ۴-۳۳ رفتار تولید انترویی اصطکاکی در سرعت لغزش‌های مختلف به ترتیب برای سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت لغزش بر روی بازگشت ناپذیری اصطکاکی تاثیر بسزایی دارد به طوری‌که با افزایش سرعت لغزش مشاهده می‌شود که تولید انترویی اصطکاکی برای تمام سیالات، کاهش پیدا می‌کند و تاثیر سرعت لغزش بر روی بازگشت ناپذیری اصطکاکی برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات

شبه پلاستیک می باشد؛ در شکل ۴-۳۲ در سرعت لغزش $0/3333$ مقدار بازگشت ناپذیری اصطکاکی، $93/195\%$ نسبت به حالتی که لغزش نداریم کاهش پیدا می کند و در شکل ۴-۳۳ در سرعت لغزش $0/2683$ بازگشت ناپذیری اصطکاکی $97/874\%$ نسبت به حالت بدون لغزش کاهش پیدا می کند، در حقیقت تاثیر سرعت لغزش بر روی گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد. بنابراین کاهش اصطکاک بین سیال و دیواره، یک روش برای کاهش بازگشت ناپذیری های ناشی از اصطکاک می باشد.

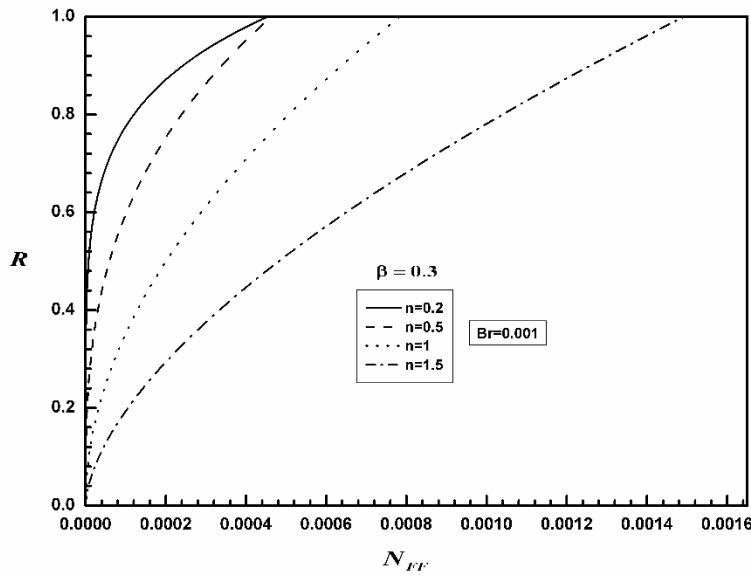


شکل ۴-۳۲: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه پلاستیک

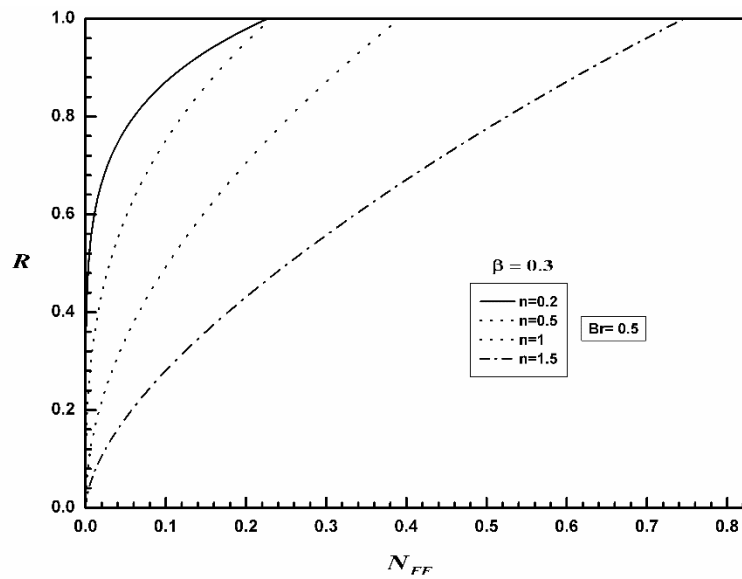


شکل ۴-۳۳: تغییرات تولید انترویی اصطکاکی در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت

تغییرات رفتار بازگشت ناپذیری اصطکاکی در شاخص های مختلف پاورلا در یک سرعت لغزش معین، برای دو مقدار برینکمن در شکل ۴-۳۴ و شکل ۴-۳۵ داده شده است. همان طور که در شکل ۴-۳۴ مشخص می باشد در این حالت مقدار برینکمن ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده که مقدار کمی می باشد و تاثیر تلفات ویسکوزیته کاهش پیدا می کند در نتیجه مقدار بازگشت ناپذیری اصطکاکی در مقایسه با شکل ۴-۳۵ که برای برینکمن ۰/۵ رسم شده است، به شدت کاهش پیدا کرده است و این نشان دهنده تاثیر تلفات ویسکوزیته بر روی تولید انترویی اصطکاکی می باشد. با افزایش شاخص پاورلا نیز مقدار بازگشت ناپذیری اصطکاکی افزایش پیدا می کند در حقیقت همان طور که قبلا اشاره شد، با افزایش شاخص پاورلا گرادیان سرعت نزدیک دیواره کاهش پیدا می کند ولی تاثیر تلفات ویسکوزیته افزایش پیدا می کند، زیرا برای سیالات دایلاتنت، با افزایش نرخ برش (کرنش برشی) ویسکوزیته ظاهری سیال افزایش پیدا می کند در حالی که برای سیالات شبه پلاستیک عکس این قضیه صحت دارد؛ بنابراین مشاهده می شود که تولید انترویی اصطکاکی برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می باشد.



شکل ۴-۳۴: تغییرات تولید انتروپی اصطکاکی در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین

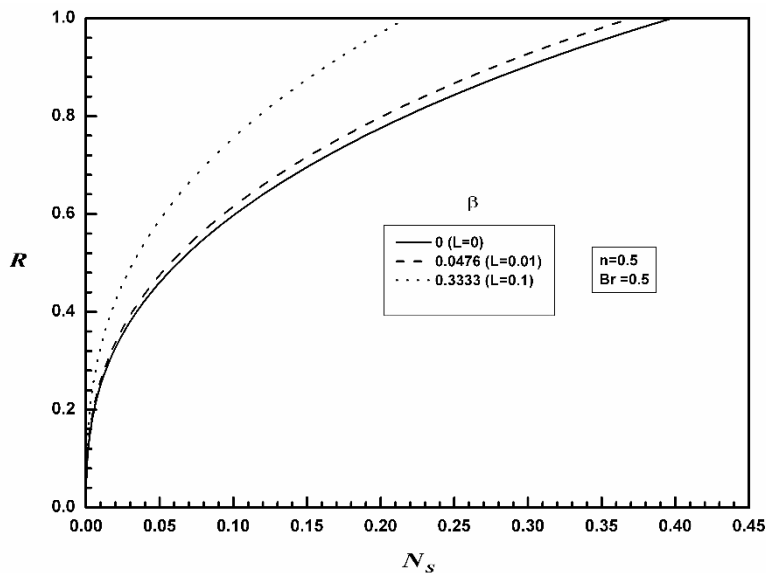


شکل ۴-۳۵: تغییرات تولید انتروپی اصطکاکی در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین

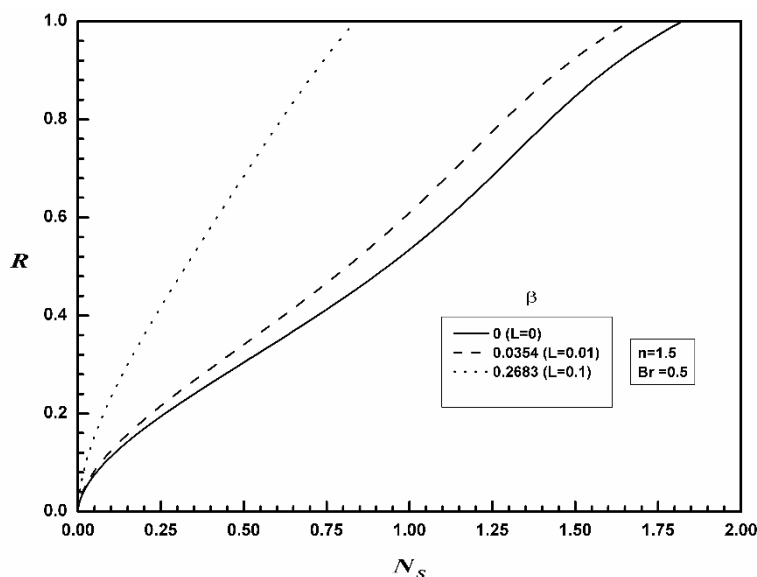
۴-۳-۴ تحلیل تولید انتروپی کل

شکل ۴-۳۶ و شکل ۴-۳۷ نشان دهنده تولید انتروپی کل در سرعت های لغزش مختلف به ترتیب برای سیالات شبه پلاستیک و دایلاتنت می باشد. همان طور که مشاهده می شود در این حالت که لغزش در دیواره را در نظر گرفتیم نیز بیشترین مقدار بازگشت ناپذیری برای هر دو نوع سیال شبه پلاستیک و دایلاتنت، در دیواره میکروکانال رخ داده است که در حقیقت ناشی از بازگشت

ناپذیری اصطکاکی می‌باشد که در دیواره، ماکزیمم است، هم‌چنین با افزایش سرعت لغزش در دیواره، مقدار بازگشت ناپذیری کل کاهش پیدا می‌کند که در واقع به خاطر کاهش اصطکاک در دیواره و هم‌چنین کاهش گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته می‌باشد. با مقایسه شکل ۴-۳۶ و شکل ۴-۳۷ مشخص می‌شود که تاثیر سرعت لغزش بر روی کاهش تولید انتروپی کل برای سیال دایلاتنت بیشتر از سیال شبه‌پلاستیک می‌باشد به طوری‌که برای سیال شبه‌پلاستیک در طول لغزش برابر با ۰/۱ میزان کاهش بازگشت ناپذیری کل نسبت به حالت بدون لغزش ۴۵/۲۸٪ می‌باشد و در سیال دایلاتنت در همان طول لغزش، کاهش بازگشت ناپذیری ۵۴/۱۳٪ می‌باشد.

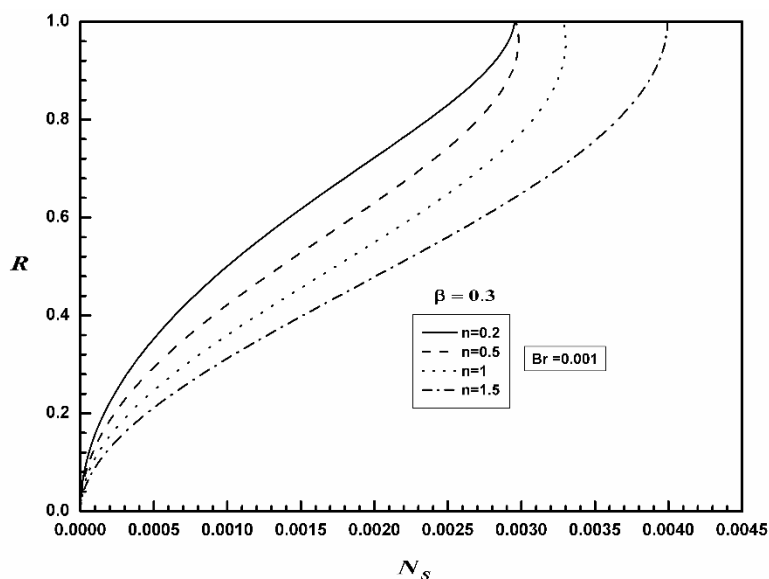


شکل ۴-۳۶: تغییرات تولید انتروپی کل در ضریب لغزش های مختلف برای سیال شبه‌پلاستیک

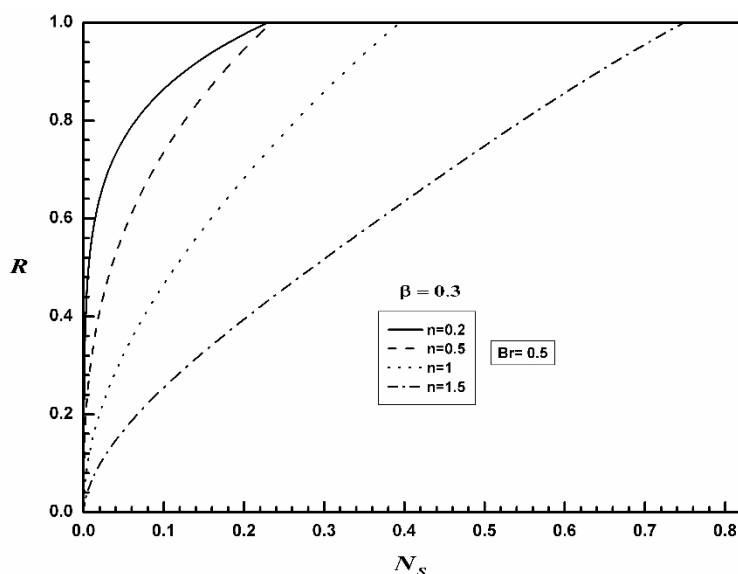


شکل ۴-۳۷: تغییرات تولید انتروپی کل در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت

تغییرات تولید انتروپی کل در شاخص های مختلف پاورلا در یک سرعت لغزش یکسان برای دو مقدار برینکمن، به ترتیب در شکل ۴-۳۸ و شکل ۴-۳۹ رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود در شکل ۴-۳۸ تاثیر بازگشت ناپذیری اصطکاکی کاهش یافته است و هم چنین برای سیالات با شاخص های پاورلا ۰/۵، ۱ و ۱/۵ بیشترین مقدار بازگشت ناپذیری در نزدیکی دیواره رخ داده است نه در خود دیواره، زیرا در این حالت بازگشت ناپذیری کل به شدت تحت تاثیر انتقال حرارت هدایتی می باشد. در شکل ۴-۳۹ مشاهده می شود که تاثیر بازگشت ناپذیری اصطکاکی افزایش پیدا کرده و بیشترین مقدار تولید انتروپی در دیواره رخ داده است، بنابراین می توان نتیجه گرفت که تاثیر برینکمن بر روی بازگشت ناپذیری کل محسوس بوده و می توان با راه کارهایی مقدار برینکمن را کاهش دهیم تا بازگشت ناپذیری کل سیستم کاهش پیدا کند. با افزایش شاخص پاورلا مشاهده می شود که تولید انتروپی کل نیز، افزایش چشمگیری دارد، زیرا همان طور که قبلا اشاره شد در سیالات دایلاتنت به خاطر ساختار سیال و فاصله مولکول های آن، تاثیر تلفات ویسکوزیته بیشتر خواهد بود در نتیجه مقدار بازگشت ناپذیری کل برای این نوع سیال بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک می باشد، بنابراین استفاده از سیالات غیر نیوتنی مانند پلیمرهایی که جز سیالات شبه پلاستیک محسوب می شوند باعث افزایش راندمان سیستم و از بین نرفتن کار مفید می باشد.



شکل ۴-۳۸: تغییرات تولید انتروپی کل در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین

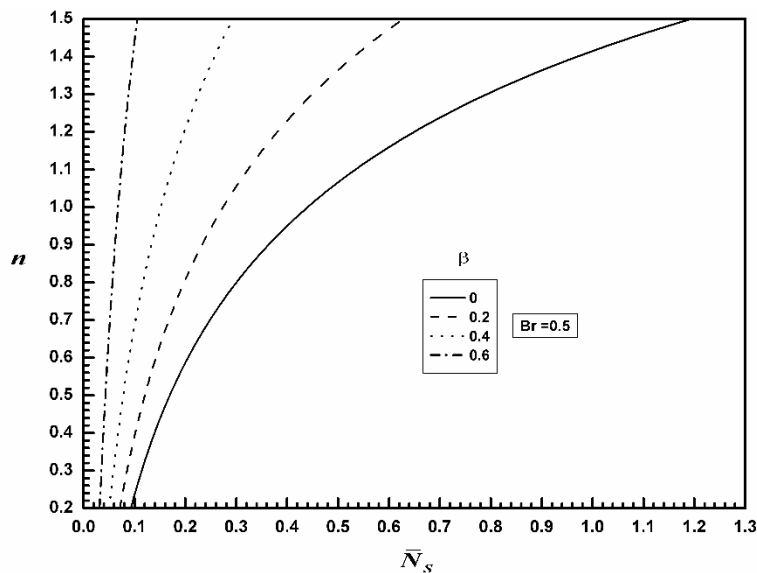


شکل ۴-۳۹: تغییرات تولید انتروپی کل در شاخص های مختلف پاورلا در یک ضریب لغزش معین

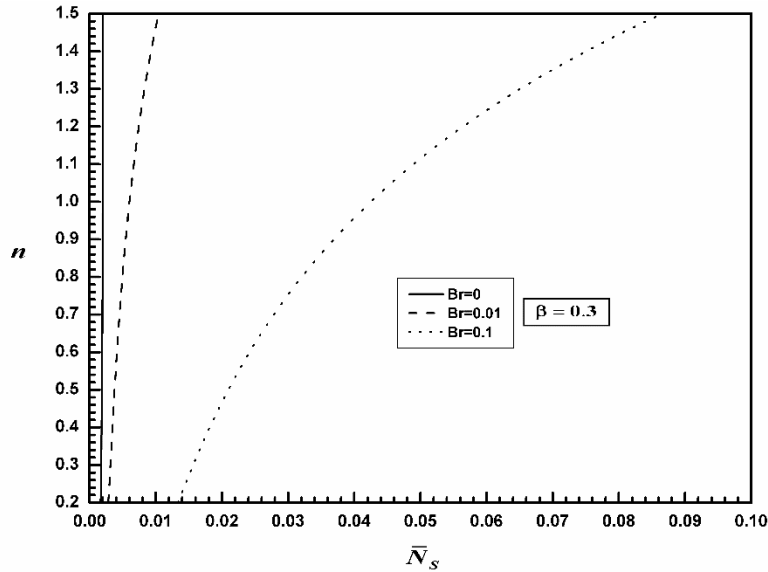
۴-۴-۴ تحلیل تولید انتروپی متوسط کل

تغییرات تولید انتروپی متوسط کل به عنوان تابعی از شاخص پاورلا در سرعت لغزش های مختلف و برینکمن های مختلف به ترتیب شکل ۴-۴۰ و شکل ۴-۴۱ نشان داده شده است. هر چه سرعت لغزش بیشتر باشد مقدار افزایش تولید انتروپی متوسط کل با افزایش شاخص پاورلا کمتر می باشد، بنابراین می توان با افزایش سرعت لغزش در دیواره، علی رغم استفاده از سیالات دایلاتنت،

مقدار افزایش بازگشت ناپذیری را کاهش دهیم که این کار توسط استفاده از سطوح فوق العاده آب گریز میسر می‌باشد. در شکل ۴-۴۱ مشاهده می‌شود که در یک سرعت لغزش ثابت، با افزایش برینکمن، مقدار رشد تولید انتروپی متوسط کل بسیار چشم‌گیر می‌باشد در حقیقت با افزایش برینکمن تاثیر تلفات ویسکوزیته افزایش پیدا می‌کند که این رشد برای سیالات دایلاتنت بسیار بیشتر از سیالات شبه پلاستیک می‌باشد به طوری که در سیال شبه پلاستیک با شاخص پاورلا برابر با ۰/۲ با افزایش ده برابری برینکمن، تولید انتروپی متوسط کل ۳۷۱/۷۳٪ افزایش داشته است در صورتی که برای سیال دایلاتنت با شاخص پاورلا برابر با ۱/۵، تولید انتروپی متوسط ۷۳۰٪ افزایش داشته است.



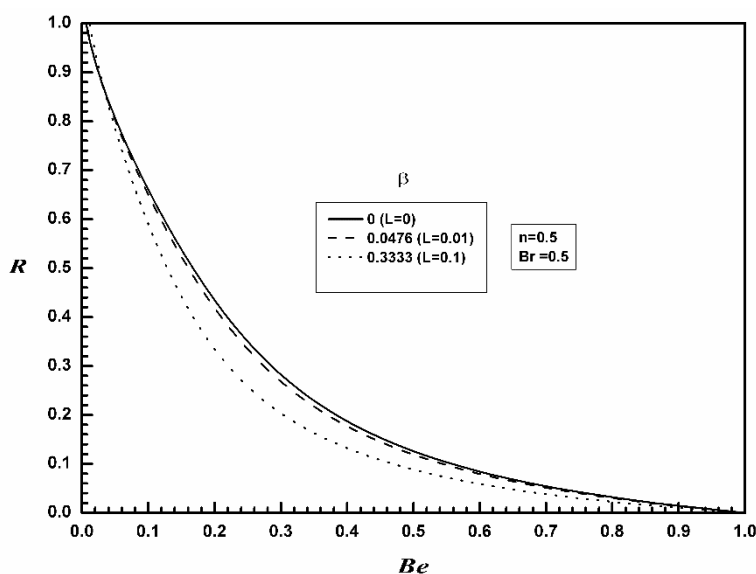
شکل ۴-۴۰: تغییرات تولید انتروپی متوسط در ضریب لغزش های مختلف



شکل ۴-۴۱: تغییرات تولید انتروپی متوسط در برینکمن های مختلف

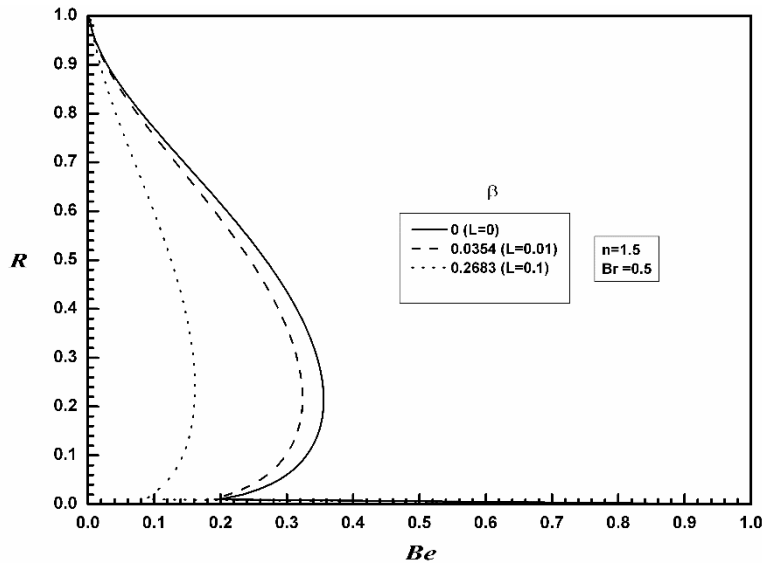
۴-۴-۵ تحلیل عدد بیژن

همان طور که در شکل ۴-۴۲ مشاهده می شود تغییرات عدد بیژن در سرعت های لغزش مختلف برای سیال شبه پلاستیک در یک برینکمن ثابت در نظر گرفته شده است. در هر سرعت لغزش معین، مقدار بیژن به صورت یکنواختی از مقدار یک در مرکز میکروکانال کاهش پیدا می کند؛ هم چنین مشاهده می شود که در نواحی نزدیک مرکز میکروکانال مقدار بیژن بیشتر از ۰/۵ می باشد یا در حقیقت بازگشت ناپذیری حرارتی غلبه کرده است بر بازگشت ناپذیری اصطکاکی ولی برای سیالات شبه پلاستیک در بیشتر مقطع عرضی میکروکانال، بازگشت ناپذیری اصطکاکی غلبه دارد بر بازگشت ناپذیری حرارتی. از نمودار مشخص می باشد که در نزدیک دیواره با افزایش سرعت لغزش، عدد بیژن افزایش پیدا می کند.



شکل ۴-۴: تغییرات عدد بیژن در ضریب لغزش های متفاوت برای سیال شبه پلاستیک

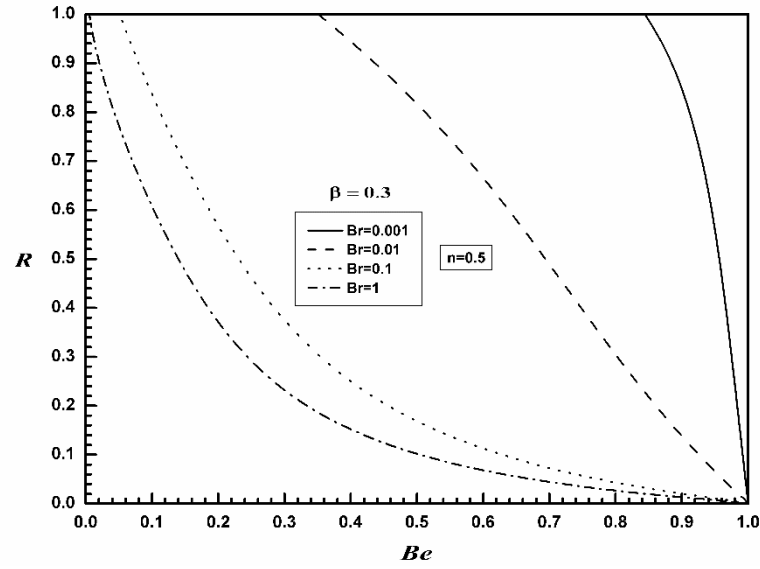
شکل ۴-۴ تغییرات عدد بیژن را در سرعت لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت نشان می دهد. با توجه به شکل مشخص می باشد که در این حالت با حرکت از مرکز میکروکانال جایی که بیژن یک می باشد به سمت دیواره، ناگهان بیژن افت شدیدی دارد که هر چه سرعت لغزش در دیواره بیشتر باشد این کاهش در بیژن نیز بیشتر می باشد که نشان می دهد در سرعت های بیشتر، در مرکز میکروکانال سهم بازگشت ناپذیری حرارتی کمتر می شود؛ سپس عدد بیژن شروع به افزایش می کند که در حقیقت بیان کننده این می باشد که افزایش تولید انتروپی حرارتی بیشتر از افزایش تولید انتروپی اصطکاکی می باشد و هم چنین این افزایش برای سرعت لغزش های بیشتر، کمتر می باشد و در نهایت با نزدیک شدن به دیواره به دلیل افزایش شدید تاثیر تلفات ویسکوزیته و افزایش بازگشت ناپذیری اصطکاکی، بیژن شروع به کاهش می کند. در مجموع با توجه به رفتار نمودار توان گفت که برای سیال دایلاتنت در کل میکروکانال بازگشت ناپذیری اصطکاکی همواره نقش پر رنگ تری نسبت به بازگشت ناپذیری حرارتی دارد.



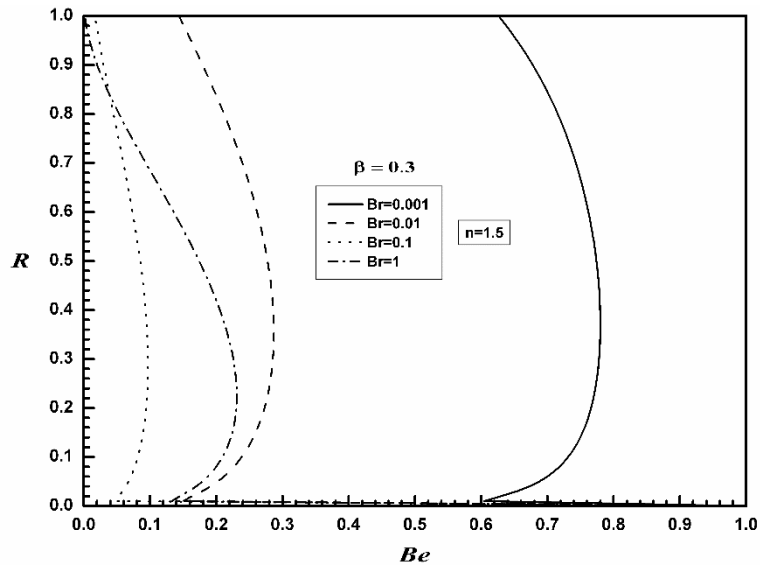
شکل ۴-۴۳: تغییرات عدد بیژن در ضریب لغزش های مختلف برای سیال دایلاتنت

تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف در یک سرعت لغزش معین برای سیالات برشی نازک و برشی ضخیم به ترتیب در شکل ۴-۴۴ و شکل ۴-۴۵ نشان داده شده است. برای سیال شبه پلاستیک با شاخص پاورلا ۰/۵، مشاهده می شود که با افزایش برینکمن، بیژن کاهش پیدا می کند که در حقیقت این نشان دهنده این می باشد که تاثیر برینکمن بر روی بازگشت ناپذیری اصطکاکی بیشتر از بازگشت ناپذیری حرارتی می باشد. برای $Br = 0.001$ مشاهده می شود که در تمام مقطع عرضی میکروکانال مقدار بیژن بیشتر از ۰/۵ می باشد زیرا مقدار کوچک برینکمن باعث کاهش بازگشت ناپذیری اصطکاکی شده و در مجموع سهم بازگشت ناپذیری حرارتی بیشتر از بازگشت ناپذیری اصطکاکی می باشد، هم چنین برای $Br = 0.01$ مشاهده می شود که تا شعاع $R = 0.81$ میکروکانال، تولید انترپی حرارتی غلبه دارد بر تولید انترپی اصطکاکی؛ اما در برینکمن های ۰/۱ و ۱ مشاهده می شود تاثیر بازگشت ناپذیری اصطکاکی به شدت افزایش یافته،؛ اما در مورد سیال دایلاتنت با شاخص پاورلا ۱/۵ که در شکل ۴-۴۵ نشان داده شده است مشاهده می شود که برای برینکمن برابر با ۰/۰۰۱ به دلیل کم بودن تاثیر بازگشت ناپذیری اصطکاکی، بیژن بزرگتر ۰/۵ می باشد ولی با افزایش برینکمن به مقادیر ۰/۰۱، ۰/۱ و ۱، مقدار بیژن کاهش پیدا می کند به طوریکه بازگشت ناپذیری اصطکاکی همواره بیشتر از بازگشت ناپذیری حرارتی می باشد. مشاهده می شود که

در حالتی که برینکمن برابر با یک می باشد مقدار بیژن بیشتر از زمانی است که برینکمن برابر با $0/1$ می باشد، در حقیقت در این حالت مقدار زیاد برینکمن سبب افزایش بیشتر تولید انتروپی حرارتی نسبت به اصطکاکی می شود. با مقایسه شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵ می توان نتیجه گرفت که برای سیالات شبه پلاستیک تاثیر بازگشت ناپذیری حرارتی بیشتر از بازگشت ناپذیری اصطکاکی می باشد.



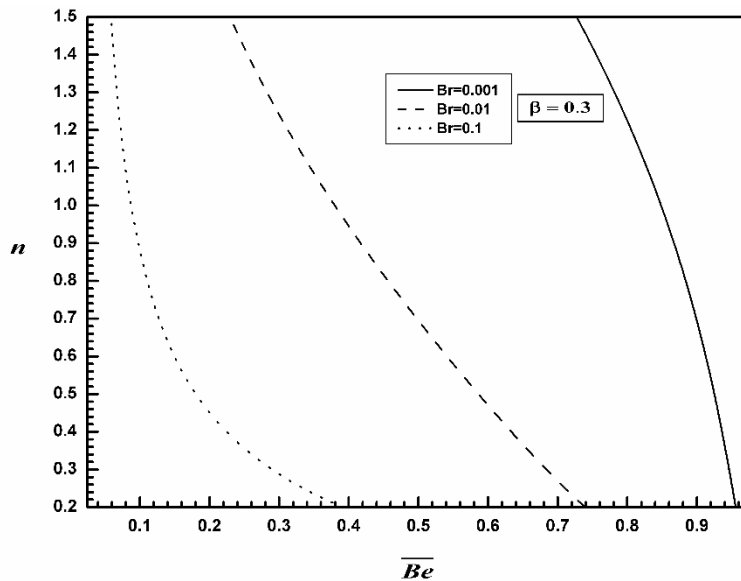
شکل ۴-۴: تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف برای سیال شبه پلاستیک



شکل ۴-۵: تغییرات عدد بیژن در برینکمن های مختلف برای سیال دایلاتنت

۴-۴-۶ تحلیل عدد بیژن متوسط

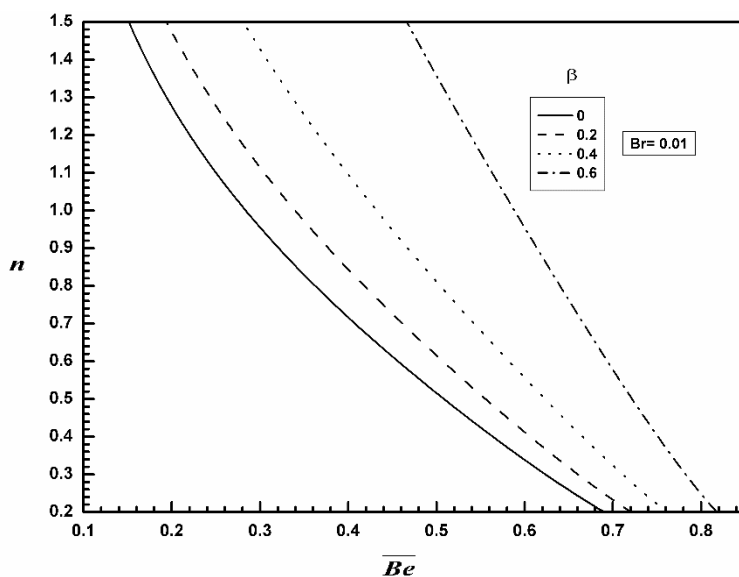
شکل ۴-۴۶ نشان دهنده تغییرات بیژن متوسط در برابر شاخص پاورلا، در برینکمن‌های مختلف برای یک سرعت لغزش ثابت می‌باشد. در هر برینکمن، مقدار بیژن متوسط با افزایش شاخص پاورلا کاهش می‌یابد زیرا، بازگشت ناپذیری اصطکاکی رشد بیشتری نسبت به بازگشت ناپذیری حرارتی دارد و هم چنین مشاهده می‌شود که با افزایش برینکمن نیز بیژن متوسط کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین به طور کلی می‌توان گفت، سیالات داپلاننت بیشتر تحت تاثیر بازگشت ناپذیری اصطکاکی می‌باشد و عکس این قضیه برای سیالات شبه پلاستیک برقرار می‌باشد؛ البته این موضوع برای برینکمن‌های بسیار کوچک صدق نمی‌کند چراکه در این حالت، تلفات ویسکوزیته بسیار کاهش پیدا می‌کند در نتیجه سهم بازگشت ناپذیری اصطکاکی کاهش پیدا می‌کند.



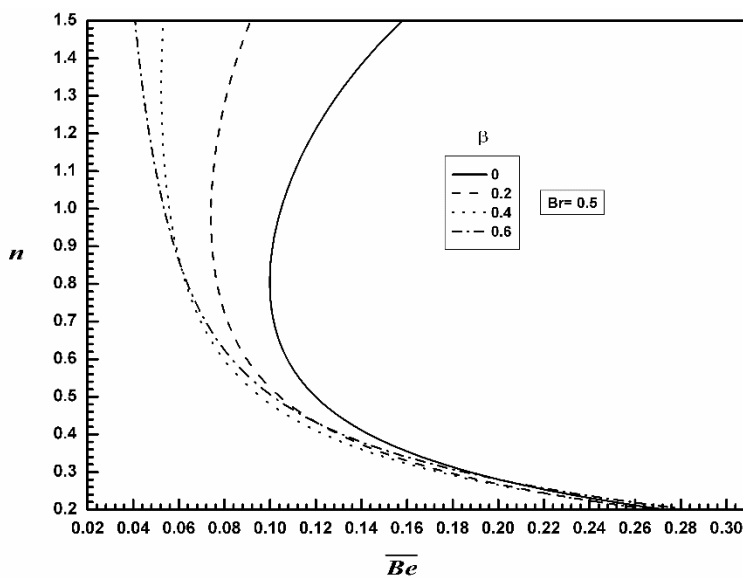
شکل ۴-۴۶: تغییرات بیژن متوسط در برینکمن‌های مختلف در یک ضریب لغزش معین

در شکل ۴-۴۷ و شکل ۴-۴۸ تغییرات بیژن متوسط با شاخص پاورلا در سرعت‌های لغزش مختلف، به ترتیب برای برینکمن‌های ۰/۱ و ۰/۵ رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود برای حالتی که برینکمن ۰/۱ می‌باشد، در هر سرعت لغزشی در دیواره، مقدار بیژن متوسط به صورت یکنواخت با افزایش شاخص پاورلا کاهش پیدا می‌کند و هم چنین با افزایش سرعت لغزش، بیژن متوسط افزایش پیدا می‌کند. با مقایسه شکل ۴-۴۷ و شکل ۴-۴۸ مشخص می‌باشد که برای

حالتی که برینکمن را 0.5 در نظر گرفته‌ایم، مقدار بیژن متوسط همواره کوچکتر از 0.5 می‌باشد.



شکل ۴-۴۷: تغییرات بیژن متوسط در ضریب لغزش های مختلف



شکل ۴-۴۸: تغییرات بیژن متوسط در ضریب لغزش های مختلف

فصل پنجم

۵ نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق به بررسی انتقال حرارت و تولید انترویی سیال غیرنیوتنی پاورلا در یک میکروکانال دایروی از یک هیت سینک حرارتی که در شرایط شار حرارتی ثابت قرار دارد پرداخته شده است. جریان به صورت آرام و توسعه یافته حرارتی در نظر گرفته شده است، که برای شرایط عدم وجود لغزش در دیواره و وجود لغزش در دیواره، پروفیل‌های سرعت، دما و تولید انترویی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این بخش، به برخی از مهم‌ترین نتایج مطالعه که در فصول سوم و چهارم مورد بررسی قرار گرفته است اشاره می‌شود؛ هم‌چنین در ادامه چند مورد از پژوهش‌هایی که در آینده می‌تواند مورد بررسی قرار بگیرد اشاره می‌شود.

۱-۵ مشاهدات و نتایج

در این فصل بر جسته‌ترین نتایج به دست آمده در دو فصل قبل، به ترتیب برای میادین سرعت، دما و تولید انترویی به صورت خلاصه اشاره می‌شود.

- با افزایش شاخص جریان پاورلا، سرعت هسته جریان افزایش پیدا می‌کند ولی در نزدیکی دیواره به دلیل پایستگی جرم، سرعت و گرادیان سرعت، کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش سرعت لغزش یا استفاده از میکروکانالی که دیواره آن زبرتر یا پوشش داده شده توسط ماده‌ای آب‌گریز باشد، سرعت در دیواره افزایش پیدا می‌کند ولی سرعت هسته جریان و هم‌چنین گرادیان سرعت در دیواره کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش شاخص سیال، عدد پوآزی که در حقیقت بیان‌کننده ضریب اصطکاک بین سیال و دیواره می‌باشد افزایش می‌یابد، زیرا همان‌طور که اشاره شد سیالات دایلاتنت ویسکوزیته ظاهری بیشتری نسبت به سیالات نیوتنی و شبه‌پلاستیک دارند؛ هم‌چنین با افزایش سرعت لغزش عدد پوآزی کاهش پیدا می‌کند که ناشی از کاهش اصطکاک بین سیال و دیواره با فرض وجود لغزش می‌باشد.

- در حالت عدم وجود تلفات ویسکوزیته در دیواره، که در این حالت مستقل از شار سرمایشی یا گرمایشی وارده به سطح می‌باشد، با افزایش شاخص جریان، اختلاف دمای محلی بین سیال و دیواره افزایش می‌یابد که این به دلیل سرعت بیشتر هسته جریان و در نتیجه زمان کمتری برای جذب حرارت از طرف دیواره وجود دارد.
- در فرایند گرمایشی، با افزایش شاخص جریان، میزان افزایش دمای دیواره بیشتر از دمای میانگین سیال می‌باشد و هم چنین با افزایش سرعت لغزش، گرمای تولیدی ناشی از تلفات ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه، دمای میانگین سیال و دمای دیواره کاهش پیدا می‌کند؛ هم چنین با افزایش برینکمن، افزایش دمای میانگین و دمای دیواره برای سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک می‌باشد بنابراین جهت خنک کاری سطوح، استفاده از سیالات شبه پلاستیک بهتر از سیالات نیوتنی و دایلاتنت می‌باشد. هم چنین هر چه به سمت مرکز میکروکانال حرکت کنیم به دلیل کاهش تاثیر گرمای داخلی، اختلاف دمای محلی سیال و دیواره افزایش می‌یابد.
- در فرایند سرمایشی، در صورتی که قدر مطلق برینکمن مدنظر کوچکتر از برینکمن بحرانی باشد، شار سرمایشی وارد شده به سطح، غلبه می‌کند بر گرمای تولیدی تلفات ویسکوزیته ولی برای برینکمن‌های بزرگتر از برینکمن بحرانی عکس این موضوع صادق می‌باشد؛ بنابراین هنگامی که می‌خواهیم سیال را خنک کنیم باید توجه ویژه ای به مقدار برینکمن بحرانی سیال مورد نظر در شرایط موجود شود، زیرا در صورتی که هدف ما خنک کردن سیال باشد ولی برینکمن مساله بیشتر از برینکمن بحرانی باشد، نه تنها سیال خنک نمی‌شود بلکه دمای میانگین آن افزایش پیدا می‌کند.
- در فرایند گرمایش، عدد ناسلت با افزایش شاخص جریان کاهش پیدا می‌کند زیرا سهم انتقال حرارت هدایتی افزایش پیدا می‌کند؛ هم چنین زمانی که از تلفات ویسکوزیته صرف نظر می‌شود، در مقادیر بالای شاخص جریان از نظر ریاضیاتی، ناسلت به مقدار $3/871$ میل

می‌کند و با وجود لغزش در دیواره، در هر سرعت لغزش معین به یک عدد مشخص میل می‌کند که به آن اشاره شد؛ البته لازم به ذکر می‌باشد در شرایط عملی ممکن است نتوانیم سیالی داشته باشیم که شاخص جریان آن بسیار بزرگ باشد. هم‌چنین در صورتی که تلفات ویسکوزیته در سطح داشته باشیم، با افزایش شدید برینکمن عدد ناسلت به سمت صفر میل می‌کند که این شرایط ممکن است فقط در حالت تئوری رخ دهد زیرا افزایش بیش از حد برینکمن ممکن است در حالت عملی امکان‌پذیر نباشد.

- با افزایش سرعت لغزش در تمامی سیالات، عدد ناسلت افزایش پیدا می‌کند زیرا سهم انتقال حرارت هدایتی بیشتر از جابجایی می‌شود ولی، تاثیر سرعت لغزش بر روی عدد ناسلت، در سیالات دایلاتنت بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه‌پلاستیک می‌باشد؛ هم‌چنین تاثیر برینکمن بر روی ناسلت، برای سیالات دایلاتانت بیشتر از سیالات نیوتنی و شبه‌پلاستیک می‌باشد.
- در برینکمن بحرانی، دمای میانگین سیال برابر با دمای دیواره می‌شود و انتقال حرارتی بین سیال و دیواره وجود ندارد از همین رو ناسلت به سمت بی نهایت میل می‌کند. لازم به ذکر می‌باشد که برینکمن بحرانی فقط در فرایند سرمایشی وجود دارد. با افزایش شاخص جریان، برینکمن بحرانی کاهش می‌یابد در صورتی که با افزایش سرعت لغزش، عکس این موضوع صحت دارد.
- در شرایط مرزی دما ثابت زمانی که برینکمن مثبت باشد در حقیقت در طی مسیر تا ناحیه توسعه یافته، سیال در حال جذب گرما بوده ولی در ناحیه توسعه یافته دمای سیال بیشتر از دمای دیواره بوده و جهت انتقال حرارت از سمت سیال به سمت دیواره می‌باشد؛ اما در برینکمن منفی، سیال در طی مسیر تا ناحیه توسعه در حال خنک شدن می‌باشد و در ناحیه توسعه یافته، هم‌چنان دمای سیال از دمای دیواره بیشتر می‌باشد. در سیالات دایلاتنت زمانی که برینکمن یک مقدار منفی بزرگ باشد، سیال در طی مسیر تا ناحیه توسعه یافته، در حال جذب گرما می‌باشد و در ناحیه توسعه یافته دمای محلی سیال در نواحی نزدیک مرکز

میکروکانال بیشتر از دمای ورودی می باشد و هرچه به سمت دیواره حرکت کنیم دمای سیال کاهش پیدا می کند.

- در شرایط دما ثابت، در برینکمن های مثبت، دمای میانگین سیال بیشتر از دمای ورودی می باشد ولی در برینکمن های منفی، دمای میانگین سیال می تواند کوچکتر و یا بزرگتر از دمای ورودی باشد، ولی همواره با افزایش شاخص جریان دمای میانگین افزایش می یابد.
- برای سیالات شبه پلاستیک تولید انتروپپی حرارتی و اصطکاکی، کمتر از سیالات نیوتنی و دایلاتنت می باشد بنابراین استفاده از پلیمرهایی که جزو سیالات شبه پلاستیک محسوب می شود ارجحیت دارد نسبت به سیالات نیوتنی و دایلاتنت، زیرا راندمان سیستم افزایش پیدا می کند.
- تاثیر برینکمن و شاخص جریان در سیالات دایلاتنت بر روی تولید انتروپپی حرارتی بیشتر از اصطکاکی می باشد؛ هم چنین در سیالات دایلاتنت، در صورتی که برینکمن را به اندازه کافی بزرگ در نظر بگیریم، سهم بازگشت ناپذیری حرارتی بیشتر از اصطکاکی می شود و بیشترین مقدار بازگشت ناپذیری کل در نواحی نزدیک مرکز میکروکانال رخ می دهد، که این رفتار نشان دهنده تاثیرپذیری شدید بازگشت ناپذیری حرارتی از شاخص جریان و برینکمن می باشد.
- با وجود لغزش در دیواره، بازگشت ناپذیری های حرارتی و اصطکاکی کاهش پیدا می کند که این کاهش برای سیالات دایلاتنت چشم گیر از سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک می باشد ولی برای سیالات شبه پلاستیک مقدار بازگشت ناپذیری کمتر می باشد؛ بنابراین پوشش دادن سطح توسط مواد آب گریز و هم چنین افزایش زبری سطح، سبب افزایش کار مفید سیستم می شود. در مواردی که ناچار به استفاده از سیالات دایلاتنت می باشیم، می توان با افزایش سرعت لغزش در دیواره، رشد بازگشت ناپذیری متوسط را به ازای بیشتر بودن شاخص جریان، کاهش داد.

- افزایش برینکمن و شاخص جریان، تاثیر بیشتری بر روی بازگشت ناپذیری کل برای سیالات دایلاتنت نسبت به سیالات نیوتنی و شبه پلاستیک دارد.
- در سیالات دایلاتنت و شبه پلاستیک در بیشتر مقطع عرضی میکروکانال، بازگشت ناپذیری اصطکاکی غالب است بر بازگشت ناپذیری حرارتی ولی برای سیالات دایلاتنت در نواحی نزدیک مرکز میکروکانال، رشد بازگشت ناپذیری حرارتی بیشتر از بازگشت ناپذیری اصطکاکی می باشد. در صورتی که مقدار برینکمن را بسیار کوچک فرض کنیم، سهم تولید انروپی حرارتی بیشتر از تولید انروپی اصطکاکی می باشد.
- برای سیالات شبه پلاستیک، افزایش سرعت لغزش موجب افزایش عدد بیژن در نزدیکی دیواره می شود که این رفتار، بیان کننده کاهش بیشتر بازگشت ناپذیری اصطکاکی نسبت به حرارتی می باشد. هم چنین با افزایش شاخص جریان، بیژن متوسط کاهش پیدا می کند زیرا رشد تولید انروپی اصطکاکی بیشتر از حرارتی می باشد.
- در برینکمن های بسیار کوچک، با افزایش شاخص جریان بیژن متوسط به صورت یکنواخت کاهش پیدا می کند ولی با افزایش سرعت لغزش، افزایش پیدا می کند.

۲-۵ پژوهش های پیشنهادی

- در این بخش به برخی از پژوهش هایی که می تواند در این زمینه در آینده مورد تحلیل و بررسی قرار بگیرد اشاره می شود
- بررسی عددی انتقال حرارت و تولید انروپی جریان سیال پاورلا در میکروکانال های دایروی، بین دو صفحه موازی و مستطیلی.
 - بررسی عددی انتقال حرارت و تولید انروپی جریان سیال الکترواسموتیک پاورلا در میکروکانال های دایروی، بین دو صفحه موازی و مستطیلی.
 - تحلیل و بررسی انتقال حرارت و تولید انروپی در ناحیه در حال توسعه حرارتی، بدون لغزش

در دیواره برای سیال پاورلا در میکروکانال دایروی

- بررسی انتقال حرارت و تولید انترپی در ناحیه در حال توسعه حرارتی، با فرض لغزش در

دیواره برای سیال پاورلا در میکروکانال دایروی

- تحلیل و بررسی انتقال حرارت و تولید انترپی در ناحیه در حال توسعه هیدرولیکی و حرارتی

برای سیال پاورلا در میکروکانال دایروی.

٦ مراجع

-
- [1]. Chein, R. and G. Huang, (2004), "Thermoelectric cooler application in electronic cooling". *Appl. Therm. Eng.*, **24(14)**: pp. **2207-2217**.
- [2]. Huang, H.-S., Y.-C. Weng, Y.-W. Chang, S.-L. Chen, and M.-T. Ke, (2010), "Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment". *Int. Commun. Heat Mass.*, **37(2)**: pp. **140-146**.
- [3]. Sharp, K.V., R.J. Adrian, J.G. Santiago, and J.I. Molho, 2002, "**Liquid flows in microchannels**", CRC Press, Boca Raton.
- [4]. Kumar, R., M. Islam, and M. Hasan, "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**
- [5]. Chen, Y.-T., S.-W. Kang, W.-C. Tuh, and T.-H. Hsiao, (2004), "Experimental investigation of fluid flow and heat transfer in microchannels". *J. Sci. Eng.*, **7(1)**: pp. **11-16**.
- [6]. Abdelgawad, M., C. Wu, W.-Y. Chien, W.R. Geddie, M.A. Jewett, and Y. Sun, 2011, "A fast and simple method to fabricate circular microchannels in polydimethylsiloxane (PDMS)". *Lab on a Chip*. **11(3)**: pp. **545-551**.
- [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., D.R. Evans, E. Bonaccorso, H.-J. Butt, and V.S. Craig, (2005), "Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies". *Reports on Progress in Physics*. **68(12)**: pp. **2859-2897**.
- [9]. Chhabra, R., J. Richardson, and N.-N. Flow, 2008, "**Applied Rheology: Engineering Applications**". Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [10]. 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**.
- [11]. Martini, A., A. Roxin, R. Snurr, Q. Wang, and S. Lichter, 2008, "*Molecular mechanisms of liquid slip*". *Journal of Fluid Mechanics*. **600**: pp. **257-269**.
- [12]. 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**.
- [13]. Pit, R., H. Hervet, and L. Léger, (1999), "Friction and slip of a simple liquid at a solid surface". *Tribology letters*. **7(2-3)**: pp. **147-152**.
- [14]. Wu, Y., M. Cai, Z. Li, X. Song, H. Wang, X. Pei, and F. Zhou, (2014), "Slip

- flow of diverse liquids on robust superomniphobic surfaces". *J. Colloid Interface Sci.* **414**: pp. **9-13**.
- [15]. Vinogradova, O.I., (1995), "Drainage of a thin liquid film confined between hydrophobic surfaces". *Langmuir.* **11(6)**: pp. **2213-2220**.
- [16]. Hung, Y.M., (2010), "Analytical study on forced convection of nanofluids with viscous dissipation in microchannels". *Heat. Transfer. Eng.* **31(14)**: pp. **1184-1192**.
- [17]. Ghazvini, M., M. Akhavan-Behabadi, and M. Esmaili, (2009), "The effect of viscous dissipation on laminar nanofluid flow in a microchannel heat sink". *P I. MECH ENG. C-J. MEC* **223(11)**: pp. **2697-2706**.
- [18]. Morini, G.L., (2005), "Viscous heating in liquid flows in micro-channels". *Int. J. Heat Mass Trans.*, **48(17)**: pp. **3637-3647**.
- [19]. Tunc, G. and Y. Bayazitoglu, (2001), "Heat transfer in microtubes with viscous dissipation". *Int. J. Heat Mass Trans.*, **44(13)**: pp. **2395-2403**.
- [20]. Koo, J. and C. Kleinstreuer, (2004), "Viscous dissipation effects in microtubes and microchannels". *Int. J. Heat Mass Trans.*, **47(14)**: pp. **3159-3169**.
- [21]. Tso, C. and S. Mahulikar, (1999), "The role of the Brinkman number in analysing flow transitions in microchannels". *Int. J. Heat Mass Trans.* **42(10)**: pp. **1813-1833**.
- [22]. Lelea, D. and A.E. Cioabla, (2010), "The viscous dissipation effect on heat transfer and fluid flow in micro-tubes". *Int. Commun. Heat Mass.*, **37(9)**: pp. **1208-1214**.
- [23]. Aydin, O., (2005), "Effects of viscous dissipation on the heat transfer in forced pipe flow. Part 1: both hydrodynamically and thermally fully developed flow". *Energ. Convers. Manage.*, **46(5)**: pp. **757-769**.
- [24]. Gryglaszewski, P., Z. Nowak, and J. Stacharska-Targosz, (1980), "The effects of viscous dissipation on laminar heat transfer to power law fluids in tubes". *Heat Mass Trans.*, **14(2)**: pp. **81-89**.
- [25]. Lawal, A. and A. Mujumdar, (1992), "The effects of viscous dissipation on heat transfer to power law fluids in arbitrary cross-sectional ducts". *Wärme-und Stoffübertragung.* **27(7)**: pp. **437-446**.
- [26]. Bakaraju, O.R., (2009), "Heat transfer in electroosmotic flow of power-law fluids in micro-channel"., *Cleveland State University*.
- [27]. 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**.
- [28]. Dehkordi, A.M. and A.A. Mohammadi, (2009), "Transient forced convection with viscous dissipation to power-law fluids in thermal entrance region of circular ducts with constant wall heat flux". *Energ. Convers Manage.*, **50(4)**: pp. **1062-1068**.
- [29]. Babaie, A., A. Sadeghi, and M.H. Saidi, (2011), "Combined electroosmotically and pressure driven flow of power-law fluids in a slit microchannel". *J. Non-Newton. Fluid.*, **166(14)**: pp. **792-798**.
- [30]. Tso, C.P., J. Sheela-Francisca, and Y.-M. Hung, (2010), "Viscous dissipation effects of power-law fluid flow within parallel plates with constant heat fluxes". *J. Non-Newton. Fluid.*, **165(11)**: pp. **625-630**.
- [31]. Vakili, M.A., M.H. Saidi, and A. Sadeghi, (2014), "Thermal transport characteristics pertinent to electrokinetic flow of power-law fluids in rectangular microchannels". *Int. J. Therm. Sci.*, **79**: pp. **76-89**.
- [32]. 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 Mechanics, Lisbon*.
- [33]. Ngoma, G.D. and F. Erchiqui, (2007), "Heat flux and slip effects on liquid flow in a microchannel". *Int. J. Therm. Sci.*, **46(11)**: pp. **1076-1083**.
- [34]. Yazdi, M., S. Abdullah, I. Hashim, A. Zaharim, K. Sopian, N. Mastorakis, M. Poulos, V. Mladenov, Z. Bojkovic, and D. Simian. (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*.
- [35]. Khan, W.A. and M.M. Yovanovich, (2008), "Analytical modeling of fluid flow and heat transfer in microchannel/nanochannel heat sinks". *J. Thermophys. Heat Tr.* **22(3)**: pp. **352-359**.
- [36]. Mahmoud, M.A., (2011), "Slip velocity effect on a non-Newtonian power-law fluid over a moving permeable surface with heat generation". *Math. Comput. Model.* **54(5)**: pp. **1228-1237**.
- [37]. Sonntag, R.E., C. Borgnakke, G.J. Van Wylen, and S. Van Wyk, (1998), "**Fundamentals of thermodynamics**". Vol. **6**: Wiley New York.
- [38]. Bejan, A., (1996), "**Advanced engineering thermodynamics**",. Interscience,

- New York.
- [39]. Bejan, A., (1982), "*Entropy generation through heat and fluid flow*". John Wiley & Sons Inc.
- [40]. Bejan, A., (1982), "**Second-law analysis in heat transfer and thermal design**"., Adv. Heat Transfer. **15**: pp. **1-58**.
- [41]. Bejan, A., (1995), "**Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes**". CRC press.
- [42]. Mahmud, S. and R.A. Fraser, (2003), "The second law analysis in fundamental convective heat transfer problems". *Int. J. Therm. Sci.* **42(2)**: pp. **177-186**.
- [43]. Abbassi, H., (2007), "Entropy generation analysis in a uniformly heated microchannel heat sink". *Energy.* **32(10)**: pp. **1932-1947**.
- [44]. Mah, W.H., Y.M. Hung, and N. Guo, (2012), "Entropy generation of viscous dissipative nanofluid flow in microchannels". *Int. J. Heat Mass Trans.*, **55(15)**: pp. **4169-4182**.
- [45]. 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**.
- [46]. Hooman, K., (2007), "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. Trans.* **34(8)**: pp. **945-957**.
- [47]. 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**.
- [48]. Yilbas, B. and M. Pakdemirli, (2005), "Entropy generation due to the flow of a non-Newtonian fluid with variable viscosity in a circular pipe". *Heat. Transfer. Eng.*, **26(10)**: pp. **80-86**.
- [49]. 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.
- [50]. 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**.

-
- [51]. Shamshiri, M., R. Khazaeli, M. Ashrafizaadeh, and S. Mortazavi, (2012), "Heat transfer and entropy generation analyses associated with mixed electrokinetically induced and pressure-driven power-law microflows". *Energy.*, **42(1)**: pp. **157-169**.
- [52]. 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**.
- [53]. Tan, D. and Y. Liu, (2014), "Combined effects of streaming potential and wall slip on flow and heat transfer in microchannels". *Int. Commun. Heat Mass. Trans.*, **53**: pp. **39-42**.
- [54]. Bird, R., W. Stewart, and E. Lightfoot, (2007), "**Transport Phenomena**", *John Wiley & Sons*.
- [55]. Bergman, T.L., F.P. Incropera, and A.S. Lavine, (2011), "**Fundamentals of heat and mass transfer**". John Wiley & Sons.
- [56]. 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**
- [57]. 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

Development the heat transfer parameters and incrementing the thermodynamic efficiency for higher and better cooling were made necessary by increasing improvement of industry. Nowadays industry is able to manufacture the system with more swarm of computer chipsets, and so need to new way of cooling due to the productuin of heat at the limited area. The micro-channel and nano-channel heat sink with various surfaces is a good equipment which can be used for cooling.

In this study, the steady-state fully-developed laminar flow of non-Newtonian power-law fluids is examined in a circular microchannel without and with slip boundary condition and under an imposed constant wall heat flux and also iso thermal wall temperature. Effects of slip as well as the hydrodynamic and thermal key parameters on heat transfer and entropy generation are investigated.

The result reveal that increasing the Brinkman number and the flow behaviour index both lead to increasing the entropy generation and decreasing the Nusselt number.

An increase in the slip coefficient leads to an increase in both the Nusselt number and Bejan number, whereas it gives to a decrease in entropy generation. And also the results of this study showed that the pseudo-plastic fluid is more effective in the heat absorption on the surface than of Newtonian and dilatant fluids. It is concluded from entropy generation analysis the the shear thinning fluids has more thermodynamic efficiency that of Newtonian and shear thickening fluids due to less entropy generation.

Keywords: *Micro-channel, Power-law fluid, Newtonian fluid, Slip, Viscous dissipation, Temprature field, Nusselt number, Entropy generation.*



University of Sharood

Faculty of Mechanical Engineering

**Entropy Generation Analysis of Power-law Non-Newtonian
Fluid Flow in Microchannel Heat Sink**

Amirhossein Sarabandi

Supervisors:

Ali Jabari Moghadam

Mahmood Farzaneh Gord

September 2015