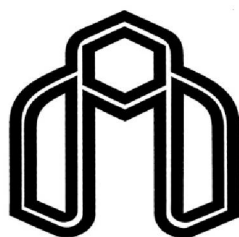


اللَّهُمَّ احْمِزْنِي



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه حرارت و سیالات

بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال

در محیط متخلخل اشباع

دانشجو:

طاهر ارمغانی

استاد راهنما:

دکتر محمد جواد مغربی

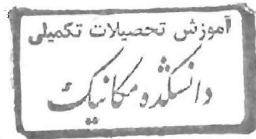
استاد مشاور:

دکتر محسن نظری

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

ماه و سال انتشار:

اسفند ۱۳۹۲



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مکانیک

گروه: حرارت و سیالات

رساله دکتری آقای طاهر ارمغانی

تحت عنوان: بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در محیط متخلخل اشباع

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۲۲ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک دکتری ارزیابی گردید و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد مشاور	امضاء	استاد راهنما
	دکتر محسن نظری		دکتر محمدجواد مغربی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر علی جباری مقدم		دکتر علیرضا تیمورتاش
			دکتر فرهاد طالبی
			دکتر محمدمحسن شادمردان
			دکتر محمود نوروزی

تقدیم به:

خانواده عزیزم

و تقدیم به روح ملکوتی بزرگمردی که لبخند مهربانانه‌اش و تشویق‌های همیشگی‌اش
الهام‌بخش زندگیم بود و چندی پیش دارفانی را وداع گفت.

به پدر بزرگم

لشکر توفیق همراه تو اند خیز اگر بر عزم تسخیر جهان ره می‌زنی

رساله حاضر مرهون زحمات و راهنمایی‌های مدبرانه استاد ارجمند جناب پروفیسور مغربی است در کنار ایشان جناب دکتر نظری هم‌اره در پیشبرد هر چه بهتر رساله یاریم نمود و بدون ایشان رساله به فرجام نمی‌رسید از این بزرگواران بینهایت سپاسگزارم. از اساتید برجسته علم انتقال حرارت در محیط متخلخل، پروفیسور نیلد و پروفیسور چمخا که تسلطشان بر مفاهیم محیط متخلخل مثال زدنی است و پاسخهایشان به پرسشهایم بر غنای رساله افزود نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم. در پایان از همسر مهربانم که صبورانه در کنارم بود و در ویرایش رساله یاریم نمود سپاسگزارم. باشد که مقبول افتد.....

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه (رساله) نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

اسفند ۱۳۹۲

چکیده:

در این رساله انتقال حرارت اجباری نانوسیالات درون محیط متخلخل با شرط تعادل و عدم تعادل حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. سیال درون کانال متخلخل توسعه یافته فرض شده است و از معادله دارسی برینکمن فورچهمر برای مدلسازی جریان و از مدل بونگیورنو برای مدلسازی انتقال حرارت استفاده شده است. اثرات مهاجرت نانوذرات بر روی انتقال حرارت اجباری در حالت تعادل و عدم تعادل حرارتی بین فازها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از روش تکفازی و دوفازی (مدل بونگیورنو) در مدلسازی انتقال حرارت نانوسیالات مقایسه می شود. نتایج نشان می دهند: مهاجرت نانوذرات نقش بسیار مهمی را در افزایش انتقال حرارت نانوسیالات ایفا می کند. همچنین توزیع غیر یکنواخت کسر حجمی نیز با تغییر اعداد بی بعد حاصل از بی بعد سازی معادلات مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت عدم تعادل حرارتی بین فازها، ۴ مدل برای محاسبه شار کلی در حالت دمای ثابت بر روی دیواره ارائه شده است. همچنین برای حالت شار ثابت روی دیواره ۳ مدل برای محاسبه شار جذب شده توسط هر کدام از فازها ارائه شده و با هم مقایسه می شوند. بررسی اثرات پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد نشان می دهند: این پارامتر تأثیر زیادی بر روی انتقال حرارت و شار حرارتی کل و شار جذب شده توسط فازها دارد. در روش آزمایشگاهی اثرات کسر حجمی بر روی انتقال حرارت و افت فشار مورد بررسی قرار می گیرد. در این آزمایش از نانوسیال آلومینا/آب استفاده شده است و کسر حجمی از ۰-۵٪ تغییر می کند. نتایج نشان می دهد افزایش کسر حجمی باعث افزایش انتقال حرارت و افت فشار می شود. نتایج عددی برای لوله حاوی ماده متخلخل نیز بررسی شده است و مدل های پیشنهادی برای محاسبه شار حرارتی در حالت دمای ثابت دیواره با نتایج تجربی مقایسه و بهترین مدل معرفی شده است.

کلمات کلیدی: نانوسیال، محیط متخلخل، انتقال حرارت اجباری، مهاجرت نانوذرات، کسر حجمی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

- 1- Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel, M.J. Maghrebi, M.Nazari and T. Armaghani, Transport in porous media,93,401-413,2012(ISI)
- 2- Effects of Particle Migration on Nanofluid Forced Convection Heat Transfer in a Local Thermal Non-Equilibrium Porous Channel, T. Armaghani, M.J. Maghrebi, A.J. Chamkha and M. Nazari, Journal of Nanofluid,3,51-59,2014(ASP)
- 3- Numerical Analysis of a Nanofluid Forced Convection in a Porous Channel: A New Heat Flux Model in 'L.T.N.E.' Condition, T. Armaghani, A.J. Chamkha, M.J. Maghrebi, and M. Nazari,Journal of Porous Media, Accepted(ISI)
- 4- New Models for Heat Flux Splitting at the Boundary of a Porous Medium: Three Energy Equations for Nanofluid Flow under Local Thermal Non-Equilibrium Condition, M. Nazari, M.J. Maghrebi, T. Armaghani, A.J. Chamkha, Canadian Journal of Physics , Accepted(ISI)
- 5- Comparison of nanofluid convective heat transfer between single and two phase approach in porous channel, T. Armaghani, M.J. Maghrebi and M. Nazari, Journal of Modeling, Accepted(ISC)
- 6- Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel: Three-Phase Approach, T. Armaghani, M.J. Maghrebi and M. Nazari, Meccanica, under reviewe(ISI)
- 7- Effects of Nield Number on Forced Convective Heat Transfer of Nanofluid on porous Channel, T. Armaghani, M.J. Maghrebi and M. Nazari, Journal of Modeling, Accepted(ISC)

فصل اول: مقدمه ای بر نانوسیالات

۲	مقدمه
۳	۱-۱- روش تهیه نانوسیالات
۴	۱-۱-۱- روش تک مرحله ای
۶	۱-۱-۲- روش دو مرحله ای
۹	۲-۱- پایداری نانوذرات در نانوسیالات
۹	۱-۲-۱- تغییر PH سوسپانسیون
۱۰	۱-۲-۲- استفاده از فعال کننده سطح و پخش کننده ها
۱۰	۱-۲-۳- استفاده از نوسانات ماورای صوت
۱۱	۳-۱- ویژگیهای اصلی نانوسیالات
۱۲	۴-۱- کاربرد نانوسیالات
۱۷	۵-۱- مطالعات ضریب هدایت حرارتی
۱۷	۱-۵-۱- مطالعات تجربی هدایت حرارتی
۱۷	۱-۵-۱-۱- اثر درصد حجمی ذره
۲۱	۱-۵-۱-۲- اثر نوع ذره
۲۳	۱-۵-۱-۳- اثر اندازه ذره
۲۵	۱-۵-۱-۴- اثر شکل ذره
۲۷	۱-۵-۱-۵- اثر نوع سیال مبنا
۲۸	۱-۵-۱-۶- اثر دما
۳۲	۱-۵-۱-۷- اثر افزودنی ها
۳۳	۱-۵-۱-۸- اثر قدرت اسیدی
۳۴	۱-۵-۲- مطالعات تحلیلی هدایت حرارتی
۳۷	۱-۶- انتقال حرارت جابجایی
۴۱	۱-۶-۱- تحقیقات تجربی
۴۶	۱-۶-۲- تحقیقات تئوری
۴۵	۱-۷- انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل
۴۹	فصل دوم: معادلات حاکم و روش حل عددی
۵۰	۱-۲- هندسه مورد مطالعه
۵۰	۱-۲-۲- فرضیات
۵۱	۱-۲-۳- محیط متخلخل
۵۱	۱-۳-۱-۲- روشهای تحلیل محیط متخلخل

۵۲	۲-۲-معادلات حاکم
۵۷	۳-۲- روش حل عددی معادلات حاکم
۶۱	۴-۲- شرایط مرزی و اولیه
۶۱	۲-۴-۱- تعادل حرارتی
۶۲	۲-۴-۲- عدم تعادل حرارتی
۶۳	۵-۲- اعتبارسنجی برنامه عددی
۶۳	۲-۵-۱- جریان توسعه یافته داری برینکمن فورچهیمر
۶۳	۲-۵-۱-۱- مقایسه با حل تحلیلی معادله جریان توسعه یافته داری برینکمن
۶۴	۲-۵-۱-۲- مقایسه با حل تحلیلی معادله جریان توسعه یافته داری برینکمن فورچهیمر
۶۵	۲-۵-۲- معادله انرژی
۶۹	فصل سوم: نتایج عددی کانال متخلخل
۷۰	۳-۱- تعادل حرارتی
۸۳	۳-۲- عدم تعادل حرارتی
۸۳	۳-۲-۱- ارائه ۴ مدل برای محاسبه شار حرارتی
۸۵	۳-۲-۲- بررسی تأثیرات عدد نولد
۹۱	۳-۲-۳- تأثیرات مهاجرت نانوذرات
۱۰۱	۳-۲-۴- پیشنهاد سه مدل برای محاسبه شار جذب شده توسط فازها
۱۱۳	فصل چهارم: نتایج آزمایشگاهی لوله متخلخل
۱۱۴	۴-۱- طراحی و ساخت
۱۱۶	۴-۲- کالیبراسیون
۱۱۶	۴-۳- نانوسیالات در آزمایشات
۱۱۸	۴-۴- روش انجام آزمایش
۱۱۸	۴-۵- تست آب
۱۱۹	۴-۵-۱- تست ضریب انتقال حرارت آب در لوله خالی
۱۲۱	۴-۵-۲- تست افت فشار آب
۱۲۳	۴-۶- تست نانوسیال آلومینا/آب
۱۲۳	۴-۶-۱- محاسبه خواص نانوسیال آلومینا/آب
۱۲۴	۴-۶-۲- آزمایشات انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در لوله متخلخل
۱۲۵	۴-۷- آزمایشات افت فشار نانوسیال در لوله متخلخل
۱۲۷	فصل پنجم: نتایج عددی لوله متخلخل
۱۲۸	۵-۱- هندسه مورد مطالعه
۱۲۸	۵-۲- معادلات حاکم و روش حل

۱۳۱	۵-۳- اعتبارسنجی نتایج عددی
۱۳۳	۵-۴- نتایج عددی
۱۳۸	۵-۵- مقایسه مدل‌های پیشنهادی با نتایج تجربی
۱۴۰	بحث و نتیجه‌گیری
۱۴۲	پیشنهاد و کارهای آینده
۱۴۳	پیوست: مفاهیم فیزیکی متغیرها
۱۴۵	مراجع

شماره صفحه

فهرست اشکال

۳	شکل ۱-۱: نانوسیال واقعی و شماتیک
۵	شکل ۱-۲: روش تک مرحله ای تهیه نانوسیال
۶	شکل ۱-۳: تصویر TEM نانوسیال
۷	شکل ۱-۴: نانوسیال تهیه شده به روش دو مرحله ای
۸	شکل ۱-۵: تصویر TEM از توده ای شدن نانوذرات
۱۸	شکل ۱-۶: افزایش هدایت حرارتی آلومینا/آب با کسر حجمی
۱۹	شکل ۱-۷: اثر غلظت ذره در آب
۱۹	شکل ۱-۸: افزایش هدایت حرارتی اکسید مس در آب
۲۰	شکل ۱-۹: اثر غلظت ذره در نانوسیال اکسید مس آب
۲۰	شکل ۱-۱۰: اثر غلظت ذره در نانوسیال اکسید مس در اتیلن گلیکول
۲۱	شکل ۱-۱۱: اثر نوع ذره در آب
۲۲	شکل ۱-۱۲: اثر نوع ذره در اتیلن گلیکول
۲۲	شکل ۱-۱۳: اثر نوع ذره در اتیلن گلیکول
۲۳	شکل ۱-۱۴: اثر اندازه آلومینا در آب
۲۴	شکل ۱-۱۵: اثر اندازه آلومینا در اتیلن گلیکول
۲۵	شکل ۱-۱۶: اثر اندازه ذره برای اکسید مس در آب
۲۶	شکل ۱-۱۷: اثر شکل ذره برای SiC در آب
۲۶	شکل ۱-۱۸: اثر شکل ذره برای SiC در اتیلن گلیکول
۲۷	شکل ۱-۱۹: اثر شکل ذره برای اکسید تیتانیوم در آب
۲۸	شکل ۱-۲۰: اثر نوع سیال مبنا
۲۸	شکل ۱-۲۱: اثر دما برای آلومینا در آب
۲۹	شکل ۱-۲۲: اثر دما برای آلومینا در آب
۲۹	شکل ۱-۲۳: اثر دما برای آلومینا در آب
۳۰	شکل ۱-۲۴: اثر دما برای نانوسیال اکسید مس در آب
۳۰	شکل ۱-۲۵: اثر دما برای نانوسیال اکسید مس در آب
۳۱	شکل ۱-۲۶: اثر دما برای نانولوله های کربنی در آب
۳۱	شکل ۱-۲۷: اثر دما برای نانولوله های کربنی در آب
۳۲	شکل ۱-۲۸: اثر افزودنی برای مس در اتیلن گلیکول
۳۲	شکل ۱-۲۹: اثر افزودنی برای نانولوله کربنی در آب
۳۳	شکل ۱-۳۰: اثر قدرت اسیدی در نانوسیال آلومینا/آب
۳۳	شکل ۱-۳۱: اثر قدرت اسیدی در نانوسیال اکسید مس در آب
۵۰	شکل ۱-۲: کانال متخلخل دو بعدی مورد مطالعه

- ۶۴ شکل ۲-۲: مقایسه حل عددی با حل تحلیلی داری برینکمن
- ۶۵ شکل ۳-۲: مقایسه حل عددی با حل تحلیلی داری برینکمن فورچهیمر
- ۶۶ شکل ۴-۲: مقایسه عدد ناسلت منتج از حل عددی با حل تحلیلی
- ۶۶ شکل ۵-۲: مقایسه عدد ناسلت منتج از حل عددی با حل تحلیلی
- ۶۸ شکل ۶-۲: توزیع دمای جامد، نانوذره و سیال
- ۷۱ شکل ۳-۱: تغییرات عدد ناسلت به ازای تغییر عدد لوئیس
- ۷۲ شکل ۳-۲: تغییرات کسر حجمی به ازای تغییر عدد لوئیس
- ۷۲ شکل ۳-۳: تغییرات توزیع دما به ازای تغییر عدد لوئیس
- ۷۳ شکل ۴-۳: تغییرات کسر حجمی به ازای تغییر N_{bt}
- ۷۴ شکل ۵-۳: تغییرات عدد ناسلت به ازای تغییر N_{bt}
- ۷۴ شکل ۶-۳: تغییرات دمای بی بعد به ازای تغییر N_{bt}
- ۷۵ شکل ۳-۷: تغییرات کسر حجمی به ازای تغییر عدد اشمیت
- ۷۶ شکل ۸-۳: تغییرات توزیع دما به ازای تغییر عدد اشمیت
- ۷۶ شکل ۹-۳: تغییرات عدد ناسلت محلی به ازای تغییر عدد اشمیت
- ۷۸ شکل ۳-۱۰: مقایسه عدد ناسلت و توزیع کسر حجمی در حالت تکفاز و دوفاز
- ۷۹ شکل ۳-۱۱: مقایسه عدد ناسلت و توزیع کسر حجمی در حالت تکفاز و دوفاز
- ۸۱ شکل ۳-۱۲: مقایسه عدد ناسلت و توزیع کسر حجمی در حالت تکفاز و دوفاز
- ۸۶ شکل ۳-۱۳: توزیع دمای سیال به ازای تغییرات عدد نیلد
- ۸۷ شکل ۳-۱۴: توزیع دمای جامد به ازای تغییرات عدد نیلد
- ۸۷ شکل ۳-۱۵: توزیع دمای نانوذره به ازای تغییرات عدد نیلد
- ۸۸ شکل ۳-۱۶: شار حرارتی سیال به ازای مقادیر مختلف عدد نیلد
- ۸۹ شکل ۳-۱۷: شار حرارتی جامد به ازای مقادیر مختلف عدد نیلد
- ۹۰ شکل ۳-۱۸: تغییرات شار حرارتی در مدل‌های مختلف
- ۹۳ شکل ۳-۱۹: تغییرات توزیع دما و شار و توزیع کسر حجمی با عدد لوئیس
- ۹۵ شکل ۳-۱۹: تغییرات توزیع دمای جامد و شار حرارتی جامد و شار حرارتی با عدد لوئیس
- ۹۷ شکل ۳-۲۰: تغییرات توزیع دمای سیال و شار و توزیع کسر حجمی با N_{bt}
- ۹۹ شکل ۳-۲۰: تغییرات توزیع دمای جامد و شار حرارتی جامد و شار حرارتی نانوذره N_{bt}
- ۱۰۱ شکل ۳-۲۱: تغییرات توزیع دمای سیال و دمای جامد و کسر حجمی
- ۱۰۲ شکل ۳-۲۲: توزیع شار حرارتی دیواره به سیال پایه، نانوذره و جسم جامد
- ۱۰۷ شکل ۳-۲۳: تغییرات توزیع دمای سیال منتج از مدل‌های مختلف با تغییرات عدد نیلد
- ۱۰۷ شکل ۳-۲۴: تغییرات توزیع دمای سیال منتج از مدل‌های مختلف با تغییرات عدد نیلد
- ۱۰۸ شکل ۳-۲۵: تغییرات توزیع دمای نانوذره منتج از مدل‌های مختلف با تغییرات عدد نیلد
- ۱۰۸ شکل ۳-۲۶: تغییرات توزیع دمای جسم جامد منتج از مدل‌های مختلف با تغییرات عدد نیلد

- ۱۱۰ شکل ۳-۲۷: تغییرات عدد ناسلت محلی سیال جامد و نانوذره با عدد نیلد
- ۱۱۲ شکل ۳-۲۸: تغییرات عدد ناسلت محلی سیال جامد و نانوذره با عدد نیلد
- ۱۱۴ شکل ۴-۱: شماتیک سیستم آزمایشگاهی
- ۱۲۱ شکل ۴-۲: مقایسه عدد ناسلت تجربی و روابط پیش‌بینی شده
- ۱۲۲ شکل ۴-۳: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده با معادله بلازیوس
- ۱۲۴ شکل ۴-۴: تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب
- ۱۲۵ شکل ۴-۵: تغییرات نسبت عدد ناسلت نانوسیال به آب بر حسب رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب
- ۱۲۶ شکل ۴-۶: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای نانوسیال
- ۱۲۸ شکل ۵-۱: شماتیکی از هندسه مورد مطالعه
- ۱۳۱ شکل ۵-۲: پروفیل سرعت توسعه یافته برای جریان نانوسیال در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۹
- ۱۳۲ شکل ۵-۳: پروفیل دما برای نانوسیال در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۹
- ۱۳۴ شکل ۵-۴: توزیع دمای نانوسیال و جسم جامد برای $h_{fs} = 50000$
- ۱۳۵ شکل ۵-۵: توزیع دمای نانوسیال و جسم جامد برای $h_{fs} = 5000$
- ۱۳۶ شکل ۵-۶: توزیع دمای نانوسیال و جسم جامد برای $h_{fs} = 500000$
- ۱۳۷ شکل ۵-۷: توزیع دمای نانوسیال و جسم جامد در مقادیر مختلف ضریب انتقال حرارت
- ۱۳۸ شکل ۵-۷: توزیع سرعت در لوله متخلخل

شماره صفحه

فهرست جداول

۳۹	جدول ۱-۱: بررسی نتایج تجربی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات
۴۴	جدول ۱-۲: بررسی نتایج عددی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات
۶۷	جدول ۱-۲: بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه برای حالت دما ثابت
۶۷	جدول ۲-۲: بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه برای حالت شار ثابت
۱۳۰	جدول ۱-۵: خواص آب و آلومینا
۱۳۱	جدول ۲-۵: شرایط مرزی
۱۳۲	جدول ۳-۵: بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه
۶۰	فلوچارت ۱-۲: مراحل حل عددی معادلات حاکم بر کانال متخلخل

علائم و نشانه ها

u	سرعت (ms^{-1})
K	نفوذ پذیری (m^2)
P	فشار (Nm^{-2})
T	دما (k)
D_T	نفوذ ترموفورز (m^2s^{-1})
D_B	نفوذ براونی (m^2s^{-1})
q''	شار حرارتی
t	زمان (s)
Re	عدد رینولدز
pr	عدد پرانتل
N_{BT}	ضریب نفوذ اصلاح شده
k	ضریب هدایت ($\text{wm}^{-1}\text{k}^{-1}$)
Le	عدد لوئیس
x, y	محورهای مختصات (m)
Sc	عدد اشمیت
Da	عدد دارسی
H	نیم عرض کانال (m)
N_{HP}	پارامتر مربوط به انتقال حرارت سیال/جسم جامد
N_{HS}	پارامتر مربوط به انتقال حرارت سیال/نانوذره
h_{fp}	ضریب انتقال حرارت سیال ذره ($\text{wm}^{-3}\text{k}^{-1}$)
h_{fs}	ضریب انتقال حرارت سیال جامد ($\text{wm}^{-3}\text{k}^{-1}$)

حروف یونانی

ε	نسبت تخلخل
ρ	چگالی (kgm^{-3})
φ	کسر حجمی
σ	نسبت ظرفیت حرارتی
Δ	پارامتر اینرسی
α	نفوذ حرارتی موثر
τ	نفوذ اصلاح شده
ε_p	نسبت نفوذ حرارتی اصلاح شده
ε_s	نسبت نفوذ حرارتی اصلاح شده

نسبت ظرفیت حرارتی اصلاح شده	γ_p
نسبت ظرفیت حرارتی اصلاح شده	γ_s

زیرنویس و
بالانویسها

سیال	F
جامد	S
نانوسیال	nf
نانوذره	p
بی بعد	*

فصل اول:

مقدمه‌ای بر نانوسیالات

مقدمه:

یکی از راهکارهای افزایش انتقال حرارت در صنایع افزودن ذراتی ریز با قابلیت هدایت بالا به سیال پایه است؛ این مهم تا قبل از سال ۱۹۹۵ با افزودن ذراتی در ابعاد میلی‌متر و میکرومتر محقق می‌شد ولی مشکلاتی چون عدم پایداری و ته‌نشینی^۱ سریع ذرات استفاده از میکروسیالها را محدود می‌کرد. با ظهور انقلاب نانو، نانوذرات در ابعاد نانومتر تولید و درون سیال پایه پراکنده شدند و مشکلاتی از قبیل ته‌نشینی و عدم پایداری کمتر شد و انتقال حرارت به طرز چشمگیری افزایش یافت. این سیالات را نانوسیال می‌گویند و همانطور که اشاره شد نانوسیالات از دو بخش کلی تشکیل می‌شوند:

۱- نانوذرات: ذراتی با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر و دارای جنس‌های مختلف:

(- اکسیدهای فلزی: اکسید آلومینیوم (آلومینا)، اکسید مس و اکسید تیتانیوم و...

(- نانوذرات فلزی: مس و آلومینیوم و...

(- کربیدهای فلزی: کربید تیتانیوم، کربید سیلیس و...

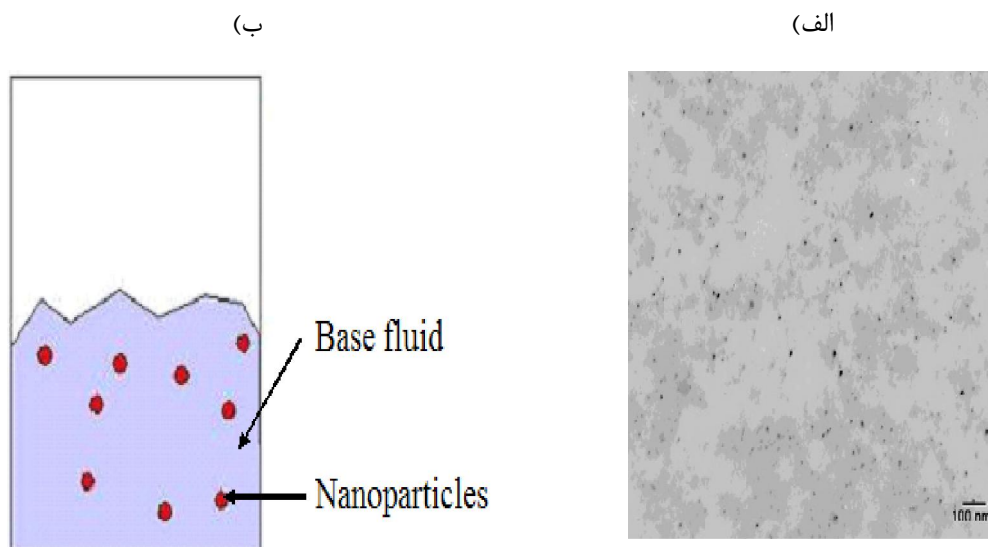
(- نانوذرات نیتریدی: نیتريد آلومینیوم و نیتريد سیلیس و...

(- نوع دیگر و بسیار مهم نانوذرات شامل گرافیت و نانو لوله کربنی یک، دو و یا چند دیواره و مواد کامپوزیت می‌باشند.

۲- سیال پایه: شامل آب، اتیلن گلیکول، روغن، محلولهای پلیمری و...

هر چند بسیاری از نانوسیالات ساخته دست بشر هستند ولی نکته جالب آن است که نانوسیالات در طبیعت نیز وجود دارند و مهم‌ترین نانوسیالی را که می‌توان در طبیعت بیان کرد خون است.

¹ Settling



شکل ۱-۱: نانوسیال به صورت الف) واقعی ب) شماتیک

۱-۱- روش تهیه نانوسیالات:

تکنولوژیهای مدرن، قابلیت ساخت مواد در اندازه نانومتر را فراهم کرده است. نانوذرات در گروه موادی هستند که در مقایسه با مواد مشابه به اندازه‌های بزرگتر (میکرون و بزرگتر) خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی را ارائه می‌کنند. نانوذرات به کار رفته در نانوسیالات از مواد مختلفی ساخته می‌شوند بنابراین واضح است که برای ساخت نانوسیالاتی مختلف باید روش‌های متفاوتی با توجه به مواد موجود در آنها مورد استفاده قرار گیرد؛ هم‌چنین بهبود خواص حرارتی نانوسیالات احتیاج به انتخاب روش تهیه مناسب این سوسپانسیون دارد تا از ته نشینی و ناپایداری آنها جلوگیری شود.

مطالعات زیادی روی چگونگی تهیه نانوذرات و روشهای پراکنده سازی آنها در سیال پایه انجام شده است که در این قسمت به طور مختصر چند روش متداول ذکر می‌شود.

فرایندهای ساخت نانوذرات را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: فرایندهای فیزیکی و فرایندهای شیمیایی. از روشهای فیزیکی، روش کوبیدن (خرد کردن) مکانیکی مواد و تکنیک میعان گاز ساکن را می‌توان نام برد. روشهای شیمیایی برای تولید نانوذرات عبارتند از رسوب دادن شیمیایی، ته نشینی بخار شیمیایی، میکرو امولسیون‌ها، اسپری تفکافت (تجزیه در اثر حرارت) و اسپری حرارتی.

طرز تهیه نانوسیال اولین اقدام کلیدی در کاربردی کردن آن در بهبود انتقال حرارت است. تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانوذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد، نباید مانند یک اختلاط ساده جامد-مایع در نظر گرفت. زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژه‌ای است. برخی از این شرایط عبارتند از یکنواخت بودن سوسپانسیون، پایداری^۱ سوسپانسیون، توده‌ای شدن^۲ کم ذرات، ته نشین نشدن و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال. برای رسیدن به چنین خواص ویژه‌ای از راهکارهای مختلف استفاده می‌شود. به عنوان مثال می‌توان از تغییر PH محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال سطحی، استفاده از مواد پراکنده‌ساز و ضد انعقاد و یا از ارتعاشات برای رسیدن به ویژگی‌های مذکور استفاده کرد.

تمام این روش‌ها منجر به تغییر خواص سطحی و عدم تشکیل خوشه‌های ذرات معلق به منظور ایجاد یک سوسپانسیون پایدار می‌شوند. با در نظر گرفتن ملاحظات ذکر شده، شیوه‌های تهیه نانوسیال کلاً به دو روش تقسیم می‌شود.

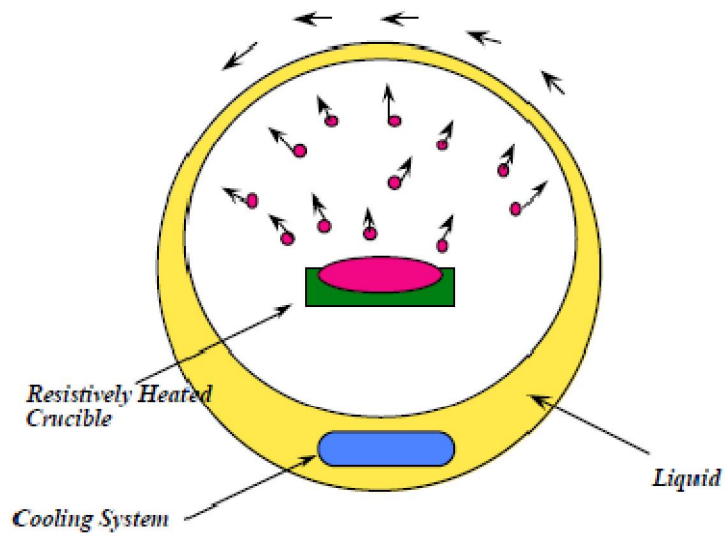
۱-۱-۱- روش تهیه یک مرحله‌ای

در روش یک مرحله‌ای، ذرات مورد نظر به طور مستقیم در درون سیال تهیه و پراکنده می‌شوند. به عنوان مثال برای تهیه نانوذرات فلزی درون یک سیال، ماده فلزی تحت شرایط خلاء تبخیر می‌شود و بخار فلز،

^۱ Stability

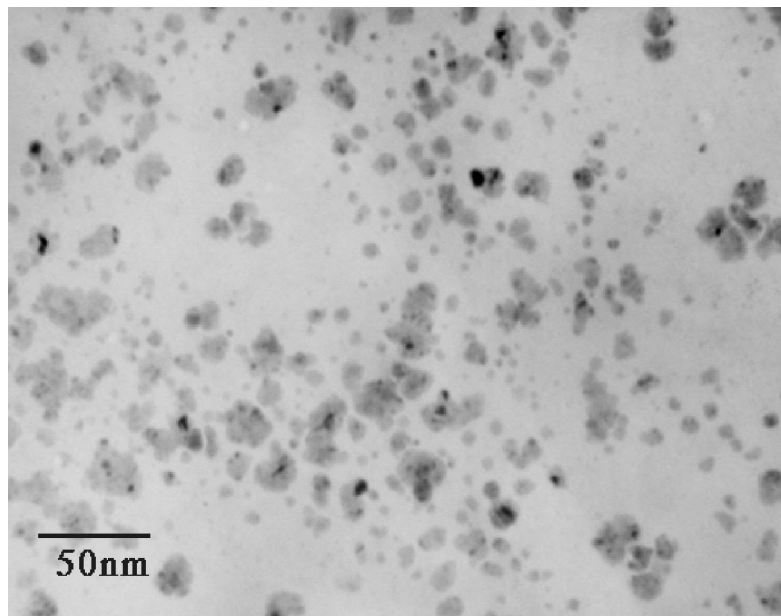
^۲ Agglomeration

مستقیماً به درون سیال پایه هدایت و به شکل نانوذرات کندانس می‌شود. این روش تهیه نانوسیال به روش پایین به بالا نیز معروف است. این روش که در شکل ۱-۲ فرایند آن نشان داده شده است، روش مناسبی برای تولید نانوسیالات فلزی است.



شکل ۱-۲: روش تک مرحله‌ای تهیه نانوسیال [۱]

در این روش تهیه نانوسیال، سطح نانوذرات در معرض شرایط نامطلوبی قرار نگرفته و پوشش‌های ناخواسته‌ای روی آنها تشکیل نمی‌شود. به همین دلیل نانوذرات تهیه شده از این طریق بسیار تمیز است. این مسئله، مزیت روش یک مرحله‌ای تهیه نانوسیال است. تهیه نانوسیال با این روش اغلب همراه با مقداری متراکم شدن و تجمع ذرات در درون سیال است. اما مزیت اصلی روش یک مرحله‌ای کنترل بسیار مناسب روی اندازه و توزیع ذرات است. شکل ۱-۳ نشان‌دهنده نانوسیال حاوی نانوذرات مس است که به طریق یک مرحله‌ای تهیه شده است.



شکل ۱-۳: تصویر TEM نانوسیال حاوی نانوذرات مس که به طریق یک مرحله‌ای تهیه شده است [۲]

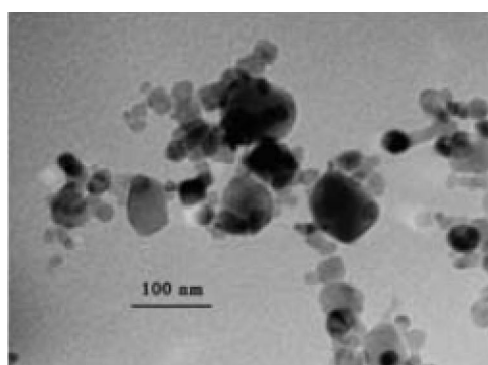
روش یک مرحله‌ای تهیه نانوسیال به دلایل فنی اغلب کمتر مورد استفاده محققین قرار گرفته است. در عوض در اغلب کارهای تحقیقاتی محققین در گزارش‌های خود به استفاده از روش دو مرحله‌ای جهت تهیه نانوسیال اشاره کرده‌اند. علت این مسئله نیز آسان‌تر بودن تولید نانوسیال با نانوپودرهای آماده و خریداری شده است.

۱-۲-۱- روش تهیه دو مرحله‌ای

متداول‌ترین روش تهیه نانوسیالات، روش دو مرحله‌ای است. در روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال، می‌توان از انواع پودرها با اندازه‌های مختلف به راحتی استفاده کرد، مسئله‌ای که در روش یک مرحله‌ای با مشکلات بیشتری همراه است. در این روش ابتدا نانوذرات معمولاً به وسیله روش رسوب بخار شیمیایی در فضای گاز بی اثر به صورت پودر خشک تهیه می‌شود، در مرحله بعد نانوذره یا نانولوله در داخل سیال پراکنده می‌شود. به عبارت دیگر، ابتدا نانوذره مورد نظر یا نانولوله تهیه شده و سپس به سیال پایه افزوده

¹ Transmission Electron Microscope

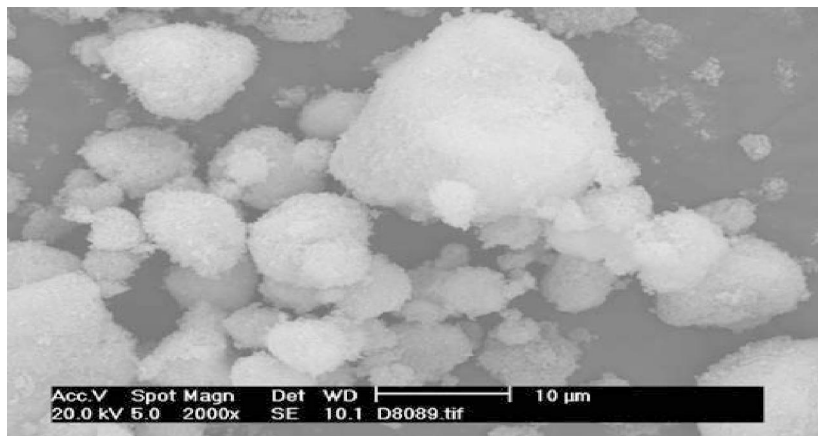
می‌شود. برای پایداری نانوسیال در این حالت، از روش‌هایی مانند لرزاننده آلتراسونیک^۱ و یا سورفکتانت‌ها استفاده می‌شود تا توده نانوذره‌ای به حداقل برسد و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. به نظر می‌رسد که این روش با توجه به این که می‌توان نانوذرات و نانولوله‌ها را بیشتر و اغلب آسان‌تر از روش تک مرحله‌ای تهیه کرد، اقتصادی بوده و برای کاربردهای صنعتی بهتر باشد. شکل ۴-۱ نشان‌دهنده نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دومرحله‌ای است.



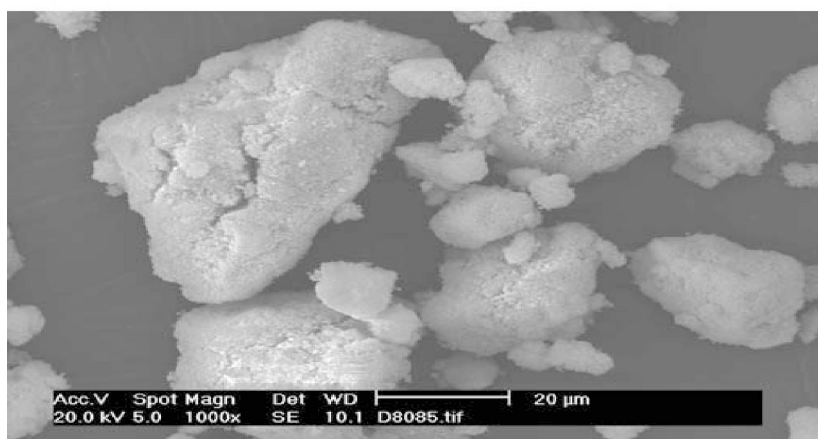
شکل ۴-۱: نانوسیال تهیه شده با استفاده از نانوذرات اکسید مس به طریق دو مرحله‌ای [۲]

در روش دو مرحله‌ای نیز باید مسئله کلوخه و توده‌ای شدن و نیز چسبندگی نانوذرات را در نظر گرفت. شکستن وضعیت توده‌ای ذرات و برگرداندن آنها به وضعیت اولیه از اقدامات اساسی است که در تهیه نانوسیال باید صورت بگیرد. چرا که اندازه و توزیع ذرات در داخل سیال مهمترین نقش را در تعیین رفتار حرارتی و هیدرولیکی آن بر عهده دارد. شکل ۵-۱ نشان‌دهنده ایجاد وضعیت کلوخه‌ای در نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم است. روش دو مرحله‌ای شیوه‌ای مناسب برای تهیه نانوسیالات اکسیدی است. روش دو مرحله‌ای برای بعضی مواد مانند اکسید فلزات در آب دیونیزه شده نیز بسیار مناسب است و برای نانوسیالات شامل نانوذرات فلزی سنگین کمتر موفق بوده است. این روش دارای مزایای بالقوه‌ای است زیرا شرکت‌های بسیاری توانایی تهیه نانوپودرها را در مقیاس صنعتی دارند.

^۱ Ultrasonic Vibrator



(a) Al_2O_3



(b) CuO

شکل ۱-۵: تصویر TEM از توده‌ای شدن نانوذرات [۳]

علاوه بر دستگاه ماورای صوت، تجهیزات دیگری نیز برای پراکنده‌سازی نانوذرات در درون سیال متداول است از جمله این تجهیزات، همزن مغناطیسی و همزن با توان برشی بالا می‌باشند. زمان فراوری نانوسیال و شدت همزن تأثیر مهمی بر پراکندگی نانوذرات در درون سیال پایه دارند. پیوندهای ضعیف ایجاد شده در بین ذرات توده‌ای شده با اعمال نیرو شکسته می‌شود. با این حال نانوذرات به شدت متمایل به توده‌ای شدن مجدد هستند. یکی از دلایل این مسئله نیروی واندروالس است.

نانوذراتی که به روش یک مرحله‌ای و یا به روش دو مرحله‌ای تهیه می‌گردند، باید تا حد امکان پایدار بوده و ذرات پراکنده شده در سیال تجمع پیدا نکرده و کلوخه و ته‌نشین نشوند. برای رسیدن به چنین وضعیت پایداری باید مسئله پایداری تعلیق نانوذرات در سیال مورد توجه قرار گیرد.

۱-۲- پایداری نانوذرات در نانوسیالات:

در اندازه و مقیاس نانو، اتم‌های سطحی نانوذرات به شدت افزایش پیدا کرده و اهمیت می‌یابند. به عبارت دیگر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سطح، اهمیت بسیار بیشتری نسبت به ساختار ماده پیدا می‌کند.

برای پایدار کردن نانوذرات و جلوگیری از کلوخه و توده‌ای شدن ذرات که سبب سنگینی و تسریع ته‌نشین می‌شود، همان‌طور که اشاره شد از روشهای مختلف از جمله پایدارکننده‌ها، تغییر PH و ایجاد نوسان ماورای صوت استفاده می‌شود که در ادامه به تفصیل آورده شده است.

۱-۲-۱- تغییر PH سوسپانسیون

وقتی نانوذرات در آب پخش می‌شوند، رفتار کلی برهم‌کنش آب-ذره به خواص سطح ذره بستگی دارد. در مورد هر ذره یک PH معین تحت عنوان PH نقطه ایزوالکتریک وجود دارد. در این مقدار PH نیروهای دافعه بین ذرات صفر بوده و در نتیجه ذرات به هم می‌پیوندند. بنابراین وقتی PH مساوی یا نزدیک PH نقطه ایزوالکتریک باشد، سوسپانسیون ناپایدار است. با افزایش اختلاف PH نسبت به این نقطه، نیروهای آب‌پوشی بین ذرات افزایش می‌یابد. در نتیجه تحریک نانوذرات در سوسپانسیون افزایش یافته و موجب پایداری بیشتر نانوسیال می‌شود.

۱-۲-۲- استفاده از فعال‌کننده‌های سطح^۱ و پخش‌کننده‌ها

یکی از روش‌های پایدارسازی سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات استفاده از پایدارکننده‌های شیمیایی است. برخی از محققین استفاده از این روش را مناسب نمی‌دانند. زیرا افزودن پخش‌کننده می‌تواند ضریب هدایت حرارتی سیال پایه را تحت تأثیر گذاشته و در نتیجه بهبود واقعی هدایت حرارتی با استفاده از نانوذرات تحت‌الشعاع قرار گیرد. جزء پایدارکننده سوسپانسیون که به نانوسیال افزوده می‌شود، باید دارای ویژگی‌هایی باشد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به سازگاری شیمیایی با سیال پایه، سازگاری شیمیایی با نانوذرات و عدم ایجاد واکنش‌های شیمیایی با سیال پایه و نانوذرات و عدم تغییر PH و عدم ایجاد محیط خورنده اشاره کرد.

متداول‌ترین پایدارکننده‌هایی که تاکنون در مقالات به آنها اشاره شده است، مواد فعال سطحی مختلف می‌باشند. از جمله این پایدارکننده‌ها می‌توان به تی‌آل‌ها، اولئیک اسید و نمک‌های لورات اشاره کرد. انتخاب پایدارکننده مناسب نیز اغلب بستگی به خواص ذرات و سیال مورد نظر دارد.

۱-۲-۳- استفاده از نوسانات ماورای صوت:

نوسانات ماورای صوت می‌تواند موجب شکسته شدن کلوخه‌های ذرات شده و در نتیجه پایداری سوسپانسیون‌ها را افزایش دهد. در اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی خواص نانوسیالات برای پراکنده کردن بهتر نانوذرات و پایداری بیشتر سوسپانسیون از نوسانات ماورای صوت استفاده شده است.

هر چند استفاده از نوسانات ماورای صوت یکی از روشهای متداول پراکنده‌سازی نانوذرات در سیال پایه است، لیکن زمان هم‌زدن و نوسانات نیز باید مورد توجه قرار بگیرد. در مواردی مشاهده شده است که افزایش زمان نوسان از یک حد معین به بعد به تسریع کلوخه شدن ثانویه ذرات سرعت می‌بخشد.

¹ Surfactant

۱-۳- ویژگی‌های اصلی نانوسیالات:

محققین بسیاری با بررسی نانوسیالات رفتارهای یکسانی از آنها مشاهده کردند:

۱- افزایش غیر عادی در قابلیت هدایت حرارتی سیال پایه:

ایستمن و همکاران [۴] افزایش ۴۰ درصدی در خواص هدایتی اتیلن گلیکول همراه با نانوذرات مس با قطر ۱۰ نانومتر با ۳ درصد کسر حجمی گزارش کردند. داس و همکاران [۵] از افزایش ۲۵ درصدی در خواص هدایتی آب با کسر حجمی ۱ تا ۴ درصد از نانوذرات اکسید آلومینیوم گزارش کردند.

۲- افزایش غیر عادی ویسکوزیته سیال پایه:

پاک و چو [۶] ویسکوزیته را در نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید تیتانیوم در کسر حجمی ۱ تا ۱۰ درصد اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که ویسکوزیته اینگونه از نانوسیالات خیلی بیشتر از آب خالص است و این به خوبی با مدل‌های مرسوم ویسکوزیته نظیر برینکمن مطابقت داشت.

۳- افزایش غیر عادی ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیال پایه

پاک و چو [۶] داده‌های انتقال حرارت برای نانوسیالاتی نظیر اکسید آلومینیوم-آب و اکسید تیتانیوم-آب در جریان درهم داخل لوله استوانه‌ای گزارش دادند. داده‌های آنها بیانگر این امر است که عدد ناسلت به میزان حدوداً ۳۰ درصد نسبت به مقدار پیش‌گویی شده توسط رابطه سیال خالص بیشتر است.

هرکدام از این ویژگی‌ها در جای خود برای سیستم حرارتی بسیار مطلوب است و در کنار هم نانوسیالات را بهترین انتخاب برای تولید سردکننده‌های مبتنی بر مایع می‌نماید.

۱-۴- کاربردهای نانوسیالات:

نانوسیالات کاربردهای زیادی دارند، در واقع اندازه ذرات است که چنین تفاوتی در خواص آنها ایجاد می‌کند و نانوسیالات ویژگی‌هایی کاملاً متفاوت از سیال پایه خود دارند. همچنین بسیاری از مسائل در مورد نانوسیالات نامعلوم است و نیازمند آزمایش و تحقیقات بیشتری است تا بتوان تئوری‌هایی در این زمینه مطرح کرد و خواص فیزیکی و شیمیایی آنها بهتر مشخص شود در این صورت می‌توان مسائل هزینه ساخت و تولید این سیالات را پایین آورد و در صنایع مختلف استفاده کرد تا به مرحله تجاری رساند. نانوسیالات را می‌توان در سیستم‌های گرمایی متنوع برای کاربردهای مهمی من جمله برای خنک‌کاری در وسایل نقلیه برای بهبود انتقال حرارت و بازده انرژی به کار برد. اخیراً تعداد شرکت‌هایی که به پتانسیل موجود در تکنولوژی نانوسیالات پی برده و در تلاش برای توسعه این زمینه برای کاربردهای ویژه صنعتی می‌باشند رو به افزایش می‌باشند. شرکت‌های GM و FORD در میان شرکت‌های دیگر که در صنعت حمل و نقل کار می‌کنند در مورد کاربردی کردن نانوسیالات در خودرو قدم‌های استواری را برداشته و به سرعت در حال پیشرفت می‌باشند.

در این قسمت به برخی از کاربردهای نانوسیالات در صناعی نظیر حمل و نقل، میکرو الکترونیک، صنایع دفاعی، هسته‌ای، فضایی و بیولوژیکی اشاره خواهیم کرد.

• حمل و نقل

ترکیب آب و اتیلن گلیکول، عموماً در صنایع خنک‌کاری اتومبیل به کار می‌رود که عمده‌تاً فاقد انتقال حرارت لازم در مقایسه با آب خالص است. افزایش نانوذرات به سیالات متداول خنک‌کاری موتور، قابلیت بهبود خنک‌کاری موتور وسایل نقلیه سبک و سنگین را دارا است. این امر سبب کوچک‌تر شدن سیستم خنک‌کاری می‌شود. کوچک شدن سیستم خنک‌کاری باعث کاهش وزن رادیاتورها می‌شود. بنابراین اتیلن گلیکول خالص حاوی نانوذرات، امید بخش جایگزین مناسب جهت اهداف خنک‌کاری موتور است.

اتیلن گلیکول خالص در مقایسه با مخلوط ۵۰-۵۰ آب و اتیلن گلیکول، سیالی با انتقال حرارت ضعیف است ولی اضافه کردن نانوذرات به اتیلن گلیکول خالص، انتقال حرارت آن را بهبود خواهد بخشید. چنانچه نرخ انتقال حرارت نانوسیال حاصل به نرخ انتقال حرارت مخلوط ۵۰-۵۰ برسد مزایای مهمی در بر دارد. شاید یکی از برجسته ترین آنها کارکرد در فشار پایین نانوسیال با سیال پایه اتیلن گلیکول در مقایسه با یک مخلوط ۵۰-۵۰ آب و اتیلن گلیکول باشد.

سیستم‌های خنک‌کاری که در فشار یک اتمسفر کار می‌کنند هزینه عمده پایین‌تری دارند. نانوسیال هم‌چنین دارای دمای جوش بالایی است که این امر برای باقی ماندن جریان سیال خنک‌کاری مطلوب است. علاوه بر این، مبردی با نقطه جوش بالاتر را می‌توان برای افزایش دمای متوسط کاری استفاده کرد تا از این طریق سیستم خنک‌کاری بیشتری را انجام دهد.

نانوسیالات در روغن‌کاری اجزای مکانیکی وسایل نقلیه نیز به کار می‌روند. تحقیقات نشان می‌دهد که نانوذرات با سطح اصلاح شده که در روغن‌های معدنی پخش شده‌اند در کاهش مقاومت سایشی، افزایش ظرفیت حمل بار و کاهش اصطکاک بین اجزای مکانیکی وسایل نقلیه مؤثر است. این نتایج برای بهبود نرخ انتقال حرارت در سیستم‌های مختلف وسایل نقلیه در اثر استفاده از نانوسیالات دلگرم کننده است.

• خنک‌کاری اجزای الکترونیکی:

در سال‌های اخیر حرارت تولید شده در مدارهای یک‌پارچه و میکروپروسسورها به طور نگران کننده‌ای افزایش یافته و پیش بینی می‌شود که این روند در آینده نیز ادامه یابد.

اخیراً در مؤسسه بین المللی رود مپ که روی نیم‌هادی‌ها کار می‌کند، برنامه ریزی شده است که تا سال ۲۰۱۸ مدارهای یک‌پارچه با کارایی بالا شامل بیش از ۹/۸ بلیون ترانزیستور روی یک تراشه با مساحت ۲۸۰ میلیمتر مربع که بیشتر از ۴۰ برابر تراشه‌های امروزی به اندازه گره ۹۰ نانومتر است، تولید

شود. این پروژه طوری طرح‌ریزی شده است که برای پروسسورهای آینده که قرار است در کامپیوترها و سرورهای با کارایی بالا به کار روند باید حرارتی در حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ وات بر سانتی متر مربع از آن خارج شود.

تکنیک‌های خنک‌کاری با هوا برای زدودن این حرارت تقریباً به پایان عمرشان نزدیک می‌شوند و تکنیک‌های خنک‌کاری با مایع جایگزین این روش‌ها می‌شوند. سیالات تک‌فاز، دوفاز و نانوسیالات، انتخابهای مناسبی برای جایگزینی هوا می‌باشند. نانوسیالات به عنوان سیال عامل بر لوله‌های حرارتی در کاربردهای خنک‌کاری اجزای الکترونیک مطرح شده‌اند. نانوسیالات می‌توانند با غلبه بر یکی از بزرگترین محدودیت‌های موجود بر سر راه توسعه میکرو تراشه‌های کوچکتر، که پخش سریع حرارت است، راه را برای رسیدن به نسل‌های بعدی رایانه‌ها هموار کنند.

• صنایع دفاعی:

برخی از وسایل و سیستم‌های نظامی به یک سیستم با شار حرارتی زیاد نیاز دارند. در این سطح، خنک‌کاری با سیالات متداول چالش برانگیز است.

نمونه‌هایی از کاربردهای نظامی نانوسیالات شامل خنک‌کاری مدارهای قدرت و اسلحه‌های انرژی مستقیم می‌باشند. اسلحه‌های انرژی مستقیم و مدارهای قدرت، شار حرارتی بالایی بزرگتر از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ وات بر سانتی متر مربع ایجاد می‌کنند و فراهم آوردن خنک‌کاری کافی برای آنها و مدار قدرت الکترونیک شان امری حیاتی است. نانوسیالات پتانسیل تولید خنک‌کاری مورد نیاز در این قبیل کاربردها و همچنین در دیگر سیستم‌های نظامی شامل وسایل نقلیه نظامی، زیر دریایی‌ها و دیوهای لیزری باتوان بالا را دارا می‌باشند. در برخی موارد، تحقیقات نانوسیال در مورد کاربردهای نظامی شامل نانوسیالات چندکاره با ذخیره انرژی حرارتی اضافی یا آزادسازی انرژی از طریق واکنش‌های شیمیایی است.

تقاضای روز افزون برای تولید الکتریسیته ممکن است منجر به ضرورت جایگزینی و ارتقا ترانسفورماتورها در مقیاس بزرگ شود. یک جایگزین مناسب، عوض کردن روغن ترانسفورماتورهای مرسوم با یک نانوسیال است. این جایگزینی سبب صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌ها خواهد شد. محققین از طریق آزمایشات به این نتیجه رسیده‌اند که خواص انتقال حرارتی روغن‌های ترانسفورماتور با استفاده از نانوذرات افزودنی به طور گسترده‌ای افزایش می‌یابد.

• فضا

محققین طی آزمایشات مختلف به این نتیجه رسیدند که شار بحرانی جوشش استخری در هنگام استفاده از نانوسیالات در مقایسه با سیال پایه افزایش بسیار زیادی دارد. این افزایش بیانگر امکان بالا بردن قابلیت تراشه در اجزای الکترونیکی یا ساده کردن تجهیزات خنک‌کاری برای مصارف فضایی است. شار حرارتی بحرانی بالا اجازه جوشش تا مقادیر بیشتر را با افزایش میزان حرارت دفع شده و محدوده امنیت بیشتر نسبت به جوشش لایه‌ای می‌دهد. این ویژگی‌های نانوسیالات را در خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی مربوط به مصارف فضایی کاربردی می‌سازد.

• خنک‌کاری سیستم هسته‌ای:

مؤسسه پژوهشی ماساچوست یک مرکز مربوط به رشته‌های مختلف علمی برای مطالعه بررسی کاربرد تکنولوژی نانوسیالات در فناوری هسته‌ای ایجاد کرده است. در حال حاضر آنها در حال استفاده از نانوسیالات بر کارایی اقتصادی و سیستم‌های هسته‌ای می‌باشند.

• کاربرد نانوسیالات در بیوپزشکی

نانوسیالات و نانوذرات کاربردهای زیادی در بیوپزشکی دارند. برای مثال برای کاهش عوارض جانبی روش‌های سنتی درمان سرطان، نانوذرات بر پایه آهن می‌توانند به عنوان وسایل ارسال دارو و یا تشعشع

بدون آسیب رساندن به بافت‌های سالم مجاور استفاده شوند. این قبیل ذرات می‌توانند در جریان خون منتهی به تومور با استفاده از مغناطیس‌هایی که در خارج از بدن قرار گرفته‌اند هدایت شوند. نانوسیالات هم چنین در عمل جراحی به منظور خنک‌کاری مؤثرتر در اطراف بافتی که تحت عمل قرار می‌گیرد مورد استفاده واقع می‌شود و بدین وسیله شانس بیماران در طی عمل جراحی افزایش می‌باید و میزان آسیب رسانی به سایر بافت‌ها تا حدود زیادی از بین می‌رود.

هم‌چنین این نانوسیالات می‌توانند برای خنک‌کاری مغز در طول جراحی‌های حساس مورد استفاده قرار گیرند. این امر موجب می‌شود مغز اکسیژن کمتری نیاز داشته و در نتیجه شانس بیمار برای زنده ماندن افزایش یابد و احتمال آسیب‌های مغزی کم شود. به علاوه می‌توان از این نانوسیالات برای ایجاد حرارت بالا در اطراف تومورها جهت از بین بردن آنها استفاده کرد، بدون اینکه سلول‌های مجاور آسیب ببینند.

• سایر کاربردها:

موارد زیادی یافت می‌شود که افزایش کارایی انتقال حرارت در آنها می‌تواند برای کمیت، کیفیت و یا هزینه محصول یا فرایند سودمند باشد. در بیشتر این حالات، نانوسیالات انتخاب‌های مناسبی برای صورت گرفتن افزایش کارایی انتقال حرارت هستند. این قبیل کاربردها صرفه جویی در انرژی مورد نیاز برای سیستم‌های گرمایشی و تهویه مطبوع را به همراه آوردن فواید زیست محیطی به دنبال دارد. در صنایع انرژی تجدید پذیر، نانوسیالات برای افزایش میزان انتقال حرارت کلکتورهای خورشیدی به تانک ذخیره به کار گماشته می‌شود. تا با این عمل سبب افزایش دانسیته انرژی در آن شوند. نانوسیالاتی که به عنوان مبرد تلقی می‌شود پتانسیل کاربرد در پروسه‌های اصلی صنایع مهمی نظیر صنایع شیمیایی، غذایی، نفت و گاز، چوب و کاغذ و منسوجات را دارا است.

۱-۵- مطالعات ضریب هدایت حرارتی

در این بخش تاثیر پارامترهای مختلف بر روی ضریب هدایت حرارتی در مطالعات مختلف (به صورت تجربی و تئوری) مورد بررسی قرار گرفته است.

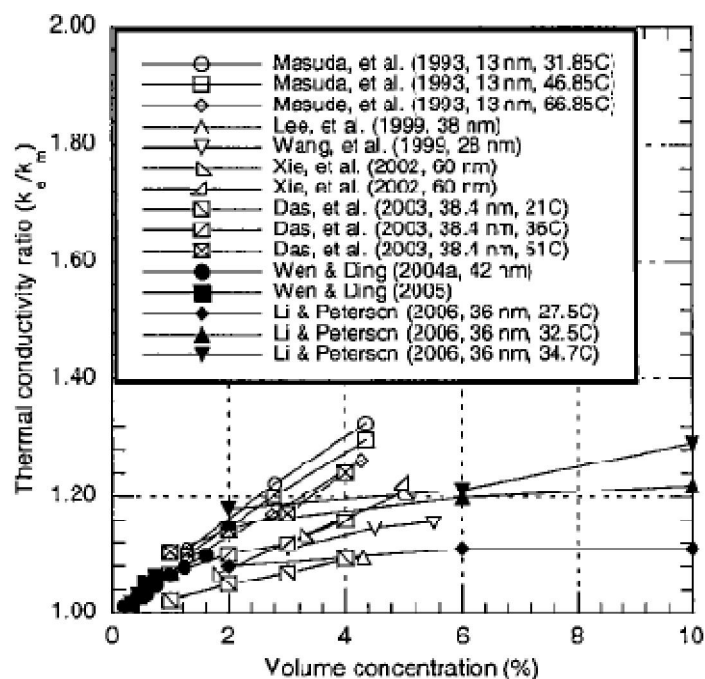
۱-۵-۱- مطالعات تجربی هدایت حرارتی نانوسیال

در بررسی تاریخیچه، داده‌های تجربی محققان زیادی جمع آوری شده است. در هر مورد، نسبت بهبود هدایت حرارتی از اطلاعات داده شده در مقالات محاسبه شده است. ضریب بهبود هدایت حرارتی یا افزایش به صورت نسبت هدایت حرارتی نانوسیال به هدایت حرارتی سیال پایه تعریف می‌شود. درصد افزایش در هدایت حرارتی، برابر است با ضریب افزایش منهای یک ضرب در ۱۰۰ درصد، هم‌چنین برای سهولت در این بخش، عبارت بهبود یا افزایش با توجه به هر پارامتر مثل هدایت حرارتی، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت به ضریب افزایش برمی‌شود.

بنا بر یافته‌های محققان، هشت پارامتر در افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات مؤثر است که از میان نتایج آزمایشگاهی عبارتند از: (۱) درصد حجمی یا غلظت ذره، (۲) نوع ماده ذره، (۳) اندازه ذره، (۴) شکل ذره، (۵) نوع ماده سیال پایه، (۶) دما، (۷) مواد افزودنی و (۸) قدرت اسیدی. هر یک از این پارامترها جداگانه از منظر رفتار داده‌ها، بزرگی و تثبیت با آزمایشات متعدد بررسی می‌شوند.

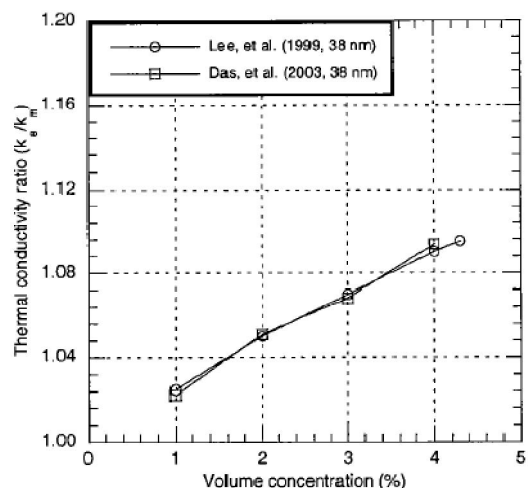
۱-۵-۱-۱- اثر درصد حجمی ذره

اثر درصد حجمی و یا غلظت ذره روی افزایش هدایت حرارتی نانوسیال در شکل ۱-۶ نشان داده شده که کارهای تجربی ۷ گروه از محققان برای Al_2O_3 در آب ارائه شده است. اندازه ذره و دمای نانوسیال میان گروه‌ها در شکل ۱-۶ متغیر است، اما رفتار کلی روشن است: بهبود هدایت حرارتی با افزایش درصد حجمی ذره افزایش می‌یابد. به طور کلی درصدهای حجمی اکسید-ذره کمتر از ۴ تا ۵ درصد هستند تا با متعادل نگه داشتن افزایش ویسکوزیته، حداقل بهبود در حدود ۱/۳ (۳۰ درصد) بیشتر از نمونه باشد.



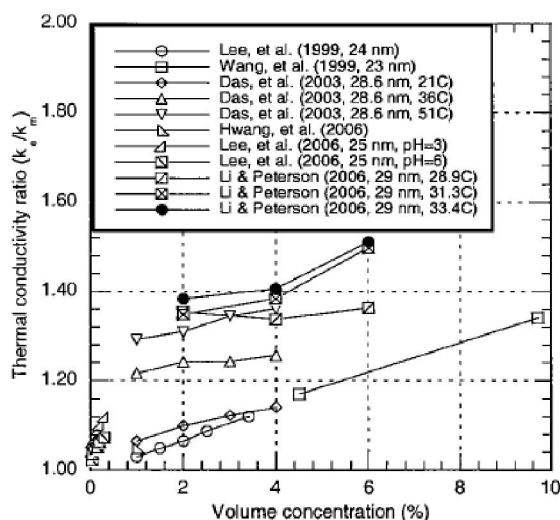
شکل ۱-۶: افزایش هدایت حرارتی Al_2O_3 در آب [۷]

اثر درصد حجمی ذره روی بهبود هدایت حرارتی در شکل ۱-۷ با مقایسه نتایج دو گروه با استفاده از همان اندازه‌های نامی ذره دیده می‌شود. با در نظر گرفتن اطلاعات در دسترس دو گروه در شکل ۱-۷ که از پارامترهای یکسانی استفاده کردند، نتایج تقریباً یکسانی حاصل شد (مقدار افزایش در شکل ۱-۷ به علت قطر نسبتاً کوچک ذره نسبتاً کم است). همین رفتارها با ذرات دیگر و سیالات و اندازه‌های دیگر ذرات هم مشاهده شد.

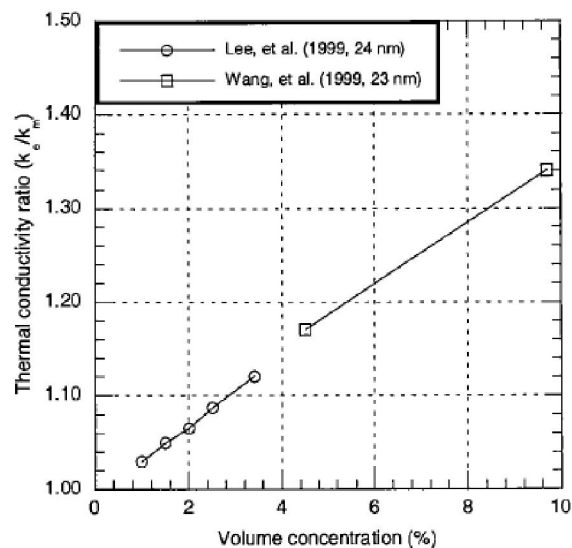


شکل ۷-۱: اثر غلظت ذره برای Al_2O_3 در آب [۷]

نتایج چند آزمایش دیگر برای افزایش هدایت حرارتی در شکل ۸-۱ برای CuO در آب نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۶-۱ دامنه‌ای از اندازه ذرات و دمای سیال در شکل ۸-۱ آمده است. پارامتر غلظت جداگانه در شکل ۹-۱ اشاره شده که از یک اندازه ذره و از یک دمای سیال استفاده شده است. رفتار کلی همانند شکل‌های ۶-۱ تا ۹-۱ است و مقادیر شکل‌های ۷-۱ و ۹-۱ بوسیله دو گروه از آزمایشات تأیید شده است.

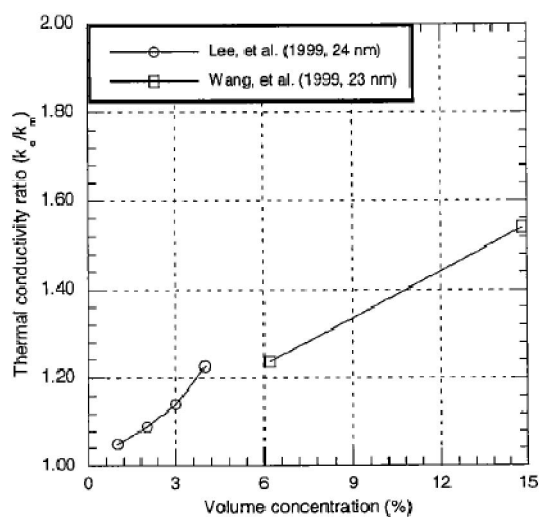


شکل ۸-۱: افزایش هدایت حرارتی CuO در آب [۷]



شکل ۹-۱: اثر غلظت ذره برای CuO در آب [۷]

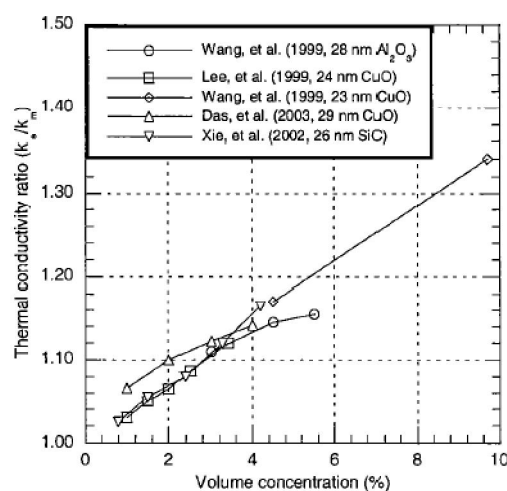
اثر کسر حجمی نانوسیال اکسید مس در اتیلن گلیکول در شکل ۱۰-۱ دیده می‌شود که رفتار مشابهی را با شکل ۶-۱ تا ۹-۱ داراست. به علاوه مطابقت خوبی در مقادیر حاصل از داده‌های دو گروه در شکل ۱۰-۱ آمده است. شکل‌های ۶-۱ تا ۱۰-۱ نشان می‌دهند در حالت کلی با افزایش درصد حجمی هدایت حرارتی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰-۱: اثر غلظت ذره برای CuO در اتیلن گلیکول [۷]

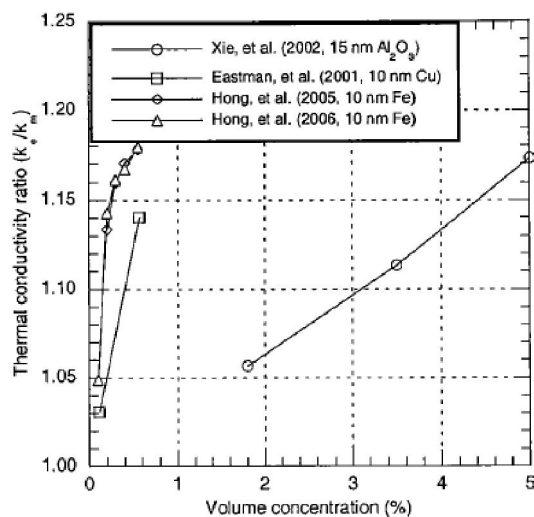
۱-۵-۲- اثر نوع ذره

اثر نوع ذره روی افزایش هدایت حرارتی در شکل ۱-۱۱ برای ذرات اکسیدی و کربید سیلیکون- در آب نشان داده شده‌اند. همه پارامترهای دیگر که تقریباً در شکل ۱-۱۱ ثابت هستند، تأثیر خاصیت مواد را متمایز کرده‌اند. همانطور که نشان داده شده است، در کسر حجمی پائین نوع ذره اثر مهمی روی هدایت حرارتی ندارد.

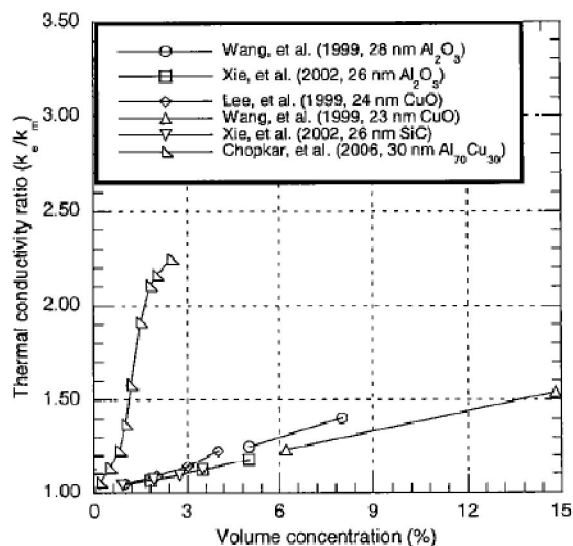


شکل ۱-۱۱: اثر نوع ذره برای ذرات در آب [۷]

نتایج افزایش هدایت حرارتی در شکل ۱-۱۲ آمده که برای مقایسه شامل ذرات فلزی آهن و مس و یک اکسید می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، ذرات فلزی همان افزایش ذرات اکسیدی را در کسر حجمی بسیار کمتر تولید کردند.



شکل ۱-۱۲: اثر نوع ذره برای ذرات در اتیلن گلیکول [۷]



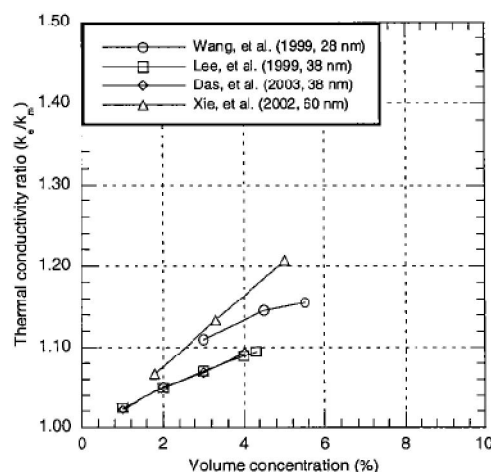
شکل ۱-۱۳: اثر نوع ذره برای ذرات در اتیلن گلیکول [۷]

در شکل ۱-۱۲، مشاهده می‌شود که ضریب هدایت حرارتی برای فلز از ذرات اکسیدی بیشتر است. نکته جالب توجه سقف غلظت ذرات برای بالاترین سطح در انجام آزمایشات است. بخشی از پاسخ در شکل ۱-۱۳ دیده می‌شود. در اینجا نتایج ذرات اکسیدی، کربیدهای سیلیکونی و ذرات فلزی ارائه شده است. اندازه ذرات در شکل ۱-۱۳ بزرگتر از ذرات شکل ۱-۱۲ هستند، اما مهم‌ترین اثر دیده شده افزایش بسیار زیاد هدایت حرارتی نانوسیال ذرات فلز هنگامی که درصد حجمی تا ۲/۵ درصد در مقایسه با ۰/۷ درصد برای

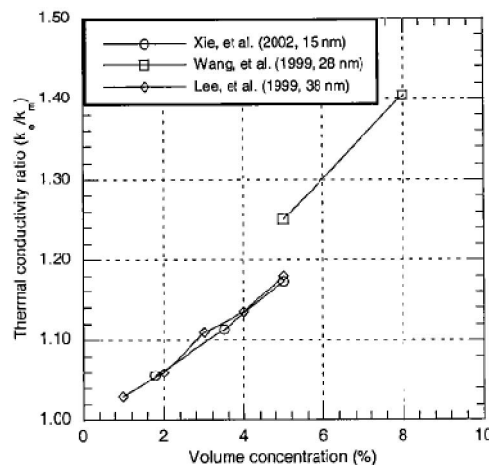
ذرات فلزی شکل ۱-۱۲ افزایش یابد است. در درصد حجمی ۲/۵ درصد ذرات فلزی، هدایت حرارتی نانوسیال نشان داده شده در شکل ۱-۱۳، تا ۱۱۵ درصد بالاتر از اتیلن گلیکول می‌رسد. این نتیجه به طور چشمگیر بالاتر از نتایج ذرات غیرفلزی شکل ۱-۱۳ است و اشاره به زمینه‌ای برای تحقیق و تولید نانوسیال دارد. هرچند همانگونه که قبلاً گفته شد، ایراد اصلی نانوسیالات ذرات فلزی، فرایند اکسیداسیون در طول تولید و سپس استفاده است.

۱-۵-۳- اثر اندازه ذره

اثر اندازه ذرات کروی شکل بر روی افزایش هدایت حرارتی در ادامه ملاحظه خواهد شد. در اینجا پارامتر اندازه قطر نامی است. نتایج در شکل ۱-۱۴ برای نانوسیال آلومینا با قطر ذرات ۲۸ تا ۶۰ نانومتر نشان داده شده‌اند. میان داده‌های دو گروه مطالعه کننده از ذرات ۳۸ نانومتری شباهت وجود دارد. نتایج برای ذرات بزرگتر، یعنی ۶۰ نانومتر، افزایش در بهبود هدایت حرارتی را نشان می‌دهد. بر مبنای این نتایج، انتظار این است که ذرات کوچکتر، حداقل افزایش را نشان دهند. اما نتایج برای ذرات ۲۸ نانومتری بین دو ذره بزرگتر قرار می‌گیرد. نتایج شکل ۱-۱۵ دقیقاً همان نتایج که برای اتیلن گلیکول بدست آمد را نشان می‌دهد.

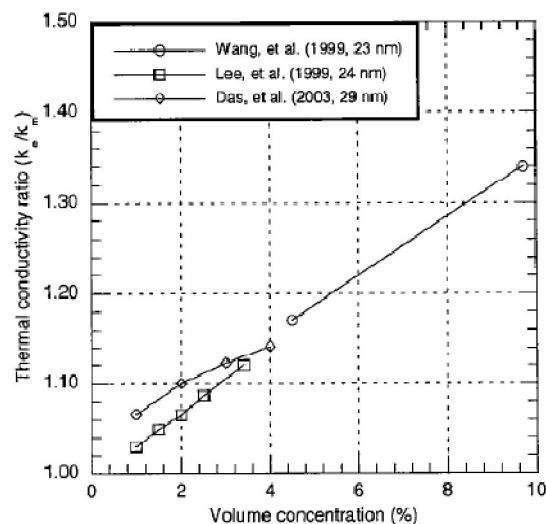


شکل ۱-۱۴: اثر اندازه ذره برای Al_2O_3 در آب [۷]



شکل ۱-۱۵: اثر اندازه ذره برای Al_2O_3 در اتیلن گلیکول [۷]

از رفتار شکل‌های ۱-۱۴ و ۱-۱۵ به غیر از نتایج ونگ و همکاران [۸]، رفتار ثابت در موردی که ذرات با قطرهای بزرگتر، افزایش بیشتری در هدایت حرارتی تولید می‌کنند را نتیجه می‌دهد. این نتیجه در مخالفت با برخی از نظریه‌ها است که به توزیع یکنواخت ذرات کوچک حتی در بهترین روش تولید، می‌پردازد. کلوخه شدن ذره مهم‌ترین عامل مجهول ماندن آزمایشات هدایت حرارتی است، اثر اندازه ذره از آزمایش و تئوری نمی‌تواند به طور کامل یکسان و هماهنگ باشد. باید تأکید شود که در این مورد، در همه مقایسات، داده‌های نانوسیال در این مطالعه عدم قطعیت از دقت اندازه و شکل ذره گزارش شده ناشی می‌شود. این پارامترها اغلب با آزمایشات اندازه‌گیری نشدند، بلکه از اطلاعات نامی سازندگان ذرات گرفته می‌شوند.

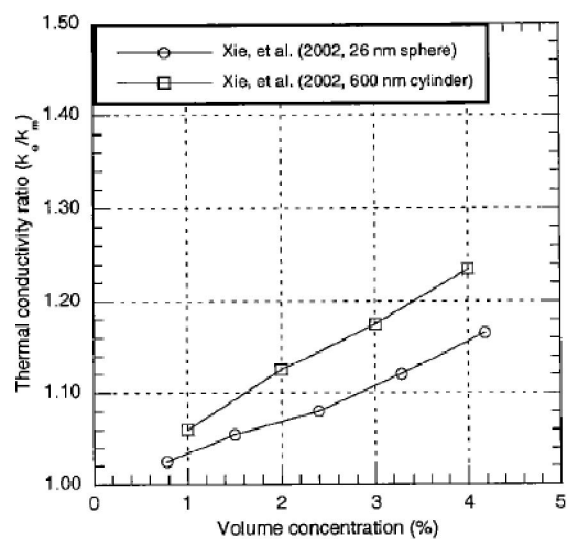


شکل ۱-۱۶: اثر اندازه ذره برای CuO در آب [۷]

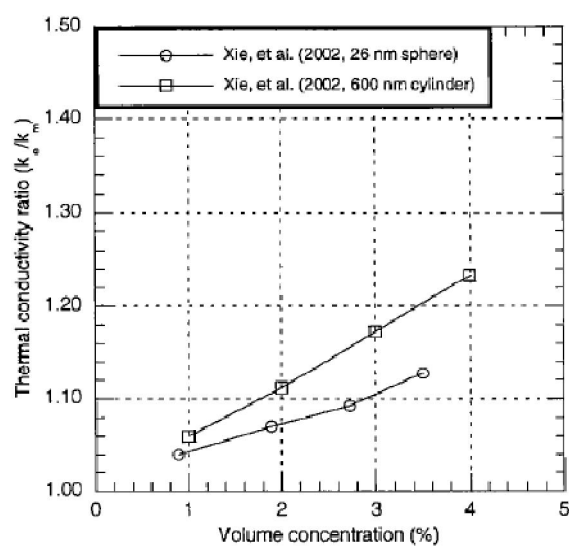
مقایسه سوم اثر اندازه ذره روی افزایش هدایت حرارتی در شکل ۱-۱۶ برای CuO در آب نشان داده شده است. نتایج شکل‌های ۱-۱۴ تا ۱-۱۶ پیشنهاد می‌کند که افزایش هدایت حرارتی با قطر ذرات نانومتری کروی معلق افزایش می‌یابد.

۱-۵-۴- اثر شکل ذره

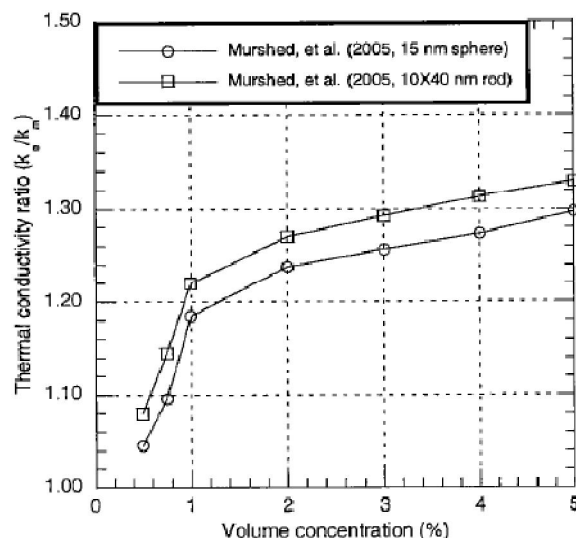
در شکل ۱-۱۷، تأثیر شکل‌های ذرات (کروی و استوانه‌ای) با یکدیگر مقایسه شده است. ذرات استوانه‌ای افزایش در هدایت حرارتی را نشان می‌دهند، و به نظر می‌رسد این نتیجه به علت شبکه تشکیل شده بوسیله ذرات کشیده شده‌ای که گرما را از سیال هدایت می‌کنند باشد. نتایج شکل ۱-۱۷ از یک گروه گرفته شده و آن به یاد آورنده در دسترس بودن اطلاعات شکل‌های ۱-۱۸ و ۱-۱۹ است. با این وجود تمام نتایج شکل‌های ۱-۱۷ تا ۱-۱۹ نشان می‌دهند که ذرات کشیده‌تر نسبت به ذرات کروی از لحاظ افزایش هدایت حرارتی مقدم‌اند. این نتیجه اشاره به زمینه‌ای دیگر برای تحقیق و تولید نانوسیال می‌کند، اگرچه ذرات کروی اغلب در قیمت‌های مناسب‌تری در دسترس هستند.



شکل ۱-۱۷: اثر شکل ذره برای SiC در آب [۷]



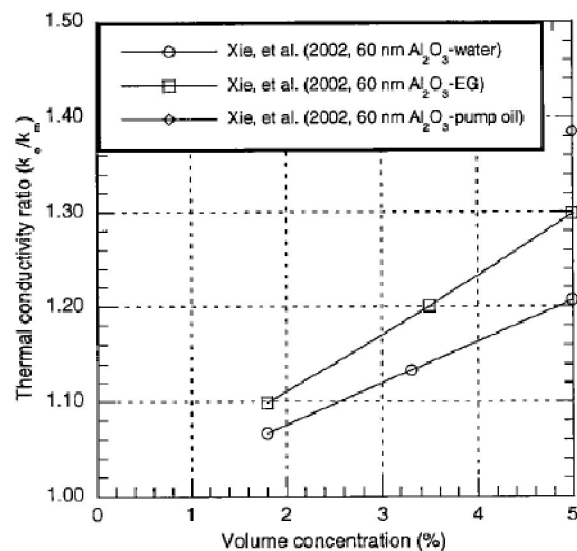
شکل ۱-۱۸: اثر شکل ذره برای SiC در اتیلن گلیکول [۷]



شکل ۱-۱۹: اثر شکل ذره برای TiO_2 در آب [۷]

۱-۵-۱-۵- اثر نوع سیال مبنا

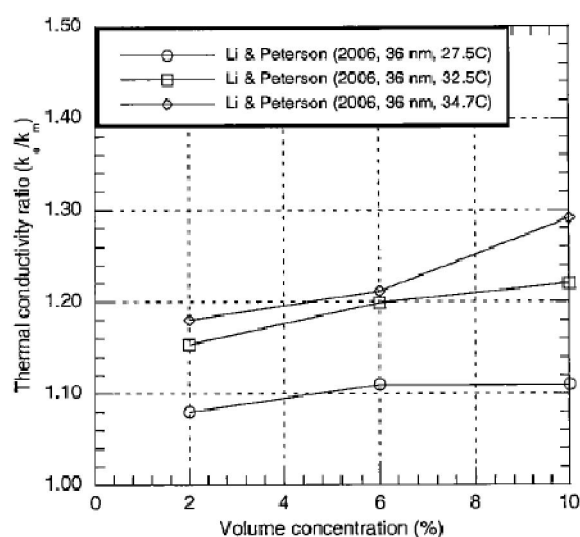
تأثیر سیال پایه به خودی خود (مثل آب، اتیلن گلیکول و روغن پمپ) روی افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات در شکل ۱-۲۰ نمایش داده شده است. نتایج، نشان از افزایش بهبود هدایت حرارتی در سیالاتی که از نظر انتقال حرارت، ضعیف هستند دارد. نتایج شکل ۱-۲۰ حداقل افزایش را برای آب نشان می‌دهد، که بهترین سیال انتقال حرارت با بیشترین هدایت حرارتی در مقایسه با دیگر سیالات است. این نتیجه مورد دلخواه بسیاری از محققین است، زیرا افزایش انتقال حرارت اغلب زمانی که سیالات درگیر، انتقال حرارت ضعیفی دارند مورد نیاز است. اتیلن گلیکول به تنهایی سیالی است با انتقال حرارت نسبتاً ضعیف در مقایسه با آب، و مخلوط‌های اتیلن گلیکول و آب میان دو انتقال حرارت مؤثر قرار می‌گیرند. بنابراین نانوذرات در مخلوط‌های اتیلن گلیکول و آب پتانسیل بالایی برای کاربردهای خنک‌کاری در موتور نشان می‌دهند.



شکل ۱-۲۰: اثر نوع سیال مبنا [۷]

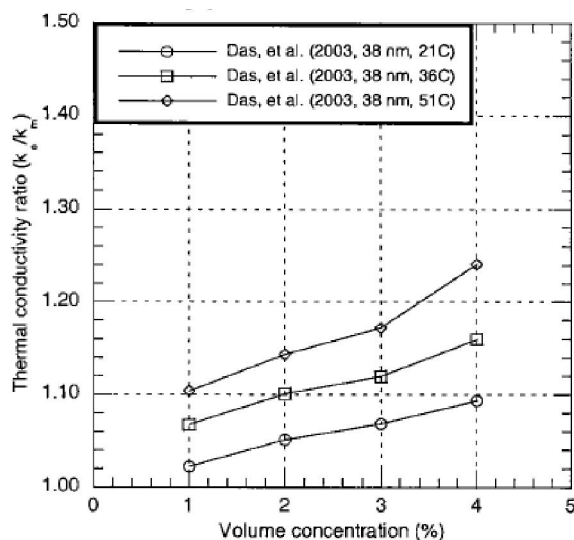
۱-۵-۱-۶- اثر دما

به طور کلی، هدایت حرارتی نانوسیالات نسبت به دما حساس‌تر از سیال مبنا است. داس و همکاران [۱۴] اطلاعات نانوسیال را حول یک دامنه دمایی کوچک برای Al_2O_3 در آب و CuO در آب ارائه کرده‌اند. نویسندگان پیشنهاد کردند که وابستگی دمایی قوی هدایت حرارتی نانوسیال، به علت حرکت نانوذرات است.

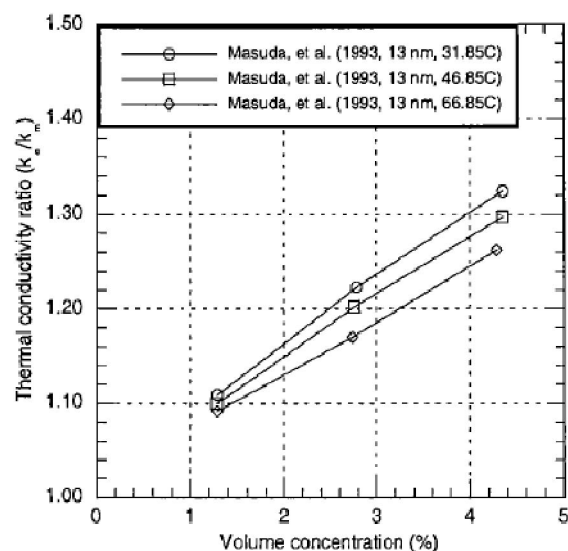


شکل ۱-۲۱: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۷]

نتایج برای Al_2O_3 در آب در شکل ۲۱-۱ تا ۲۳-۱ برای سه گروه نشان داده شده است. اندازه‌های ذرات و دماهای سیال در شکل‌ها متفاوت است، اما اندازه ذره در هر شکل ثابت و دما در هر یک متفاوت است. فقط نتایج ماسودا و همکاران [۹] با رفتار کلی متفاوت است.

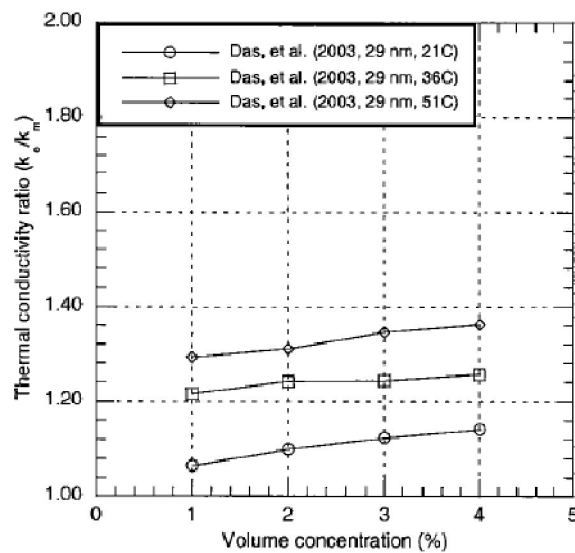


شکل ۲۲-۱: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۷]

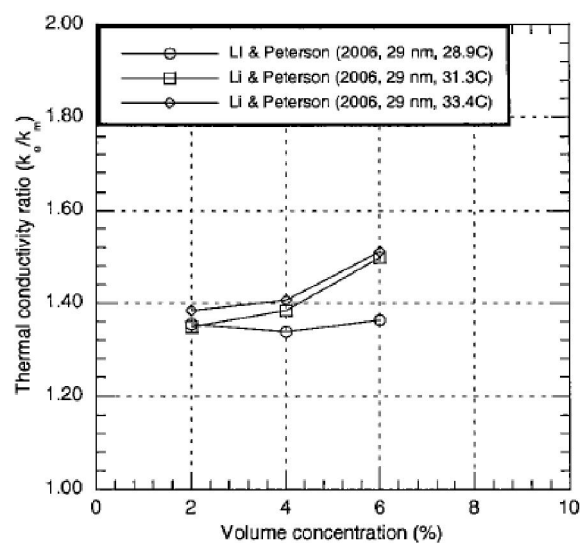


شکل ۲۳-۱: اثر دما برای Al_2O_3 در آب [۷]

افزایش هدایت حرارتی برای CuO در آب در شکل‌های ۲۴-۱ و ۲۵-۱ برای دو گروه از محققان نشان داده شده است. داده‌ها بیان می‌کند با افزایش دما، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل‌های ۲۶-۱ و ۲۷-۱ نشان داده شده است، نتایج مشابه از دو مقدار آزمایشگاهی برای نانولوله‌های کربنی چند جداره^۱ در آب بدست آمده است.



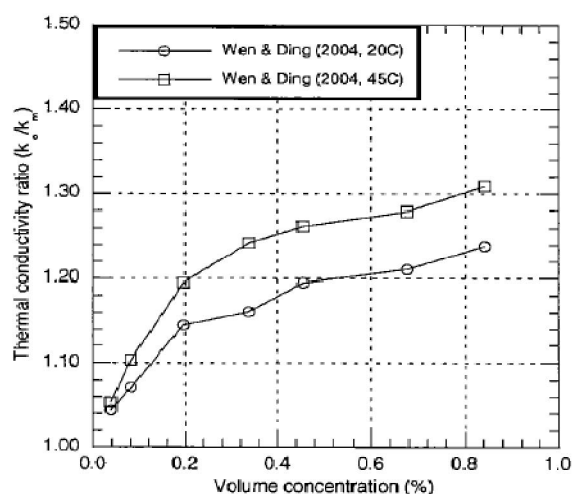
شکل ۲۴-۱: اثر دما برای CuO در آب [۷]



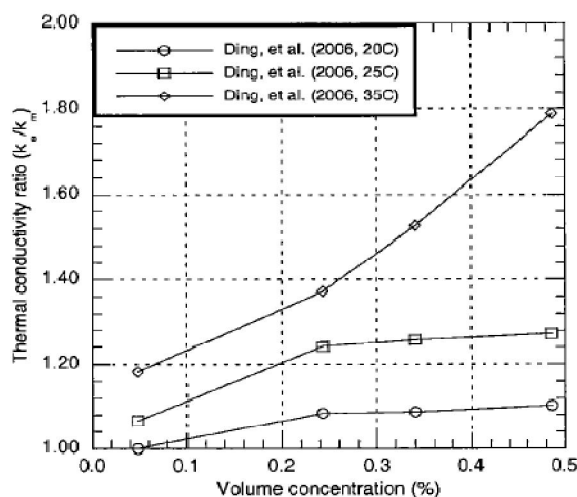
شکل ۲۵-۱: اثر دما برای CuO در آب [۷]

^۱ Multi wall carbon Nanotube

باید دقت شود که اگر رفتار برخی از داده‌ها با رفتار کلی دمایی همسان نیست به این معنی نیست که خود آزمایش کاملاً اشتباه باشد. رفتار دمایی متناقض بوسیله ماسودا و همکاران [۹] برای SiO_2 در آب گزارش شد، اما برای TiO_2 در آب نتایج با توجه به دما یکنواخت نبود و تناقض به گونه‌ای دیگر بود. به هر حال با ملاحظه همه‌ی نتایج درمی‌یابیم که اثبات کلی برای رفتار عمومی دمایی انجام شده است. این رفتار برای کاربردهای انتقال حرارت در صنایع حمل و نقل، که سیالات در دماهای در حال افزایش عمل می‌کنند مورد نیاز است.



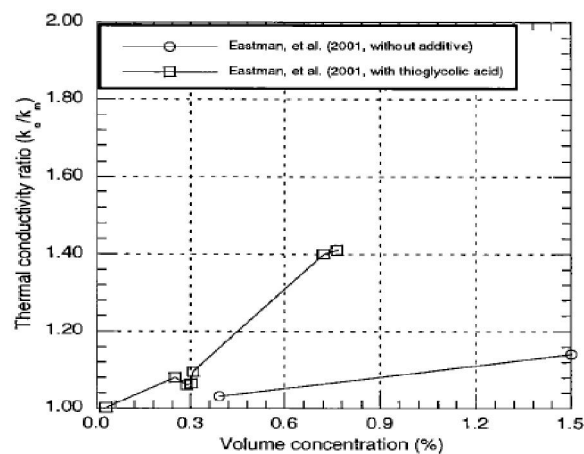
شکل ۱-۲۶: اثر دما برای نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب [۷]



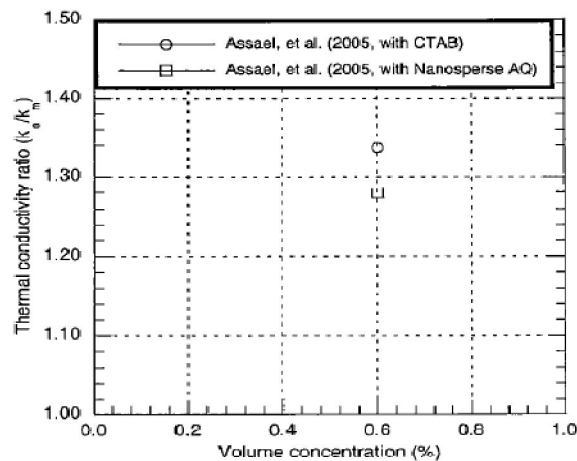
شکل ۱-۲۷: اثر دما برای نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب [۷]

۱-۵-۱-۷- اثر افزودنی‌ها

محققان از افزودنی‌هایی به سیالات استفاده می‌کنند تا تلاشی برای حفظ نانوذرات در محلول باشد و بوسیله آن از کلوخه شدن جلوگیری شود. نتایجی که از تاریخچه می‌توان فهمید این است که آزمایشات به صورت پراکنده و در دامنه‌ای وسیع با توجه به نوع ماده افزودنی، غلظت و... آمده است. با این وجود بیشتر مطالعاتی که شامل مواد افزودنی است، افزایش در ضریب هدایت حرارتی را نشان می‌دهد. داده‌های دو گروه مطالعاتی در شکل‌های ۱-۲۸ و ۱-۲۹ برای نانوسیالات مختلف و افزودنی‌ها آمده است و در هر دو مورد، بهبود هدایت حرارتی با استفاده از افزودنی‌ها افزایش می‌یابد.



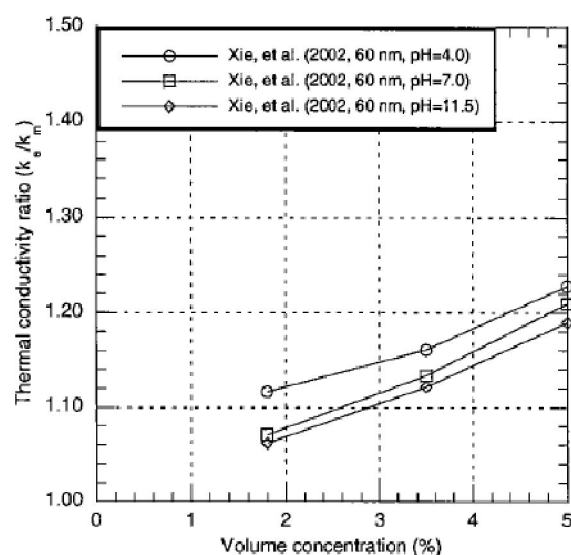
شکل ۱-۲۸: اثر افزودنی برای مس در اتیلن گلیکول [۷]



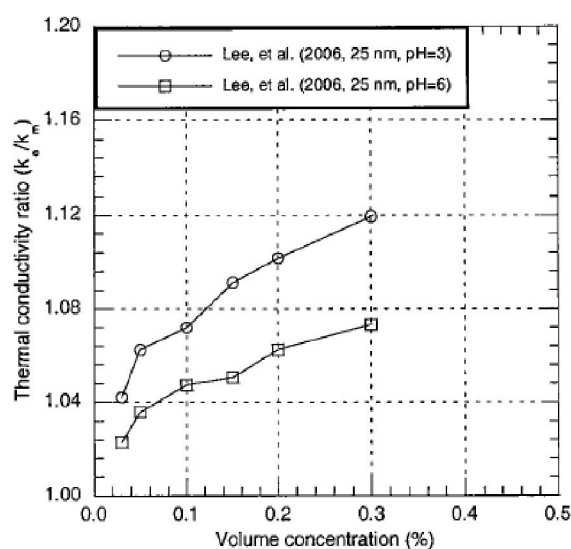
شکل ۱-۲۹: اثر افزودنی برای نانولوله‌های کربنی چند جداره در آب [۷]

۱-۵-۸- اثر قدرت اسیدی (PH)

مطالعات اندکی راجع به اثر قدرت اسیدی سیال روی بهبود هدایت حرارتی نانوسیالات منتشر شده است. نتایج دو گروه، جداگانه در زیر ارائه شده است. نتایج شکل‌های ۱-۳۰ و ۱-۳۱ برای ذرات مختلف در آب رفتاری یکسان را نشان می‌دهند.



شکل ۱-۳۰: اثر قدرت اسیدی برای Al_2O_3 در آب [۷]



شکل ۱-۳۱: اثر قدرت اسیدی برای CuO در آب [۷]

۱-۵-۲- مطالعات تحلیلی هدایت حرارتی

همانطور که از کارهای محققان متعدد مشهود است، هدایت حرارتی نانوسیالات متأثر از هر دو هدایت حرارتی سیال پایه و نانوذرات، درصد حجمی، مساحت سطحی و شکل نانوذرات معلق در سیال است. مدل ماکسول [۱۰] یک مدل قدیمی موجود در هدایت حرارتی است که برای مخلوط‌های جامد-مایع با ذرات نسبتاً بزرگ پیشنهاد شد. بسیاری از مدل‌های پیشنهادی بعدی بر مبنای مدل ماکسول پایه‌گذاری شده‌اند. هدایت حرارتی مؤثر، k_{eff} برابر است با:

$$k_{eff,Maxwell} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)\phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)\phi} k_1 \quad (1-1)$$

که k_p هدایت حرارتی ذره، k_1 هدایت حرارتی سیال و ϕ درصد حجمی ذره در محلول است. مدل ماکسول نشان می‌دهد که هدایت حرارتی مؤثر محلول‌ها وابسته به هدایت حرارتی ذره کروی، سیال مبنا و درصد حجمی ذرات جامد است.

برای ذرات غیر کروی، هدایت حرارتی نانوسیالات نه تنها به درصد حجمی ذرات، بلکه به شکل ذرات هم بستگی دارد [۱۱]. همیلتون و کراسر [۱۲] مدلی برای هدایت حرارتی مؤثر مخلوط‌های دو جزئی توسعه دادند. این مدل تابعی از هر دو هدایت ذره و سیال مبنا و نیز شکل ذرات است. هدایت حرارتی مخلوط‌های دو جزئی با استفاده از این مدل، به صورت زیر می‌تواند تعیین شود:

$$k_{eff,Hamilton} = \frac{k_p + (n-1)k_1 - (n-1)(k_1 - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_1 + (k_1 - k_p)\phi} k_1 \quad (2-1)$$

که n ضریب شکل تجربی به صورت $n=3/\psi$ است و ψ کرویت است که به صورت نسبت مساحت سطح یک کره-که معدل حجمی ذره است-به مساحت سطح ذره تعریف می‌شود.

ژوان و لی [۱۳] از مدل همیلتون-کراسر [۱۲] برای رسیدن به یک برآورد تقریبی هدایت حرارتی نانوسیالات برای مقادیر مختلف ψ از ۰/۵ تا ۱/۰ استفاده کردند. داده‌ها نشان دادند که نتایج مدل برای $\psi=0/7$ نزدیک به داده‌های تجربی آنها بود. لی و همکاران [۱۱] نشان دادند که نسبت‌های هدایت حرارتی برای $\psi=1$ (ذرات کروی) که از این مدل حساب شد در تطابق خوبی با نتایج تجربی آنها از نانوسیال Al_2O_3 بود. هرچند این مدل برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیال CuO مناسب نبود.

ونگ و همکاران [۱۴] مدلی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات پیشنهاد کردند:

$$k_{eff,Wang} = \frac{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_1} dr}{(1-\phi) + 3\phi \int_0^\infty \frac{k_{cl}n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_1} dr} k_1 \quad (3-1)$$

که $k_{cl}(r)$ هدایت حرارتی خوشه‌های ذره و $n(r)$ تابع توزیع شعاعی است. با در نظر گرفتن اثر اندازه و جذب سطحی نانوذره، مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی برای ذرات ۵۰ نانومتر CuO معلق در آب دیونیزه شده با غلظت‌های کمتر از ۰/۲۵ درصد حجمی مطابقت داشت.

ژیو [۱۵] مدلی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات ارائه کرد. مدل پیشنهادی بر مبنای نظریه ماکسول و نظریه قطبیت متوسط و با فرض وجود یک پوسته سطحی میان نانوذرات و سیال استوار بود. نتایج این مدل با داده‌های تجربی چوی و همکاران [۱۶] برای نانوسیال روغن-نانولوله کربنی و با داده‌های ژو و همکاران [۱۷] برای نانوسیال آب-نانوذره Al_2O_3 مقایسه شد. پیش‌بینی‌ها در تطابق خوبی با داده‌های تجربی برای همان فرض ضخامت پوسته ۳ نانومتر بود، اما با هدایت حرارتی پوسته سطح مشترک تفاوت داشت. هرچند دلیل استفاده از مقادیر فرضی ضخامت و هدایت حرارتی پوسته سطح مشترک بیان نشد.

عبارتی تحلیلی برای محاسبه هدایت حرارتی مؤثر مخلوط‌های جامد-سیال بوسیله‌ی یو و چوی [۱۸] معرفی شد. آنها پیشنهاد کردند که یک مدل ساختاری از نانوسیالات ممکن است شامل یک توده سیال، نانوذرات جامد و نانولایه‌های شبه جامد شود. نانولایه شبه جامد مثل یک پل حرارتی میان یک نانوذره جامد و یک توده سیال عمل می‌کند [۱۸]. رابطه به صورت زیر است:

$$k_{eff,Yu} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi} k_1 \quad (۴-۱)$$

که در آن β نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره اصلی و k_p هدایت حرارتی نانوذره است.

مدل دیگری نیز برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات توسط یو و چوی [۱۸] پیشنهاد شد که به این صورت است:

$$k_{eff,Jang} = k_1(1 - \phi) + k_p \phi + 3C \frac{d_1}{d_p} k_1 \text{Re}_{d_p}^2 \text{Pr} \phi \quad (۵-۱)$$

که Re_{d_p} عدد رینولدز است که به صورت $\text{Re}_{d_p} = (\bar{C}_{RM} d_p) / \nu$ تعریف می‌شود. C ثابت نسبی، $\bar{C}_{RM}$ سرعت حرکت تصادفی نانوذرات، ν ویسکوزیته سینماتیکی سیال مبنا و Pr عدد پرانتل است. پیش‌بینی‌ها با این مدل در تطابق خوبی با داده‌های تجربی لی و همکاران [۱۱]، ایستمن و همکاران [۴] و داس و همکاران [۱۹] بود.

۱-۶- انتقال حرارت جابجایی

۱-۶-۱- تحقیقات تجربی:

ایستمن و همکاران [۲۰] آزمایشی را برای اکسید مس در آب انجام دادند، در این آزمایش رژیم جریان درهم درون لوله و نانوسیال با کسر حجمی ۰/۹ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. نتیجه آزمایش افزایش ۱۵ درصد انتقال حرارت را برای نانوسیالات نسبت به سیال پایه نشان داد.

ون و دینگ [۲۱] نتایج آزمایشات خود را با نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب جریان یافته درون لوله مسی و جریان آرام به صورت زیر بیان کردند: با نفوذ نانوذرات درون سیال پایه شاهد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی خواهیم بود. با افزایش غلظت نانوذرات، ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز افزایش می‌یابد.

هریس و همکاران [۲۲] آزمایشات خود را با نانوسیال اکسید آلومینیوم در آب و مس در آب درون لوله و با جریان آرام و با دمای دیواره ثابت انجام دادند. در آزمایش دیگری که توسط هریس و همکاران [۲۳] انجام شد انتقال حرارت اکسید آلومینیوم در آب با کسر حجمی ۰/۲ درصد تا ۲/۵ درصد و در اعداد رینولدز ۲۰۵۰ تا ۷۰۰۰ در لوله دما ثابت مورد آزمایش قرار گرفت و گزارش نتایج، بیانگر افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی و افزایش عدد رینولدز بود.

لای و همکاران [۲۴] آزمایشی را با نانوسیال اکسید آلومینیوم در آب در لوله استیلی ضد زنگ (لوله در ابعاد میلی‌متر ساخته شده بود) با شار حرارتی ثابت و عدد رینولدز کمتر از ۲۷۰ انجام دادند. نتایج حاکی از این بود که به ازای ۱ درصد کسر حجمی انتقال حرارت ۸ درصد افزایش می‌یابد.

ژانگ و همکاران [۲۵] آزمایشی را با نانوسیال اکسید آلومینیوم در آب در میکروکانال مستطیلی و در رژیم آرام انجام دادند و رابطه جدیدی برای انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات در میکروکانال‌ها ارائه دادند.

ویلیامز و همکاران [۲۶] انتقال حرارت جابجایی را در جریان درهم کاملاً توسعه یافته با اکسید آلومینیوم در آب و اکسید زیرکونیوم در آب بررسی کردند و مطابقت خوبی با روابط تکفازی ارائه شده مشاهده کردند.

ژوان و لی [۲۷] آزمایشی را با نانوسیال مس در آب جاری درون لوله و در رژیم درهم با عدد رینولدز بین ۱۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ و با کسر حجمی ۰/۳ تا ۲ درصد انجام دادند و افزایش قابل توجهی را برای انتقال حرارت گزارش کردند. ژوان و لی [۲۸] افزایش ۳۹ درصد عدد ناسلت را به ازای کسر حجمی ۲ درصد نانوذره مس در آب بیان کردند.

ژو [۲۹] انتقال حرارت مس-استون را برای ذرات ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر و غلظت ۰ تا ۴ گرم بر لیتر بررسی کرد.

لی و همکاران [۳۰] انتقال حرارت مس-آب را برای نانوذره در ابعاد ۲۶ نانومتر و کسر حجمی ۰/۵ تا ۲ درصد بررسی کردند و نسبت افزایش انتقال حرارت نانوسیال به سیال پایه را برابر ۱/۰۶ تا ۱/۳۹ گزارش کردند.

فالکنر و دیگران [۳۱] انتقال حرارت نانولوله کربنی را در آب و میکروکانال و با قطر هیدرولیکی ۳۳۵ میکرومتر و کسر حجمی ۱/۱ و ۲/۲ و ۴/۴ درصد مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند افزایش کسر حجمی افزایش ضریب انتقال حرارت را موجب می‌شود.

یانگ و همکاران [۳۲] آزمایشی را با نانوذره گرافیت کاملاً پراکنده شده در آب انجام دادند. آزمایش درون لوله انجام شد و افزایش ۲۲ درصدی انتقال حرارت را نشان داد.

دینگ و همکاران [۳۳] افزایش ۳۵۰٪ را برای نانولوله کربنی چند جداره در رینولدز ۸۰۰ گزارش کردند.

دوانگتونکسوک و ونگ وایسز [۳۴] افزایش انتقال حرارت را برای ۰/۲ درصد اکسید تیتانیوم گزارش و بیان کردند که ضریب انتقال حرارت وابستگی زیادی به سیستم اندازه گیری و کالیبراسیون دارد.

جانگ و چوی [۳۵] افزایش انتقال حرارت ۸ درصد برای ۰/۳ درصد اکسید آلومینیوم در آب را گزارش کردند.

دوانگتونکسوک و ونگ وایسز [۳۶] افزایش ۱۱/۶ درصد انتقال حرارت جابجایی را برای کسر حجمی ۲ درصد اکسید تیتانیوم در آب و در مبدل‌های حرارتی لوله‌های هم‌مرکز گزارش کردند.

در ادامه در جدول ۱-۱ برخی از تحقیقات اساسی در این زمینه گردآوری شده است:

جدول ۱-۱: نتایج تجربی بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات

نویسنده	سیال پایه	نانوذره	ابعاد نانوذره (نانومتر)	کسر حجمی به درصد	هندسه مورد مطالعه	رژیم جریان در اعداد رینولدز	نتایج
چو و پاک [۶]	آب	Al_2O_3 TiO_2	۱۳ ۲۷	۱-۳ ۱-۳	لوله	درهم $Re=10^5-10^6$	با افزایش ناسلت افزایش می‌یابد ϕ_{Re} و
ون و دینگ [۲۱]	آب	Al_2O_3	۵۶-۲۵	۱/۶-۰/۶	لوله	آرام ۲۱۰۰-۵۰۰	برای $\phi=1/6\%$ ضریب انتقال حرارت افزایش ۴۱ درصدی را نشان داد
هریس و همکاران [۲۲]	آب	Al_2O_3 CuO	۲۰ ۶۰-۵۰	۲-۳	لوله	آرام ۲۰۱۰-۶۵۰	ضریب انتقال حرارتی با افزایش ϕ افزایش یافت
لای و همکاران	آب	Al_2O_3	۲۰	۱-۰	لوله	آرام	عدد ناسلت افزایش ۸ درصدی

را به ازای $\Phi=1\%$ نشان داد	$270 < Re$						[۲۴]
افزایش ۳۲ درصدی عدد ناسلت به ازای $\Phi=1/8$ افزایش عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز	آرام ۳۰۰-۵	میکرو کانال	۱/۸-۰/۵	۱۰	Al_2O_3	آب	ژانگ و همکاران [۲۵]
افزایش انتقال حرارت محسوس	درهم ۶۳۰۰۰-۹۰۰۰	لوله	۳/۶-۰/۹ ۰/۹-۰/۲	۴۶ ۶۰	ZrO_2	آب	ویلیامز و همکاران [۲۶]
افزایش ضریب انتقال حرارت Cu جابجایی با افزایش	-	لوله	۴-۰ gr/lit	-۸۰ ۱۰۰	Cu	استون	ژو [۲۹]
نسبت عدد ناسلت نانوسیال به سیال پایه بین ۱/۰۶ تا ۱/۳۹ تغییر پیدا می کند	آرام، درهم	لوله	۲-۰/۵	۲۶	Cu	آب	ژوان و لی [۳۰]
افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوسیالات	آرام	-	۴/۴-۱/۱	$100 <$	CNT	آب	فالکندر و همکاران [۳۱]
افزایش ۲۲ و ۱۵ درصدی انتقال حرارت به ترتیب به ازای دمای ۵۰ و ۷۵ درجه سانتیگراد	آرام	لوله	۱-۰/۷	۴۰-۲۰	گرافیت	روغن	یانگ و همکاران [۳۲]
افزایش ۳۵ درصدی انتقال حرارت	آرام	لوله	۱-۰/۱	۱۰۰	MWCNT	آب	دینگ و همکاران [۳۳]

۱-۶-۲- تحقیقات تئوری

نانوسیالات را می‌توان به دو روش تکفازی و دوفازی مدل‌سازی کرد. در روش تکفازی نانوسیالات پیوسته فرض می‌شوند و معادلات بقا برای آن حل می‌شود. در این روش فرض می‌شود که ذرات در کل سیال با توزیع یکنواخت پراکنده شده‌اند و سیال در حرکت توزیع یکنواخت نانوذرات را بر هم نمی‌زند. در این روش برای مدل‌سازی انتقال حرارت نانوسیالات معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای سیال پایه حل می‌شود ولی ویسکوزیته و ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیالات جایگزین خواص فیزیکی سیال پایه می‌شود. از مزیت‌های روش تک‌فازی بسیار ساده‌تر و از نظر محاسباتی بسیار کارآمدتر بودن آن نسبت به روش دوفازی است. در روش دو فازی سه معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای سیال پایه و یک معادله پیوستگی برای نانوذرات حل می‌شود و به مراتب جواب دقیق‌تری می‌دهد.

چوی و همکاران [۳۷] برای اولین بار از روش تکفازی برای مدل‌سازی انتقال حرارت نانوسیالات استفاده کردند.

ژوان و روتزل [۳۸] در مقاله خود عنوان کردند که افزایش انتقال حرارت در نانوسیالات متأثر از دو فاکتور است: ۱- ضریب هدایت بالا ۲- پراکندگی حرارتی نانوذرات.

خانافر و همکاران [۳۹] افزایش انتقال حرارت در نانوسیال نسبت به سیال پایه در حفره را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ضریب هدایت ترکیبی از ضرایب هدایت، اثرات جابجایی و پراکندگی در نظر گرفته شد.

بونگیورنو [۴۰] در مقاله خود هفت مکانیزم حرکتی را برای نانوسیالات در نظر گرفت و با بررسی‌های انجام شده و تحلیل ابعادی، دو مکانیزم را به عنوان مکانیزم‌های غالب در افزایش انتقال حرارت معرفی کرد: حرکت براونی^۱ (حرکات اتفاقی نانوذرات که به دلیل برخوردهای پیوسته نانوذرات به همدیگر و به

^۱ Brownian motion

ملکول سیال پایه اتفاق می‌افتد) و اثرات ترموفورز^۱ (حرکت ذرات به واسطه گرادیان دما). افزودن این دو مکانیزم به معادله انرژی کلاسیک و معادله کسر حجمی به مدل بونگیورنو^۲ معروف شده است و مبنای مدل سازی انتقال حرارت نانوسیالات توسط بسیاری از محققین شده است.

بهزاد مهر و همکاران [۴۱] انتقال حرارت نانوسیال مس-آهن را برای جریان درهم و در لوله با شار ثابت و به روش دوفازی مدل سازی کردند. آنها برای کسر حجمی ۱٪ افزایش ۱۵٪ انتقال حرارت را گزارش دادند.

مایگا و همکاران [۴۲] تحقیق عددی را برای بررسی خواص دمایی وهیدرو دینامیکی نانوسیالات جاری درون یک لوله و در رژیم های جریان درهم و آرام و با استفاده از روش تک فازی انجام دادند. نتایج بیانگر افزایش انتقال حرارت بودند برای وقتی که نانوذرات به سیال پایه تزریق می شود. نویسندگان همچنین اعلام کردند که اکسید آلومینیوم در اتیلن گلیکول نسبت به اکسید آلومینیوم در آب دارای انتقال حرارت بهتری است.

روی و همکاران [۴۳] تحقیق مشابهی را با تحقیق فوق را انجام داند و نتایج شبیه نتایج مایگا و همکاران [۴۲] را گزارش کردند.

دینگ و ون [۴۴] از دو روش تکفازی و دوفازی برای مدل سازی نانوسیالات استفاده کردند، آنها تأثیر مهاجرت ذرات بر روی انتقال حرارت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که عدد پکلت^۳ به سرعت با افزایش سایز نانوذرات افزایش می یابد و در اعداد پکلت کمتر از ۱۰ اثرات حرکت براونی بسیار قابل توجه است. همچنین بهینه ترین سایز برای نانوذرات برای حالتی که افزایش انتقال حرارت قربانی افزایش افت فشار نشود، پیشنهاد شد.

¹ Thermophoresis effect

² Buongiorno model

³ Peclet number

کیم و همکاران [۴۵] انتقال حرارت در نانوسیال دوگانه با نانوذرات مس و نقره و پایداری آن بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش انتقال حرارت بیشتری را برای نانوسیال نقره نسبت به نانوسیال مس شاهد هستیم.

منصور و همکاران [۴۶] برای خواص فیزیکی نانوسیال از مدل همیلتون-کروزر و ماکسول اصلاح شده برای ضرایب حرارتی و هیدرولیکی در جریان کاملاً توسعه یافته آرام و درهم در لوله با شار حرارتی ثابت استفاده کردند.

پراکاش و گیانلیس [۴۷] تحقیقی را برای نانوسیال مس در آب و اتیلن گلیکول انجام دادند و عنوان کردند که نانوذرات سیلندر گونه انتقال حرارت بهتری از نانوذرات کروی شکل دارند.

هیپات و کوثری [۴۸] اثرات مهاجرت نانوذره که به صورت خاص به اثرات حرکت براونی و اثرات ترموفورز مربوط می شود را در لوله با جریان آرام و شار حرارتی ثابت به صورت عددی بررسی کردند. در این تحقیق از مدل بونگیورنو برای مدل سازی نانوسیالات و مطالعه اثرات مهاجرت نانوسیالات استفاده شده است. نتایج نشان داد که برای انتقال حرارت، اثرات مهاجرت نانوذرات بسیار قابل توجه است و افزایش انتقال حرارت بیشتری را نسبت به روش تکفازی شاهد هستیم.

در ادامه در جدول ۱-۲ برخی از تحقیقات اساسی در این زمینه گردآوری شده است:

جدول ۱-۲: بررسی نتایج عددی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات

نویسنده	بررسی تئوری	روش مدل سازی	نتایج
ژوان و روتزل	ضریب انتقال حرارت در	تکفازی	افزایش ضریب انتقال حرارت

با کاهش اندازه ذرات		روغن و مس و آب و مس	[۳۸]
اثرات براونی و ترموفورز اثرات غالب هستند	مدل دو فازی با فاز غیر یکنواخت برای ذره	جابجایی نانوسیالات	بونگیورنو [۴۰]
افزایش ضریب انتقال حرارت Re جابجایی با افزایش ϕ و	دوفازی	انتقال حرارت جابجایی اجباری در رژیم درهم	بهزادمهر و همکاران [۴۱]
افزایش ۶۰ درصدی انتقال حرارت	تکفازی	انتقال حرارت اجباری در لوله با آلومینا در آب و اتیلن گلیکول	مایگا و همکاران [۴۲]
در هر دو رژیم افزایش ضریب انتقال حرارت	تکفازی	رفتار حرارتی و هیدرولیکی در جریان آرام و درهم در لوله با شار ثابت	منصور و همکاران [۴۶]

۱-۷- انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل:

استفاده از نانوسیال در محیط متخلخل بصورت کاربردی در دو مورد گزارش شده است:

✓ میکروکانال

از موارد استفاده میکروکانال‌ها می‌توان به خنک‌کاری وسایل الکترونیکی اشاره کرد و با توجه به خواص نانوسیالات، استفاده از آن برای سیستم‌های خنک‌کار مبتنی بر مایع توسط محققین پیشنهاد شده است. همچنین محققین زیادی اخیراً از تقریب محیط متخلخل و روابط مربوط به آن برای مدل‌سازی جریان نانوسیالات درون میکروکانال‌ها استفاده کرده‌اند:

کیم و همکاران [۴۹]، کیم و کوزنتسو [۵۰]، عباسی و آقاجفی [۵۱]، تسای و چین [۵۲]، قزوینی و همکاران [۵۳] و قزوینی و شکوهمند [۵۴].

بنابراین مدل‌سازی جابجایی نانوسیالات در میکروکانال نیازمند درک مفاهیم جابجایی نانوسیالات در محیط متخلخل است.

✓ بیوپزشکی

از نانوسیالات برای درمان تومورهای آسیب دیده که دارای دمای بالای ۴۳ درجه سلسیوس می‌باشند استفاده می‌شود و با توجه به اینکه بافت‌های زنده یک نمونه از سیال و محیط متخلخل می‌باشند بنابراین درک مفاهیم انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات در محیط متخلخل بیش از پیش احساس می‌شود. در این زمینه نیز مقالاتی توسط سالوم و همکاران [۵۵-۵۷] به چاپ رسیده است.

✓ مروری بر مقالات گذشته:

کوزنتسو و نیلد [۵۸] از معادلات بونگیورنو برای بررسی نقطه شروع نفوذ دوگانه انتقال نانوسیالات در جریان بین دو صفحه و انتقال حرارت آزاد استفاده کردند. نویسندگان از معادله داری برای جریان نانوسیالات استفاده کردند و شرط تعادل دمایی را در نظر گرفتند. معادلات کوپل بقا به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. معادلات بی‌بعد شدند و یک سری پارامتر بی‌بعد از معادلات استخراج شد که همان ضرایب بی‌بعدی هستند که بونگیورنو [۴۰] در مقاله خود آورده است، با این تفاوت که در این ضرایب بی‌بعد پارامترهای مربوط به محیط متخلخل به چشم می‌خورد.

چمخا و همکاران [۵۹] مدل متخلخل داری را با انتقال حرارت جابجایی آزاد بر روی استوانه دما ثابت بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. سیال با جسم جامد در تعادل دمایی قرار داشت و از معادلات بونگیورنو استفاده و نتایج عددی بر اساس حرکت براونی، اثرات ترموفورز و عدد لوئیس^۱ گزارش شده بود. نتایج نشان دادند که با افزایش عدد بی‌بعد ترموفورز شاهد کاهش انتقال حرارت هستیم هم‌چنین با افزایش عدد بی‌بعد براونی شاهد افزایش ضریب اصطکاک، کاهش انتقال حرارت و افزایش انتقال جرم هستیم. با افزایش عدد بی‌بعد لوئیس شاهد افزایش ضریب اصطکاک و کاهش انتقال حرارت و کاهش انتقال جرم هستیم.

کوزنتسو و نیلد [۶۰] برای اولین بار روش سه معادله دمایی را برای شرط عدم تعادل حرارتی برای سیال پایه، نانوذرات و جسم جامد محیط متخلخل بیان کردند.

تحقیقاتی راجع به ناپایداری دمایی نانوسیالات در محیط متخلخل و انتقال حرارت آزاد انجام شده است که به ذکر منابع بسنده می‌کنیم: کوزنتسو و نیلد [۶۱-۶۲].

^۱ Lewis number

در اینجا بحث چالش برانگیز این است: دلایل پایداری نانوسیالات در محیط متخلخل چیست؟ نیلد و کوزنتسو [۶۳] در سال ۲۰۰۹ برای اولین بار موضوع انتقال حرارت نانوسیالات را درون محیط متخلخل مطرح کردند. نویسندگان در مقاله خود برای تاکید بر پایداری نانوسیالات درون محیط متخلخل و در تماس با جسم جامد و عدم ته‌نشینی نانوذرات، و در نتیجه صحت معادلات حاکم به دو دلیل اشاره کردند: ۱- نانوذرات، ذراتی بسیار کوچک هستند و در محیط متخلخل نیز با سیال پایه به حالت سوسپانسیون نانوسیال باقی می‌ماند.

۲- نانوذراتی که با مواد فعال سطحی درون سیال پایه پراکنده می‌شوند به اندازه کافی در برابر خوشه‌ای شدن و ته‌نشینی درون محیط متخلخل مقاوم هستند. علاوه بر اینها درصد پایین کسر حجمی نانوسیال نگرانی‌های مربوط به ته‌نشینی نانوذرات را به حداقل می‌رساند.

در مقالات منتشر شده در سال‌های اخیر محققین بسیاری برای مدل کردن پدیده انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل از مدل تکفازی [۶۴-۶۵] و دوفازی [۶۶-۶۸] استفاده کرده‌اند. اما با توجه به گزارشات موجود استفاده از روش‌های دوفازی (شامل جملات براونی و ترموفورز) منطقی‌تر و به واقعیت فیزیک مساله نزدیک‌تر است.

در سال ۲۰۱۴ در زمینه انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در محیط متخلخل مقاله‌ای توسط نیلد و کوزنتسو [۶۹] ارائه شده است، در این مقاله به اندک بودن منابع تحقیقاتی در زمینه فوق اشاره شده و از مقاله تحقیقاتی مغربی و همکاران [۷۰] به عنوان تنها مقاله موجود در این زمینه نام برده شده است.

در این رساله اثرات مهاجرت نانوذرات بر روی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات کانال متخلخل اشباع در حالت تعادل و عدم تعادل حرارتی بین فازها به صورت عددی بررسی شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی تکفازی و دوفازی (مدل بونگیورنو) نیز در حالت تعادل حرارتی با یکدیگر مقایسه شده

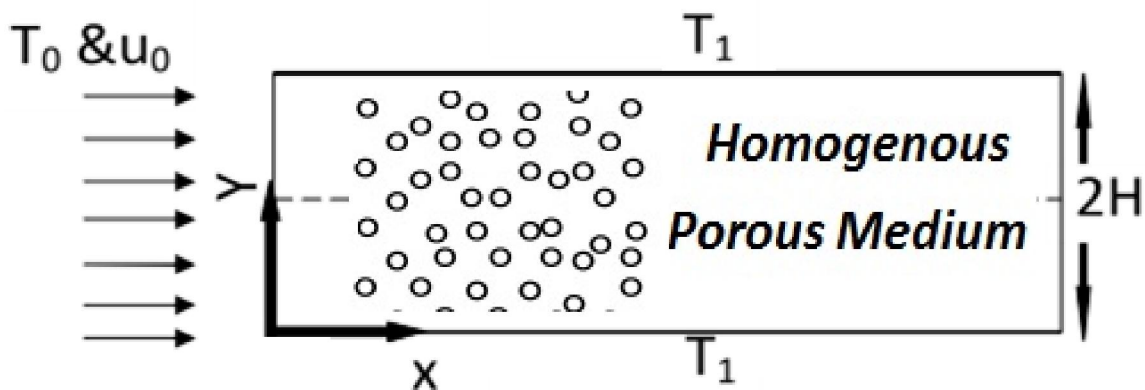
اند. در حالت عدم تعادل حرارتی و با دمای ثابت دیواره ۴ مدل برای محاسبه شار حرارتی ارائه شده است و مدلی برای محاسبه شار حرارتی سیال پایه، نانوذره و جسم جامد نیز ارائه شده است. در حالت عدم تعادل حرارتی و با شار ثابت دیواره ۳ مدل برای محاسبه سهم شار هر یک از فازها ارائه شده است به عبارت دیگر ۳ مدل برای اعمال شرط مرزی هر کدام از فازها ارائه شده است. اثرات پارامترهای مختلف بر روی انتقال حرارت اجباری در حالت عدم تعادل حرارتی بررسی شده است. اثرات افزودن نانوذره آلومینا در آب بر روی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال جاری درون لوله متخلخل به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. نتایج تجربی برای مقادیر مختلف کسر حجمی به دست آمده است و برای یک کسر حجمی خاص نتیجه حاصل از روش عددی با نتیجه تجربی مقایسه شده و ۴ شار حرارتی ارائه شده با شار منتج از روش تجربی مقایسه و مناسبترین مدل برای محاسبه شار حرارتی پیشنهاد شده است.

فصل دوم:

معادلات حاکم و روش حل عددی

۲-۱-۱- هندسه مورد مطالعه:

در این پژوهش، انتقال حرارت اجباری نانوسیالات در کانال متخلخل هموژن^۱ به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل با دو فرض وجود تعادل حرارتی و عدم وجود تعادل حرارتی بین سیال پایه، نانوذرات و جسم جامد به صورت عددی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نانوسیال جاری درون کانال متخلخل، توسعه یافته فرض شده است و نانوذرات دارای توزیع کسر حجمی غیر یکنواخت هستند. در شکل زیر شماتیکی از هندسه مورد بررسی آورده شده است:



شکل ۲-۱: کانال متخلخل دو بعدی مورد مطالعه

۲-۱-۲- فرضیات:

۱- جریان توسعه یافته آرام و غیرقابل تراکم

۲- عدم واکنش شیمیایی

۳- عدم وجود نیروی خارجی

۴- محلول رقیق ($\phi \ll 1$)

۵- عدم انتقال حرارت تشعشی

^۱ Homogenous

۳-۱-۲: محیط متخلخل

محیط متخلخل عبارت است از یک شبکه یا ماتریس جامد که دارای حفره های به هم پیوسته است، فرض بر آن است که در شرایط معمول، ماتریس جامد یا صلب است و یا تحت تغییر شکل های بسیار کوچک قرار می گیرد. اتصال و به هم پیوستگی حفره ها، به سیال اجازه جاری شدن می دهد.

۳-۱-۲: روش های تحلیل محیط متخلخل

● **روش میکروسکوپی:** در محیط های متخلخل از قبیل: سنگ ماسه، سنگ آهک، شن زار، چوب، نان و شش انسان و ... توزیع حفره ها با توجه به شکل و اندازه، نامنظم بوده و کمیت های جریان همانند سرعت، فشار و ... در مقیاس حفره^۱، به وضوح نامنظم و بی قاعده است و بررسی رفتار میدان جریان و میدان دما در این مقیاس بسیار پیچیده خواهد بود.

● **روش ماکروسکوپی:** در این روش کمیت های مورد نظر از میدان جریان و میدان دما، روی ناحیه ای که بسیاری از حفره ها را دربر دارد اندازه گیری می شوند و این کمیت های میانگین گیری شده روی حجم، تغییرات منظمی با زمان و مکان دارند و مطابق با تحلیل های تئوری هستند.

به طور کلی دو روش برای میانگین گیری وجود دارد:

۱- **روش آماری:** در این روش، عمل میانگین گیری روی گروه هایی از حفره ها که از نظر ماکروسکوپی یکسان هستند انجام می شود. سختی این روش آن است که معمولاً، اطلاعات آماری مربوط به گروه های حفره ها بر مبنای یک مدل واحد است و این فقط زمانی که همگنی آماری فرض شود، ممکن است.

۲- **روش مکانی:** در این روش متغیر های ماکروسکوپی به عنوان یک مقدار میانگین مناسب روی حجم معیار^۲ تعریف می شوند. در محیط های متخلخل همگن که حجم معیار متناوباً تکرار می شود استفاده از این روش بسیار معمول است. و اساس کار این روش نیز انتگرال گیری از متغیرها در حجم معیار است و به

^۱Pore Scale

^۲Representative Elementary Volume

صورت $\langle f \rangle = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega_f} f \cdot d\Omega$ تعریف می‌شود که در آن f متغیر مربوط به سیال، Ω حجم معیار و Ω_f

حجم اشغال شده توسط سیال در حجم معیار می‌باشد. این روش انتگرال گیری حجمی برای متغیرهای نانوذره و جسم جامد نیز قابل تعمیم است. در رساله حاضر نیز تمامی متغیرها به صورت میانگین در حجم معیار معرفی شده اند.

۲-۲- معادلات حاکم:

از معادله داری برینکمن فورچهیمر^۱ در حالت توسعه یافته برای حل جریان استفاده شده است:

$$\frac{\mu_{nf}}{\varepsilon} \nabla^2 u - \frac{\mu_{nf}}{K} u - \rho_{nf} F \frac{\varepsilon}{\sqrt{K}} u^2 - \frac{dp}{dx} = 0 \quad (۱-۲)$$

که در آن نسبت تخلخل^۲ به صورت $\varepsilon = \frac{V_{nf}}{V_{total}}$ به دست می‌آید و F ضریب فورچهیمر است و K ضریب

نفوذپذیری (تراوایی)^۳ محیط متخلخل است. μ_{nf} و ρ_{nf} به ترتیب ویسکوزیته و چگالی نانوسیال هستند.

برای معادلات انرژی و کسر حجمی، از مدل بونگیورنو به شرح زیر استفاده شده است. زمانیکه سیال پایه، نانوذرات و جسم جامد در تعادل دمایی و حرارتی باشند توزیع دمایی آنها یکسان خواهند بود و یک معادله انرژی برای آنها حل خواهد شد.

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f u \cdot \nabla T = k_m \nabla^2 T + \varepsilon (\rho c)_p \left(D_B \nabla \phi \cdot \nabla T + \frac{D_T}{T_c} \nabla T \cdot \nabla T \right) \quad (۲-۲)$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} u \cdot \nabla \phi = D_B \nabla^2 \phi + \frac{D_T}{T_c} \nabla^2 T \quad (۳-۲)$$

که در آن k_m ضریب هدایت موثر محیط متخلخل است. T_c نیز دمای مرجع است. حرکت براونی و ترموفورز در سمت راست معادله (۲-۲) ظاهر شده اند. در مقاله نیلد و همکاران [۷۱] تلفات ویسکوزیته را

^۱ Darcy-Brinkman-Forchheimer equation

^۲ Porosity

^۳ Permeability

با عدد برینکمن که بصورت $\mu U^2 H / k \Delta T K$ تعریف می‌شود بیان کردند که در آن k ، ΔT و K به ترتیب ضریب هدایت حرارتی، اختلاف دما و نفوذپذیری محیط متخلخل هستند. با مقایسه مرتبه بزرگی، از جمله اتلاف ویسکوزیته در مقایسه با جمله‌های دیگر می‌توان صرفنظر کرد. به عبارت دیگر وقتی اختلاف دمای بین دیواره و نانوسیال افزایش می‌یابد از اتلاف ویسکوزیته می‌توان صرف نظر نمود. این فرض برای مسائل انتقال حرارت که در آن شار حرارتی و یا دمای دیوار منبع غالب انتقال انرژی است فرض قابل قبولی است. شرایط مرزی دما ثابت و شار حرارتی ثابت بر روی دیواره‌ها اعمال شده است و معادلات فوق با استفاده از پارامترهای بی‌بعد زیر بی‌بعد شده‌اند.

$$T^* = \frac{(T-T_0)k}{q''H}, \sigma = \frac{(\rho c)_m}{(\rho c)_f}, t^* = \frac{tu_0}{H\sigma}, p^* = \frac{PK}{\mu u_0 H}, \nabla^* = \frac{\partial}{\partial(x^*, y^*)}, u^* = \frac{u}{u_0}, (x^*, y^*) = \frac{(x, y)}{H}, \phi^* = \frac{\phi}{\phi_0} \quad (۴-۲)$$

$$\text{دمای بی بعد برای شرایط مرزی دمای ثابت بر روی دیواره به صورت } T^* = \frac{(T-T_0)}{(T_1-T_0)} \text{ است.}$$

u_0 سرعت متوسط نانوسیال درون کانال و ϕ_0 و T_0 کسر حجمی و دمای نانوسیال در ورودی کانال و H نیم عرض کانال است. زیرنویسهای m, f, p به ترتیب مربوط به ذره، سیال پایه و محیط متخلخل است.

معادلات بی‌بعد به صورت زیر است:

$$\nabla^{*2} u^* - \frac{u^*}{Da} - \frac{\Delta}{\sqrt{Da}} u^{*2} - \frac{1}{Da} \frac{dP^*}{dx^*} = 0 \quad (۵-۲)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \left[\nabla^{*2} T^* + \frac{\tau}{Le} (\nabla^* \phi^* \cdot \nabla^* T^*) + \frac{\tau}{Le N_{bt}} (\nabla^* T_f^* \cdot \nabla^* T_f^*) \right] \quad (۶-۲)$$

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial t^*} + \frac{1}{\varepsilon} u^* \cdot \frac{\partial \phi^*}{\partial x^*} = \frac{1}{ReSc} \left[\nabla^{*2} \phi^* + \frac{1}{N_{bt}} \left(\nabla^{*2} T_f^* \right) \right] \quad (۷-۲)$$

پارامترهای بی بعد به صورت زیر هستند:

$$Da = \frac{K}{H^2 \varepsilon}, \Delta = \frac{\varepsilon^{\frac{3}{2}} F u_0 H}{\nu_{nf}}, N_{bt} = \frac{k D_B \phi_0 T_0}{D_T q'' H}, Sc = \frac{\mu}{\rho_f D_B}, Le = \frac{\alpha_m}{D_B \phi_0}, Re = \frac{u_0 H}{\nu_f}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_m}$$

$$\alpha_m = \frac{k_m}{(\rho c)_f}, \tau = \frac{\varepsilon (\rho c)_p}{(\rho c)_f} \quad (۸-۲)$$

در آن Da و Δ ، Re ، Sc ، Pr به ترتیب عدد پرانتل، عدد اشمیت^۱، عدد رینولدز، پارامتر اینرسی^۲ و عدد دارسی^۳ هستند. همچنین Le عدد لوئیس نانوسیال و τ چگالی اصلاح شده ذره^۴ هستند. N_{bt}

نسبت نفوذ اصلاح شده^۵ و بیانگر نفوذ براونی به نفوذ ترموفورز است و برای شرط مرزی دما ثابت به صورت

$$N_{bt} = \frac{D_B \phi_0 T_1}{D_T \Delta T} \text{ تعریف می شود.}$$

در حالت عدم تعادل حرارتی سه معادله دمایی برای سیال پایه، جسم جامد و نانوذرات حل می شوند.

مدل سه معادله انرژی (در محیط متخلخل) برای انتقال حرارت نانوسیالات در شرایط عدم تعادل حرارتی

توسط کوزنتسو و نیلد [۶۰] معرفی شد:

$$(\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c)_f u \frac{\partial T_f}{\partial x} = k_f \nabla^2 T_f + \varepsilon (\rho c)_p \left(D_B \nabla \phi \cdot \nabla T_f + \frac{D_T}{T_c} \nabla T_f \cdot \nabla T_f \right) + \quad (۹-۲)$$

$$h_{fp} (T_p - T_f) + h_{fs} (T_s - T_f)$$

$$\varepsilon \phi_0 (\rho c)_p \left[\frac{\partial T_p}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} u \cdot \nabla T_p \right] = \varepsilon \phi_0 k_p \nabla^2 T_p + h_{fp} (T_f - T_p) \quad (۱۰-۲)$$

¹ Schmidt number

² Inertia parameter

³ Darcy number

⁴ Modified particle-density

⁵ Modified diffusivity ratio

$$(1-\varepsilon)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s + h_{fs} (T_f - T_s) \quad (11-2)$$

همانطور که اشاره شد تمامی متغیرها از روش مکانی متوسط گیری شده‌اند به عنوان مثال برای دمای

سیال داریم: $T_f = \langle \tilde{T}_f \rangle = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega_f} \tilde{T}_f . d\Omega$ که در آن $\tilde{T}_f$ دمای سیال می‌باشد. متغیرهای بی‌بعد دما در

شرایط عدم تعادل حرارتی با شرط دمای ثابت بر روی دیواره و شار ثابت دیواره به ترتیب به صورت زیر

تعریف می‌شوند:

$$T_f^* = \frac{T_f - T_0}{T_1 - T_0}, \quad T_s^* = \frac{T_s - T_0}{T_1 - T_0}, \quad T_p^* = \frac{T_p - T_0}{T_1 - T_0}$$

$$T_f^* = \frac{(T_f - T_0)k_f}{q''H}, T_s^* = \frac{(T_s - T_0)k_s}{q''H} \text{ and } T_p^* = \frac{(T_p - T_0)k_p}{q''H} \quad (12-2)$$

و زمان بی‌بعد به صورت $t^* = \frac{tu_0}{H}$ تعریف می‌شود و معادلات بی‌بعد معادلات فوق به صورت زیر است:

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} = \frac{1}{\text{RePr}} \left[\nabla^2 T_f^* + \frac{\tau}{Le} (\nabla \phi^* . \nabla T^*) + \frac{\tau}{Le N_{bt}} (\nabla T_f^* . \nabla T_f^*) \right] \quad (13-2)$$

$$+ N_{hp} (T_p^* - T_f^*) + N_{hs} (T_s^* - T_f^*)$$

$$\frac{\partial T_p^*}{\partial t^*} + \frac{1}{\varepsilon} u^* . \nabla T_p^* = \frac{1}{\text{RePr}} [\varepsilon_p \nabla^2 T_p^* + \gamma_p N_{hp} (T_f^* - T_p^*)] \quad (14-2)$$

$$\frac{\partial T_s^*}{\partial t^*} = \frac{1}{\text{RePr}} [\varepsilon_s \nabla^2 T_s^* + \gamma_s N_{hs} (T_f^* - T_s^*)] \quad (15-2)$$

که پارامترهای بی‌بعد به صورت زیر ظاهر می‌شوند:

$$\begin{aligned}
Da &= \frac{K}{H^2 \varepsilon}, N_{bt} = \frac{D_B \varphi_0 T_1}{D_T \Delta T}, Sc = \frac{\mu}{\rho_f D_B}, Le = \frac{\alpha_f}{D_B \varphi_0}, Re = \frac{u_0 H}{\nu_f}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \alpha_f = \frac{k_f}{(\rho c)_f}, \\
\tau &= \frac{\varepsilon (\rho c)_p}{(\rho c)_f}, N_{hp} = \frac{H^2 h_{fp}}{\varepsilon (1 - \varphi_0) k_f}, N_{hs} = \frac{H^2 h_{fs}}{\varepsilon (1 - \varphi_0) k_f}, \varepsilon_p = \frac{k_p (\rho c)_f}{k_f (\rho c)_p}, \gamma_p = \frac{(1 - \varphi_0) (\rho c)_f}{\varphi_0 (\rho c)_p}, \\
\gamma_s &= \frac{\varepsilon (1 - \varphi_0) (\rho c)_f}{(1 - \varepsilon) (\rho c)_s}, \varepsilon_s = \frac{k_s (\rho c)_f}{k_f (\rho c)_s}
\end{aligned} \quad (۱۶-۲)$$

در N_{hp} و N_{hs} به ترتیب پارامتر انتقال حرارت مربوط به سیال-جامد و سیال-ذره هستند. واداس [۷۲] در مقاله خود با ارجاع به مقاله نیلد [۷۳] این پارامترها را اعداد نیلد نامگذاری کرده است. در برخی مقالات این پارامترها را اعداد اسپارو^۱ نامگذاری کرده‌اند. در این رساله نیز با استناد به مقاله واداس [۷۲] این اعداد، اعداد نیلد نامیده می‌شوند. γ_s و γ_p ظرفیت حرارتی اصلاح شده^۲، ε_p و ε_s نسبت نفوذ حرارتی اصلاح شده^۳ هستند. تعابیر و مفاهیم فیزیکی و محدوده تغییرات پارامترهای موجود در معادلات (۲-۵) الی (۲-۹) و (۲-۱۳) الی (۲-۱۵) در پیوست آمده است.

^۱ Sparrow Numbers

^۲ Modified thermal capacity ratio

^۳ Modified thermal diffusivity ratio

۲-۳- روش حل عددی معادلات حاکم:

در این رساله برای بررسی جریان نانوسیال در محیط متخلخل از معادله دارسی برینکمن فورچهمر توسعه یافته استفاده شده است. برای گسسته سازی معادله دارسی برینکمن فورچهمر توسعه یافته از روش تفاضل مرکزی استفاده شده است. صورت گسسته معادله دارسی برینکمن فورچهمر در حالت توسعه یافته به شکل زیر است:

$$\frac{u^*(j+1) - 2u^*(j) + u^*(j-1)}{\Delta y^2} - \frac{u^*(j)}{Da} - \frac{\Delta}{\sqrt{Da}} (u^*(j))^2 - \frac{1}{Da} \frac{dP^*}{dx^*} = 0 \quad (۱۷-۲)$$

جمله فورچهمر در معادله دارسی برینکمن فورچهمر جمله غیر خطی معادله فوق است برای حل این معادله از روش نیوتن استفاده شده است. در روش نیوتن مشتق معادله نسبت به سرعت گره‌ها در یک سرعت اولیه محاسبه می‌شود و حاصلضرب این ماتریس که ماتریسی سه قطری است در ماتریس سرعت برابر مقادیر معادله دارسی برینکمن فورچهمر در سرعت اولیه است. به عبارت دیگر سرعت در مرحله بعدی از حاصلضرب ماتریس معکوس در ماتریس مقادیر به دست می‌آید و مراحل تا محاسبه سرعت نهایی ادامه می‌یابد (اپرسون [۷۴]). سرعت اولیه از حل دقیق معادله دارسی برینکمن توسعه یافته در برنامه حل عددی معادله دارسی برینکمن فورچهمر قرار داده شده است.

برای حل معادلات حاکم انرژی و توزیع کسر حجمی، جمله‌های جابجایی از روش تفاضل مرکزی گسسته سازی شده است و برای جمله نفوذ حرارتی نیز از تفاضل مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است. گسسته سازی زمانی از روش کاملاً ضمنی انجام شده است. جمله ترموفورز که به صورت $\nabla T^* \cdot \nabla T^*$ در معادله انرژی ظاهر شده، به صورت تأخیری (به کمک روشی که توسط پاتانکار [۷۵] ذکر شده است) خطی سازی شده است. در این روش مقدار دما از تکرار قبل قرار داده می‌شود. صورت گسسته معادلات انرژی و توزیع کسر حجمی به صورت زیر است.

$$\begin{aligned}
& \frac{T_f^{*n+1}(i,j) - T_f^{*n}(i,j)}{\Delta t^*} + u^*(i,j) \frac{T_f^{*n+1}(i,j+1) - T_f^{*n+1}(i,j-1)}{2\Delta x^*} = \\
& \frac{1}{\text{RePr}} \left\{ \frac{T_f^{*n+1}(i,j+1) - 2T_f^{*n+1}(i,j) + T_f^{*n+1}(i,j-1)}{\Delta x^{*2}} + \frac{T_f^{*n+1}(i+1,j) - 2T_f^{*n+1}(i,j) + T_f^{*n+1}(i-1,j)}{\Delta y^{*2}} + \right. \\
& \left. \frac{\tau}{LeN_{bt}} \left(\left(\frac{T_f^{*n}(i,j+1) - T_f^{*n}(i,j-1)}{2\Delta x^*} \right)^2 + \left(\frac{T_f^{*n}(i+1,j) - T_f^{*n}(i-1,j)}{2\Delta y^*} \right)^2 \right) + \right. \\
& \left. \frac{\tau}{Le} \left(\left(\frac{T_f^{*n+1}(i,j+1) - T_f^{*n+1}(i,j-1)}{2\Delta x^*} \times \frac{\varphi^{*n}(i,j+1) - \varphi^{*n}(i,j-1)}{2\Delta x^*} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{T_f^{*n+1}(i+1,j) - T_f^{*n+1}(i-1,j)}{2\Delta y^*} \times \frac{\varphi^{*n}(i,j+1) - \varphi^{*n}(i,j-1)}{2\Delta y^*} \right) \right. \\
& \left. + N_{hp} \left(T_p^{*n}(i,j) - T_f^{*n+1}(i,j) \right) + N_{hs} \left(T_s^{*n}(i,j) - T_f^{*n+1}(i,j) \right) \right\}
\end{aligned}
\tag{۱۸-۲}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{T_p^{*n+1}(i,j) - T_p^{*n}(i,j)}{\Delta t^*} + \frac{u^*(i,j)}{\varepsilon} \frac{T_p^{*n+1}(i,j+1) - T_p^{*n+1}(i,j-1)}{2\Delta x^*} = \\
& \frac{1}{\text{RePr}} \left\{ \varepsilon_p \left(\frac{T_p^{*n+1}(i,j+1) - 2T_p^{*n+1}(i,j) + T_p^{*n+1}(i,j-1)}{\Delta x^{*2}} + \frac{T_p^{*n+1}(i+1,j) - 2T_p^{*n+1}(i,j) + T_p^{*n+1}(i-1,j)}{\Delta y^{*2}} \right) + \right. \\
& \left. \gamma_p N_{hp} \left(T_f^{*n+1}(i,j) - T_p^{*n+1}(i,j) \right) \right\}
\end{aligned}
\tag{۱۹-۲}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{T_s^{*n+1}(i,j) - T_s^{*n}(i,j)}{\Delta t^*} = \\
& \frac{1}{\text{RePr}} \left\{ \varepsilon_s \left(\frac{T_s^{*n+1}(i,j+1) - 2T_s^{*n+1}(i,j) + T_s^{*n+1}(i,j-1)}{\Delta x^{*2}} + \frac{T_s^{*n+1}(i+1,j) - 2T_s^{*n+1}(i,j) + T_s^{*n+1}(i-1,j)}{\Delta y^{*2}} \right) + \right. \\
& \left. \gamma_s N_{hs} \left(T_f^{*n+1}(i,j) - T_s^{*n+1}(i,j) \right) \right\}
\end{aligned}
\tag{۲۰-۲}$$

با توجه به اینکه نتایج در حالت پایا گزارش می‌شوند، عدد پکلت نقشی در توسعه دمای جامد ندارد.

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\varphi^{*n+1}(i, j) - \varphi^{*n}(i, j)}{\Delta t^*} + \frac{u^*(i, j)}{\varepsilon} \frac{\varphi^{*n+1}(i, j+1) - \varphi^{*n+1}(i, j-1)}{2\Delta x^*} =$$

$$\frac{1}{\text{ReSc}} \left\{ \frac{1}{N_{bt}} \frac{T_f^{*n+1}(i, j+1) - 2T_f^{*n+1}(i, j) + T_f^{*n+1}(i, j-1)}{\Delta x^{*2}} + \frac{T_f^{*n+1}(i+1, j) - 2T_f^{*n+1}(i, j) + T_f^{*n+1}(i-1, j)}{\Delta y^{*2}} + \right.$$

$$\left. \frac{\varphi^{*n+1}(i, j+1) - 2\varphi^{*n+1}(i, j) + \varphi^{*n+1}(i, j-1)}{\Delta x^{*2}} + \frac{\varphi^{*n+1}(i+1, j) - 2\varphi^{*n+1}(i, j) + \varphi^{*n+1}(i-1, j)}{\Delta y^{*2}} \right\} \quad (21-2)$$

شبکه یکنواخت برای دامنه محاسباتی استفاده شده و تولید شبکه به روش جبری انجام شده است. برای

دامنه محاسباتی یک شبکه 300×300 در نظر گرفته شده و معادلات در این شبکه حل شده‌اند.

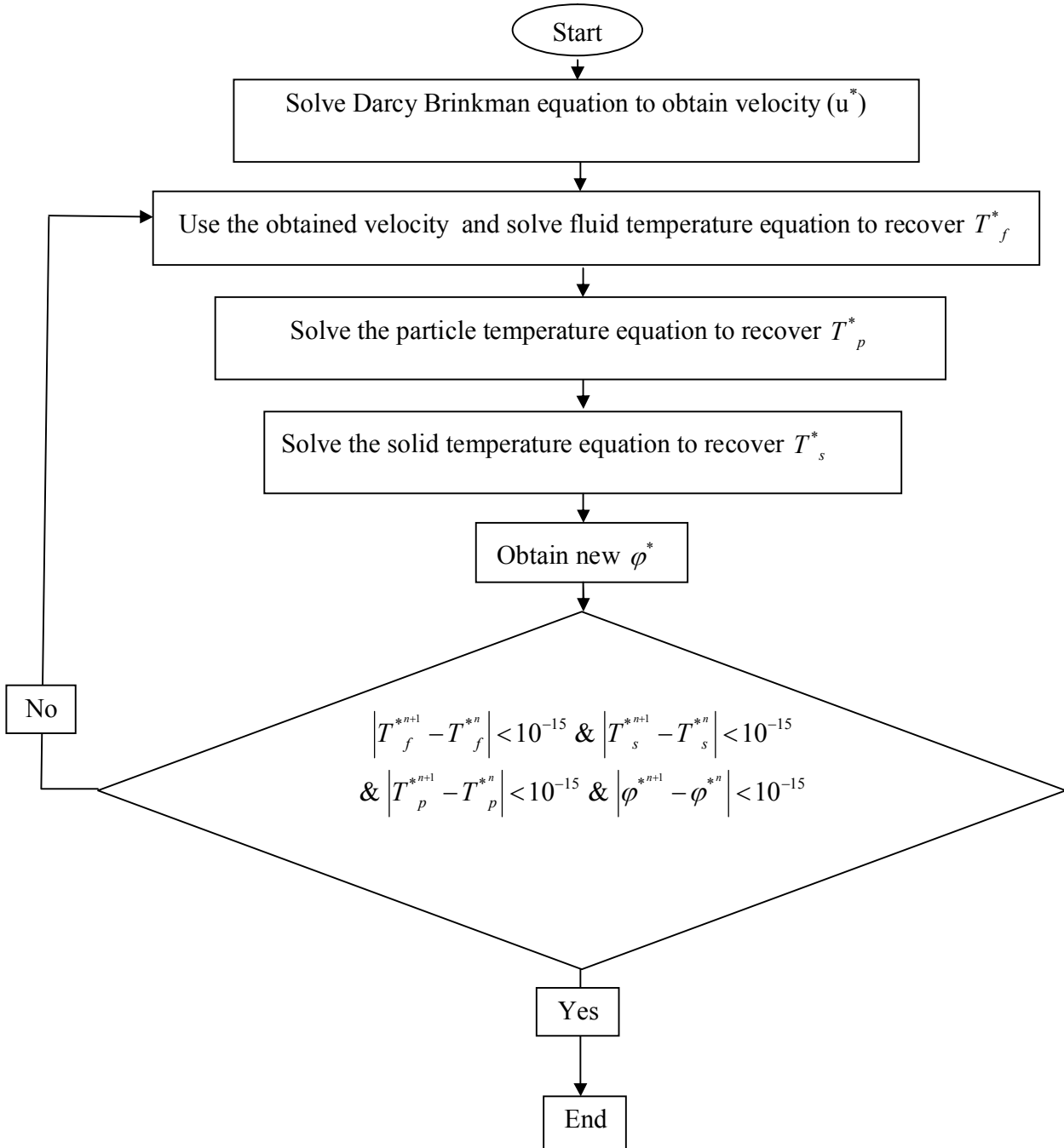
سرعت نانوسیال به صورت مستقیم در معادلات انرژی قرار گرفته است و معادلات وابسته انرژی و

توزیع کسر حجمی بصورت خط به خط با ایجاد ماتریس پنج قطری در دامنه محاسباتی جاروب شده و

حل می‌شوند.

فلوچارت حل عددی به صورت زیر است:

فلوچارت ۱-۲: مراحل حل عددی معادلات حاکم بر کانال متخلخل



۲-۴- شرایط مرزی و اولیه

شرایط مرزی برای حالت تعادل حرارتی و عدم تعادل حرارتی به صورت جداگانه ارائه شده است.

۲-۴-۱- تعادل حرارتی:

شرایط مرزی (برای شار ثابت دیواره‌ها) به صورت زیر است:

$$y^* = 0 \quad \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = -1, \varphi^* = 0, u^* = 0 \quad (22-2)$$

$$y^* = 2 \quad \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = 1, \varphi^* = 0, u^* = 0 \quad (23-2)$$

$$x^* = 0 \quad T^* = 0, \varphi^* = 1 \quad (24-2)$$

برای شرط مرزی خروجی، گرادیان طولی را که با توجه طولی بودن کانال مقداری بسیار ناچیز است، صفر در نظر می‌گیریم:

$$x^* = 20 \quad \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial \varphi^*}{\partial x^*} = 0 \quad (25-2)$$

شرایط اولیه به صورت زیر است:

$$T^*(t^* = 0) = 0, \varphi^*(t^* = 0) = 1 \quad (26-2)$$

برای شرط مرزی دما ثابت بر روی دیواره‌ها دمای بی‌بعد برابر یک قرار داده شده است.

۲-۴-۲- عدم تعادل حرارتی

در این رساله برای محیط متخلخل در حالت عدم تعادل حرارتی شرایط مرزی دما ثابت و شار مرزی ثابت در نظر گرفته شده است. شرط مرزی شار ثابت و سهم شار هر کدام از فازها (سیال، نانوذره و جسم جامد) به عنوان بخشی از نوآوری و دستاوردهای این رساله در فصول بعدی معرفی شده و مورد بحث قرار می گیرد. شرایط مرزی برای حالت عدم تعادل حرارتی و با دمای ثابت دیواره به صورت زیر است:

$$y^* = 0 \text{ and } 2 \quad T_f^* = 1, T_p^* = 1, T_s^* = 1, \varphi^* = 0, u^* = 0 \quad (27-2)$$

$$x^* = 0 \quad T_f^* = 1, T_p^* = 1, T_s^* = 1, \varphi^* = 1 \quad (28-2)$$

$$x^* = 20 \quad \frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial T_p^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial T_s^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial \varphi^*}{\partial x^*} = 0 \quad (29-2)$$

شرایط اولیه به صورت زیر است:

$$T_f^*(t^* = 0) = T_p^*(t^* = 0) = T_s^*(t^* = 0) = 0 \quad (30-2)$$

$$\varphi^*(t^* = 0) = 1 \quad (31-2)$$

لازم به ذکر است که رابطه بالانس انرژی در هر تکرار از حل عددی لحاظ شده است و بنابراین رابطه گرادیان دما برابر صفر، برای شار ثابت نیز قابل اعمال است.

۲-۵- اعتبار سنجی برنامه عددی:

در پژوهش حاضر و در تمام روش‌های تحلیلی و در اکثر روش‌های عددی برای مدل‌سازی جریان سیال در کانال حاوی ماده متخلخل از نسبت تخلخل ثابت و از ماده متخلخل هموژن استفاده می‌شود. به بیان دیگر، نسبت تخلخل در معادلات ثابت فرض می‌شود. ولی در کار تجربی ساخت محیط متخلخل همگن کار دشواری بوده و ثابت نگه داشتن نسبت تخلخل محلی دشوار است. بنابراین جریان سیال و انتقال حرارت در مدل ساخته شده (تجربی) متفاوت از معادلات و مدل‌های حل شده است (به دلیل تفاوت ماده ساخته شده و مدل‌های ساده ریاضی موجود). با توجه به مواردی که مختصراً ذکر شد، امکان مقایسه مدل‌های عددی با کارهای تجربی دشوار است. فلذا اعتبارسنجی به کمک معادلات کلاسیک و دارای حل دقیق انجام شده است.

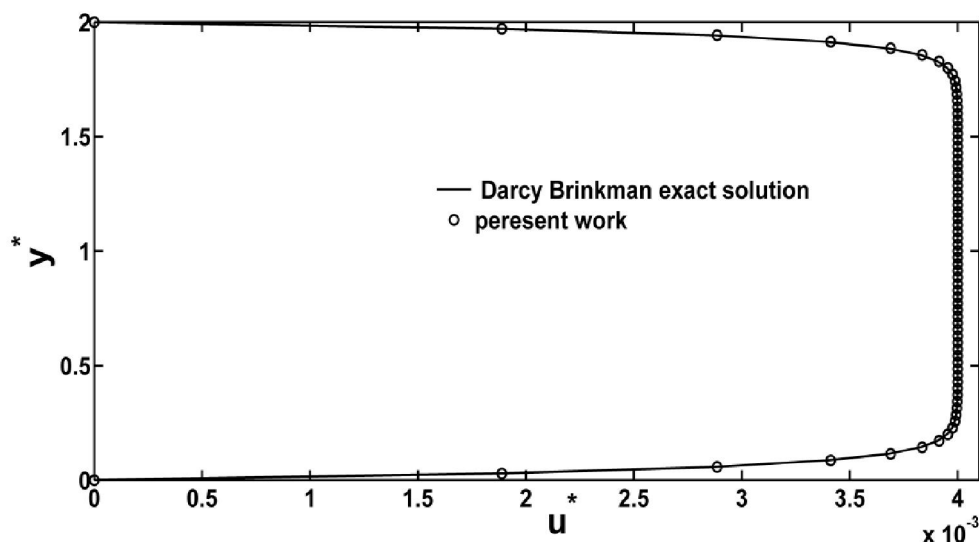
۲-۵-۱- جریان توسعه یافته داری برینکمن فورچهیم:

بررسی صحت برنامه عددی نوشته شده برای حل معادله جریان توسعه یافته داری برینکمن فورچهیم در ذیل آمده است:

۲-۵-۱-۱- مقایسه با حل تحلیلی معادله جریان توسعه یافته داری برینکمن:

معادله داری برینکمن فورچهیم در حالت حدی یعنی $\Delta \rightarrow 0$ همان معادله داری برینکمن و معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه دوم است که دارای حل تحلیلی است. شکل ۲-۲ هم‌خوانی بسیار خوبی را بین نتایج عددی داری برینکمن فورچهیم در حالت حدی با حل تحلیلی معادله داری برینکمن نشان

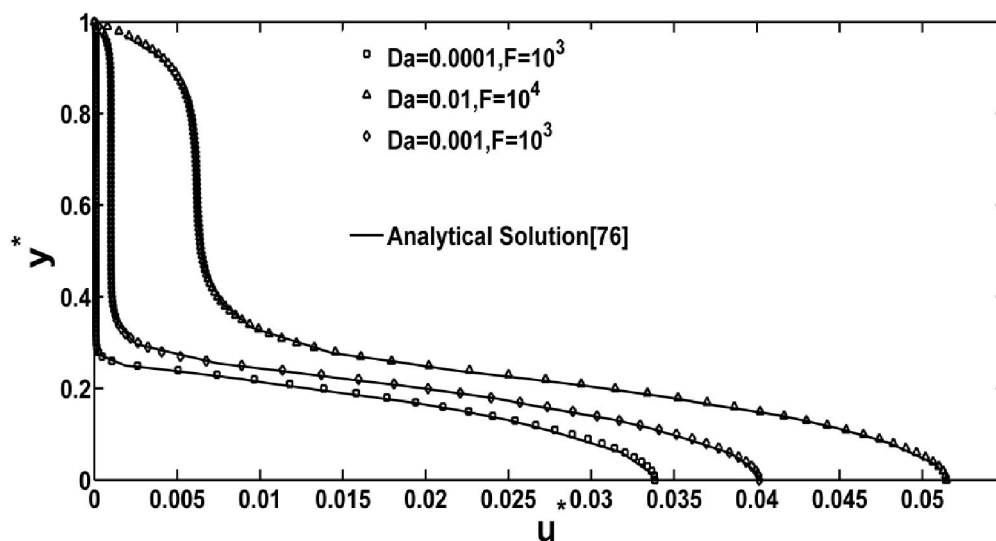
می‌دهد. این مقادیر به ازای $\frac{1}{Da} = 500$ و $\frac{1}{Da} \frac{dP^*}{dx^*} = -2$ به دست آمده‌اند.



شکل ۲-۲: مقایسه حل عددی با حل تحلیلی معادله دارسی برینکمن

۲-۱-۵-۲- مقایسه با حل تحلیلی معادله جریان توسعه یافته دارسی برینکمن فورچهیمر:

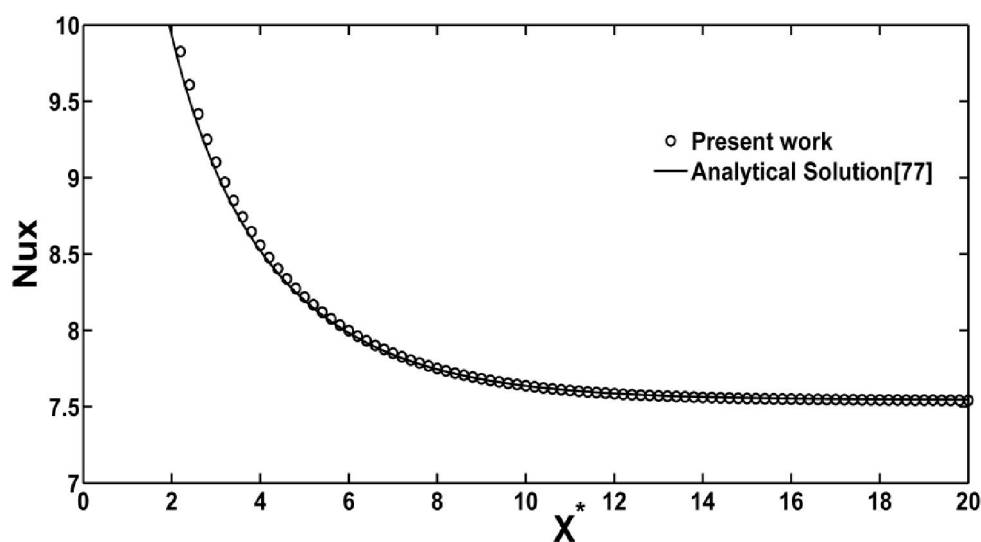
نتایج عددی حل دارسی برینکمن فورچهیمر با حل تحلیلی کوزنتسو [۷۶] مقایسه شده است. در مقاله کوزنتسو [۷۶] عرض کانال به طور کامل با محیط متخلخل پر نشده است بلکه در فاصله 0.25 از مرکز کانال تا دیواره محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. شکل (۲-۳) تطابق بسیار خوبی را بین نتایج عددی و تحلیلی نشان می دهد.



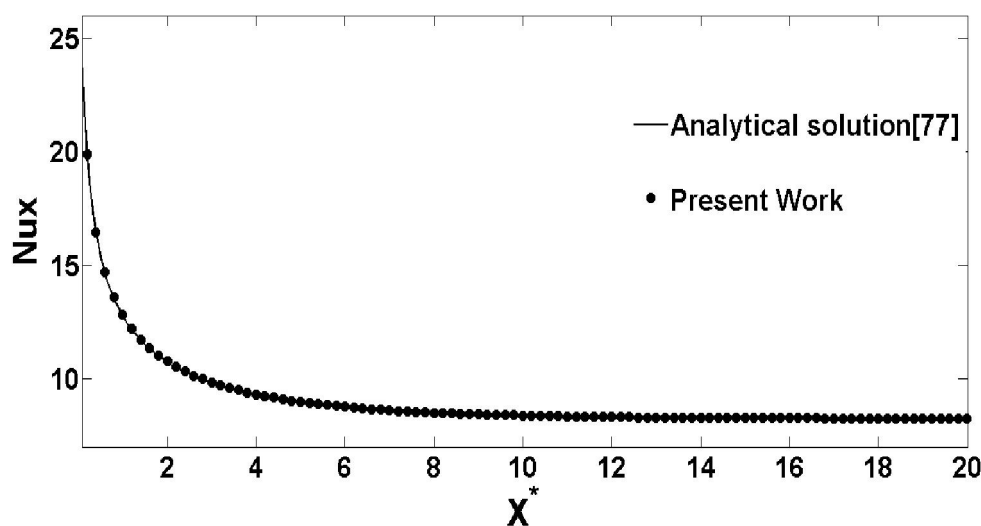
شکل ۲-۳: مقایسه حل عددی با حل تحلیلی کوزنتسو [۷۶]

۲-۵-۲- معادله انرژی

در حالت تعادل حرارتی بین فازها و در حالت حدی ($Le \rightarrow \infty$) معادله (۲-۶) همان معادله کلاسیک انرژی را نتیجه می‌دهد. زمانی که نسبت تخلخل برابر یک باشد کانال متخلخل همان کانال معمولی خواهد بود. برای بررسی صحت برنامه عددی، معادله انرژی با در نظر گرفتن جریان توسعه یافته در کانال که دارای حل تحلیلی است و با صفر کردن ضریب نفوذ براونی و ترموفورز حل شد. حل تحلیلی معادله انرژی در کانال معمولی با شرط دمای ثابت و شار ثابت در دیواره در کتاب شاه و لندن [۷۷] آمده است. در اشکال زیر مقایسه عدد ناسلت گزارش شده حل عددی و حل تحلیلی آورده شده است:



شکل ۲-۴: مقایسه عدد ناسلت منتج از حل عددی با حل تحلیلی شاه و لندن [۷۷] با شرط دمای ثابت دیواره



شکل ۲-۵: مقایسه عدد ناسلت منتج از حل عددی با حل تحلیلی شاه و لندن [۷۷] با شرط شار ثابت دیواره

برای عدد ناسلت در حالت کاملاً توسعه یافته حرارتی (در روش حاضر) عدد $8/235$ برای شار حرارتی ثابت روی دیوار و $7/54$ برای دمای ثابت روی دیوار به دست آمده‌اند که در کتب انتقال حرارت نیز به آن اشاره شده است. همچنین وابستگی نتایج عدد ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته حرارتی به تعداد شبکه مورد

بررسی قرارگرفته است. مقادیر ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته کانال برای شبکه‌های 100×100 ، 200×200 ، 300×300 و 400×400 محاسبه شد و محاسبات، استقلال نتایج از تعداد شبکه را نشان دادند. در جدول ۱-۲ و ۲-۲ مقادیر مربوط به بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه آورده شده است.

جدول ۱-۲: بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه برای حالت دما ثابت

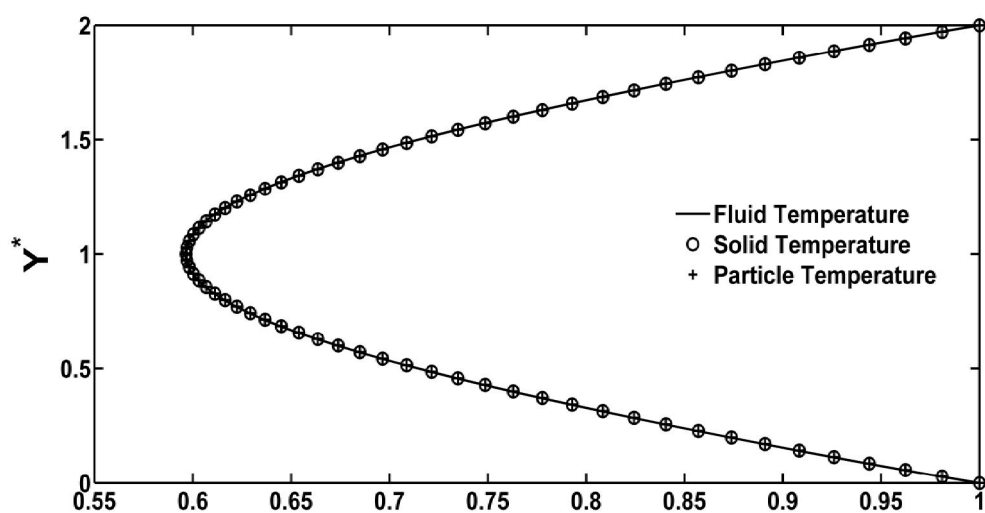
تعداد شبکه	ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته
100×100	۷/۵۴۱۸
200×200	۷/۵۴۱۹
300×300	۷/۵۴۲
400×400	۷/۵۴۲

جدول ۲-۲: بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه برای حالت شار ثابت

تعداد شبکه	ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته
100×100	۸/۲۳۴
200×200	۸/۲۳۴
300×300	۸/۲۳۵
400×400	۸/۲۳۵

برای بررسی صحت حل عددی معادلات توزیع دمای جامد و نانوذره، توزیع دمای سیال در حالت تعادل دمایی به‌دست آمده در معادلات مذکور قرار داده شد و به ازای مقادیر حدی بسیار بزرگ برای عدد نیلد

سیال/نانوذره و سیال/جسم جامد ($N_{hp} = N_{hs} = 10^6$)، توزیع دمای جامد و نانوذره هم‌پوشانی کاملی با توزیع دمای سیال مشاهده می‌شود. شکل ۶-۲ بیانگر هم‌پوشانی توزیع دمای سیال، نانوذره و جامد است.



شکل ۶-۲: توزیع دمای جامد، نانوذره و سیال در $N_{hp} = N_{hs} = 10^6$

فصل سوم:

نتایج عددی کانال متخلخل

تبادل حرارتی

عدم تبادل حرارتی

در این فصل نتایج مربوط به حالت تعادل حرارتی و عدم تعادل حرارتی بین فازها ارائه می‌شود:

۳-۱- تعادل حرارتی:

در این قسمت، نتایج عددی حاصل از حل معادلات حاکم تعادل حرارتی در حالت دمای ثابت دیواره و

مربوط به مقادیر $\frac{\Delta}{\sqrt{Da}}=20$ ، $Da=0.02$ و $Pe=1350$ و همچنین $\frac{1}{Da} \frac{dP^*}{dx^*}=-2$ ارائه شده است.

مقادیر مربوط به حل معادله داری برینکمن فورچهمیر از مقادیر پیشنهادی در مقاله کوزنتسو [۷۶] قرار داده شده است. در این فصل از رساله نسبت تخلخل برابر نیم فرض شده است. محدوده تغییرات اعداد

بی‌بعد در پیوست آمده است که برای اغلب نانوسیالات قابل اعمال است.

شکل ۳-۱ تأثیرات عدد لوئیس را بر روی عدد ناسلت محلی، توزیع دما و توزیع کسر حجمی نشان

می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است عدد لوئیس در بازه 10^6-100 تغییر می‌کند و نتایج

برای اعداد $Sc=100$ و $N_{bt}=0.1$ گزارش شده‌اند. شکل ۳-۱ تغییرات عدد ناسلت محلی را به ازای

تغییرات عدد لوئیس نشان می‌دهد و همچنین تغییرات توزیع کسر حجمی و توزیع دما به ازای تغییرات

عدد لوئیس در شکل‌های ۳-۲ و ۳-۳ نشان داده شده است. این نتایج در ناحیه کاملاً توسعه یافته دمایی

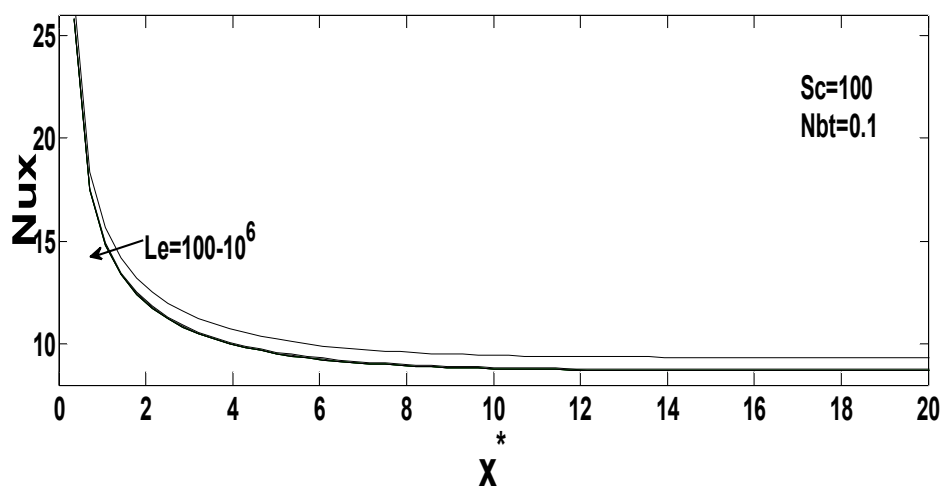
($X^*=20$) گزارش شده‌اند.

از آنجا که معادله انرژی بسیار متأثر از عدد لوئیس است بنابراین با تغییر عدد لوئیس، ناسلت محلی و

توزیع دما تغییرات قابل توجهی خواهند داشت. گرادیان دمای دیواره با افزایش عدد لوئیس کاهش می‌یابد

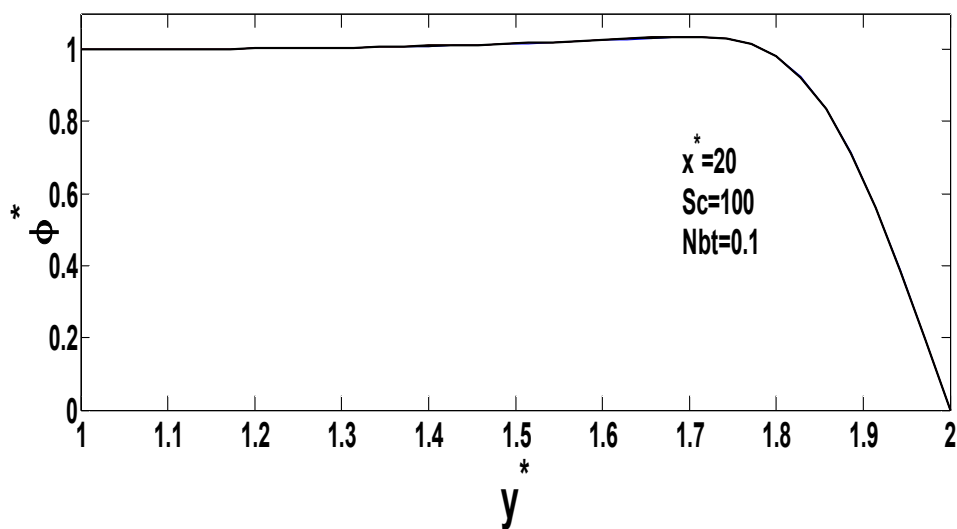
و بنابراین عدد ناسلت نیز کاهش خواهد یافت. نتایج نشان می‌دهند که کاهش اثرات مهاجرت نانوذرات

موجب کاهش عدد ناسلت می‌شود.

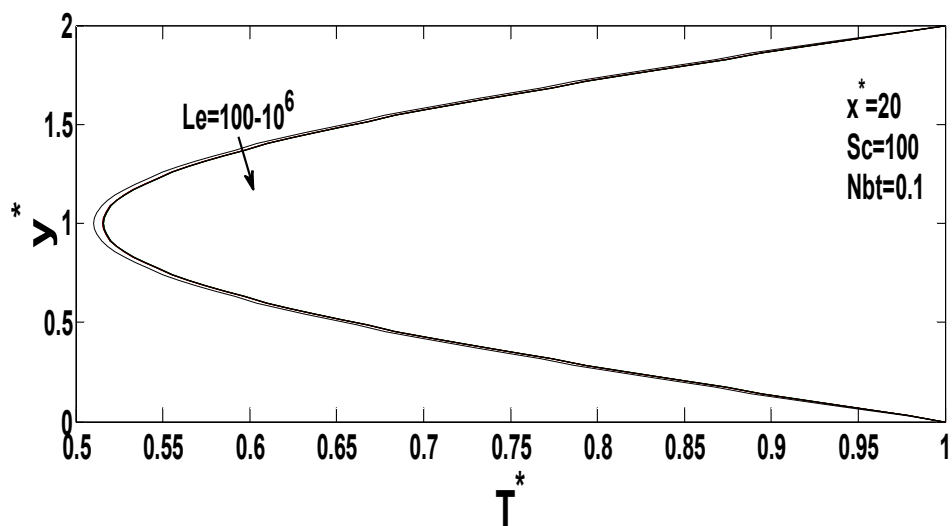


شکل ۳-۱: تغییرات عدد ناسلت با تغییرات عدد لوئیس [۷۰]

با توجه به اینکه عدد لوئیس به طور مستقیم در معادله کسر حجمی وارد نشده است تغییرات کسر حجمی به واسطه تغییرات دمای متأثر از تغییرات عدد لوئیس بسیار ناچیز است. همانطور که شکل ۳-۲ نشان می‌دهد: با تغییرات عدد لوئیس توزیع کسر حجمی تغییر محسوسی نمی‌کند. همانطور که با توجه به شکل مشخص است، بخاطر نفوذ براونی و ترموفورز، ذرات از ناحیه گرم دیواره به محیط سرد مرکز مهاجرت می‌کنند.



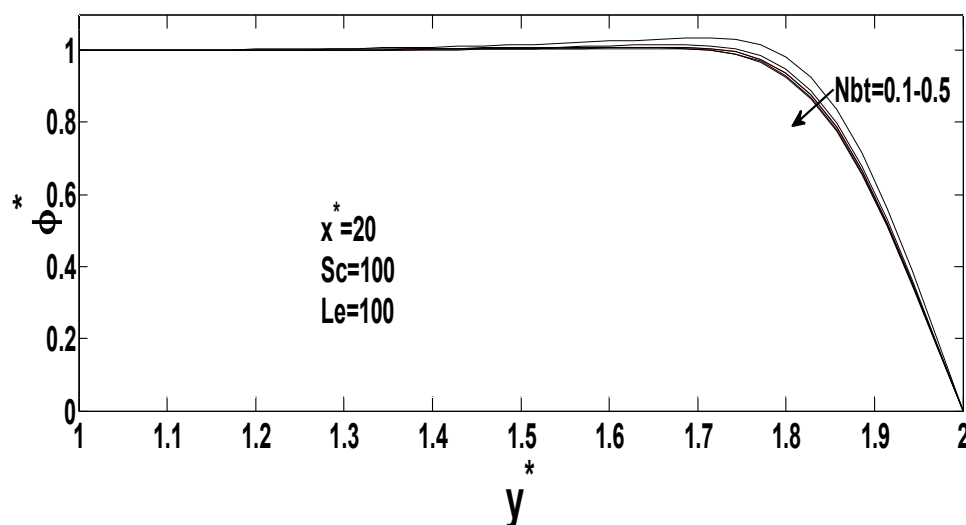
شکل ۳-۲: تغییرات توزیع کسر حجمی با تغییرات عدد لوئیس [۷۰]



شکل ۳-۳: تغییرات توزیع دما با تغییرات عدد لوئیس [۷۰]

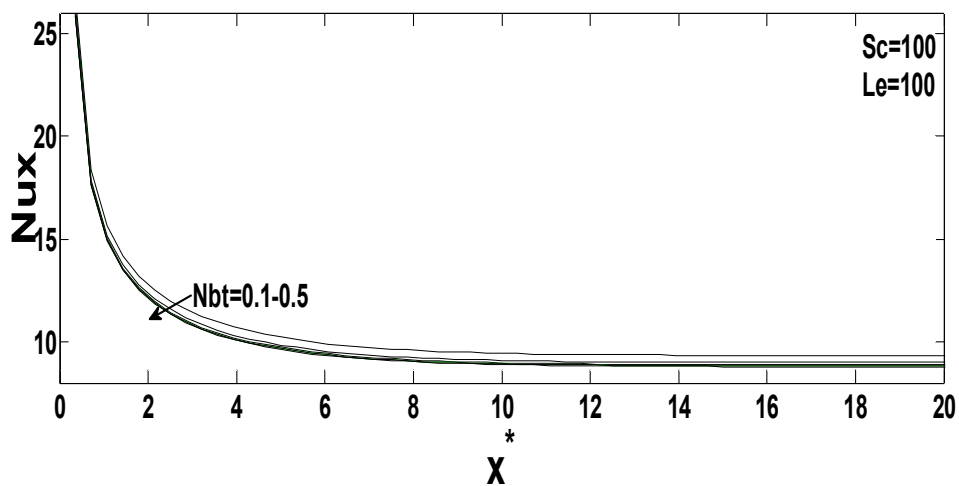
شکل‌های ۳-۴ الی ۳-۶ تأثیرات ضریب نفوذ اصلاح شده (N_{bt}) را بر روی توزیع کسر حجمی، عدد ناسلت و توزیع دما نشان می‌دهند. عدد N_{bt} بین ۰/۱ تا ۰/۵ تغییر می‌کند و اعداد اشمیت و لوئیس مقدار ثابت ۱۰۰ را دارند.

شکل ۳-۴ توزیع کسر حجمی را با تغییرات N_{bt} نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دیواره بالاترین دما را دارد پس ذرات از دیواره به سمت مرکز کانال مهاجرت می‌کنند، به عبارت دیگر در D_B ثابت، یا اعداد اشمیت و لوئیس ثابت، افزایش D_T (و در نتیجه کاهش N_{bt}) منجر به افزایش مهاجرت به مرکز کانال می‌شوند. معادله مربوط به N_{bt} نشان می‌دهد که افزایش D_T باعث کاهش N_{bt} می‌شود بنابراین کاهش در N_{bt} باعث مهاجرت ذرات به سمت مرکز کانال می‌شود. شکل ۳-۴ این مفهوم را به درستی نمایش می‌دهد که کاهش در N_{bt} منجر به افزایش کسر حجمی در ناحیه خاصی نزدیک مرکز کانال می‌شود.

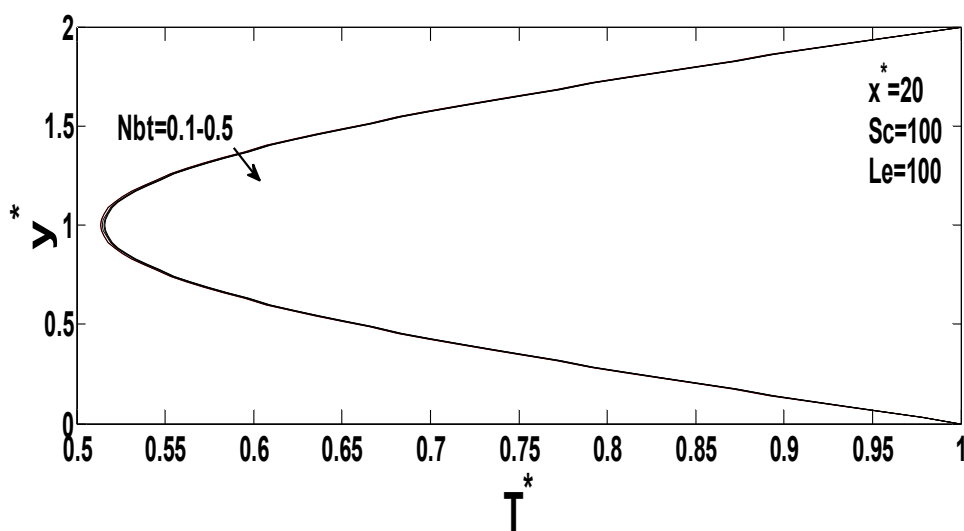


شکل ۳-۴: تغییرات توزیع کسر حجمی بی بعد در مقطع خروجی با تغییرات N_{bt} [۷۰]

شکل‌های ۳-۵ و ۳-۶ عدد ناسلت محلی و توزیع دمای بی بعد را درون کانال متخلخل برای مقادیر مختلف N_{bt} نمایش می‌دهند. نتایج در شکل ۳-۵ کاهش عدد ناسلت محلی را به ازای افزایش N_{bt} نشان می‌دهد. افزایش N_{bt} به ازای مقادیر ثابت اشمیت و لوئیس (مقدار ثابت نفوذ برآونی) باعث کاهش نفوذ ترموفورز و مهاجرت نانو ذرات شده و کاهش گرادیان دمای دیواره و بنابراین کاهش عدد ناسلت مشاهده می‌شود.



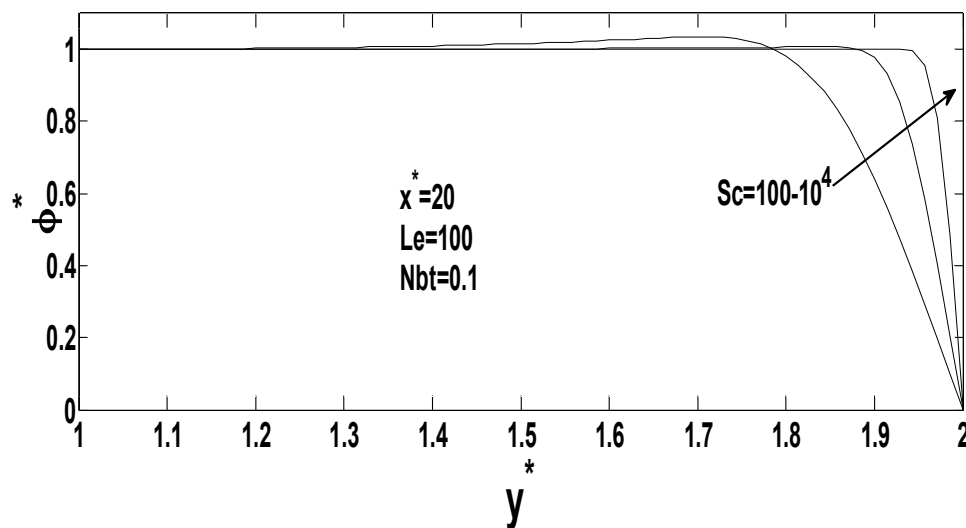
شکل ۳-۵: تغییرات عدد ناسلت محلی با تغییرات N_{bt} [۷۰]



شکل ۳-۶: تغییرات دمای بی بعد در مقطع خروجی با تغییرات N_{bt} [۷۰]

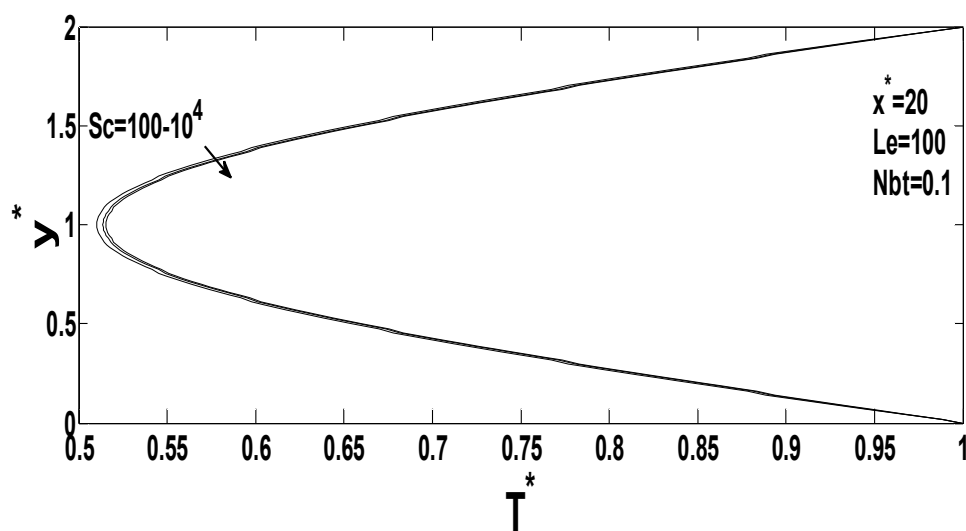
شکل‌های ۳-۷ الی ۳-۹ اثرات تغییر عدد اشمیت را در بازه ۱۰۰ تا 10^4 بر روی توزیع کسر حجمی و انتقال حرارت نشان می‌دهد. N_{bt} و عدد لوئیس به ترتیب دارای مقادیر ۰/۱ و ۱۰۰ می‌باشند.

همانطور که شکل ۷-۳ نشان می‌دهد، در اعداد اشمیت بزرگ، جمله مربوط به جابجایی جمله غالب است و توزیع کسر حجمی شبیه توزیع کسر حجمی ورودی است. با کاهش D_B عدد اشمیت افزایش می‌یابد و با توجه به ثابت بودن N_{bt} ، D_T کاهش می‌یابد و در نتیجه مهاجرت ذرات کم شده و توزیع به سمت توزیع نانوذرات در مقطع ورودی پیش می‌رود.

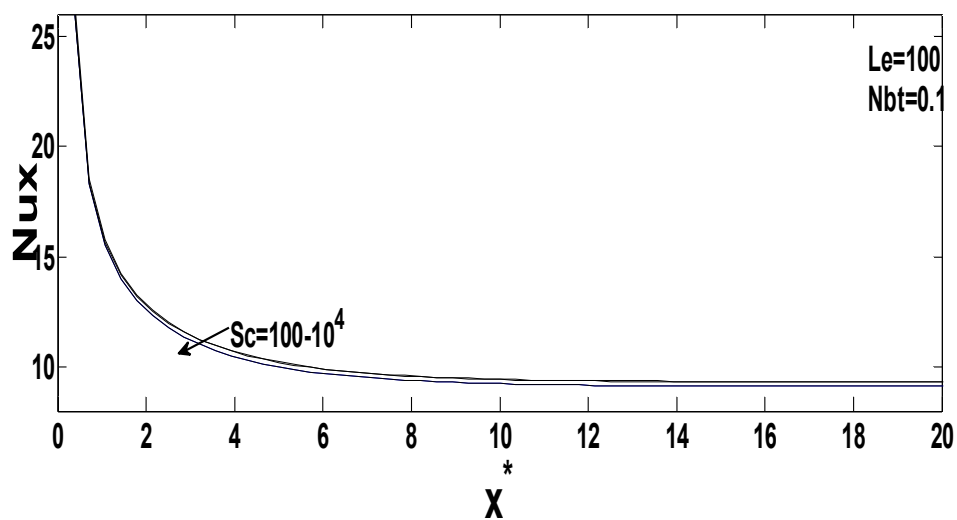


شکل ۷-۳: توزیع کسر حجمی در مقطع خروجی و با عدد اشمیت متغیر [۷۰]

شکل‌های ۸-۳ و ۹-۳ توزیع دمای بی‌بعد و عدد ناسلت محلی را نشان می‌دهند. کاهش عدد ناسلت محلی به ازای افزایش عدد اشمیت در شکل زیر مشخص است.



شکل ۳-۸: توزیع دما در مقطع خروجی و به ازای عدد اشمیت متغیر [۷۰]



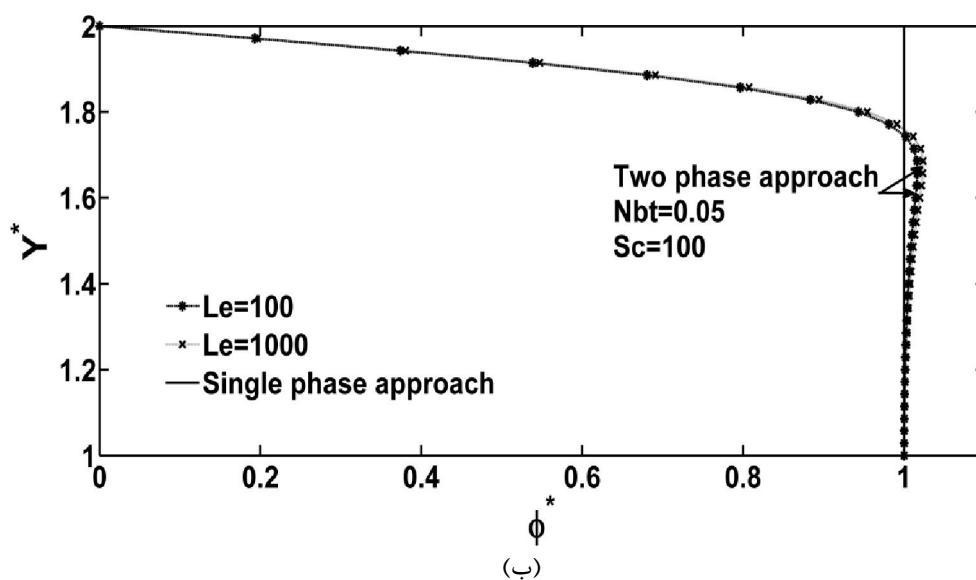
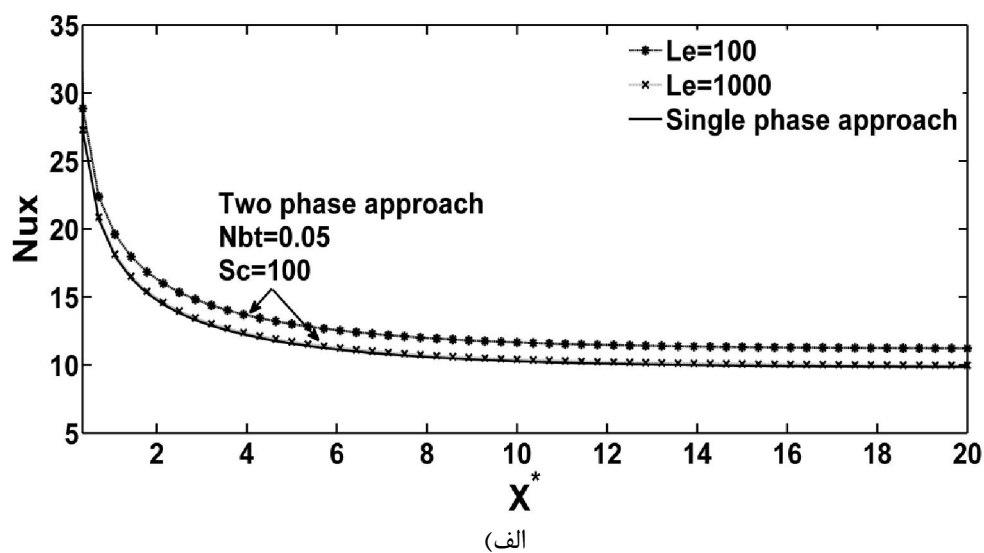
شکل ۳-۹: عدد ناسلت محلی به ازای عدد اشمیت متغیر [۷۰]

در ادامه انتقال حرارت نانوسیالات در کانال متخلخل منتج از مدل سازی تکفازی (با فرض توزیع یکنواخت نانوذرات) و دوفازی (با فرض توزیع غیر یکنواخت نانوذرات) مورد بررسی قرار می گیرد:

در این قسمت، نتایج عددی حاصل از حل معادلات حاکم در حالت تعادل حرارتی بین فازها و با شار

حرارتی ثابت و مربوط به مقادیر $\frac{\Delta}{\sqrt{Da}}=20$ ، $Da=0.002$ و همچنین $\frac{1}{Da} \frac{dP^*}{dx^*}=-2$ ارائه شده است.

شکل ۳-۱۰ تأثیرات عدد لوئیس را بر روی عدد ناسلت محلی و توزیع کسر حجمی و مقایسه با حالت تکفازی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، عدد لوئیس دارای مقادیر ۱۰۰ و ۱۰۰۰ است و نتایج برای اعداد ثابت $N_{bt}=0.05$ و $Sc=100$ به دست آمده‌اند. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش عدد لوئیس، ضرایب مربوط به اثرات مهاجرت (نفوذ براونی و اثرات ترموفورز) به صفر نزدیک می‌شوند و معادله (۲-۶) همان معادله انرژی حالت تکفاز خواهد بود. همانطور که در شکل قابل مشاهده است عدد ناسلت محلی بدست آمده از روش دوفازی دارای مقدار بیشتری از عدد ناسلت محلی بدست آمده از روش تکفازی است. همانطور که در قسمت قبلی بیان شد، شکل ۳-۲ نشان می‌دهد که با تغییرات عدد لوئیس توزیع کسر حجمی تغییر محسوسی نمی‌کند زیرا عدد لوئیس به طور مستقیم در معادله کسر حجمی وارد نشده است. همچنین مهاجرت ذرات از ناحیه گرم دیواره به محیط سرد مرکز بخاطر نفوذ براونی و ترموفورز، در شکل مشاهده می‌شود.

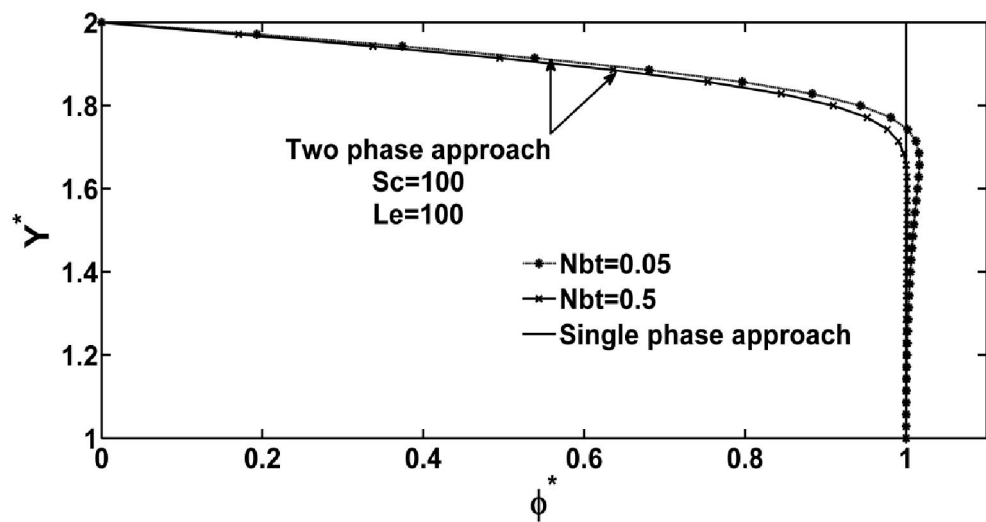


شکل ۳-۱۰: الف) عدد ناسلت در کانال متخلخل با عدد لوئیس متغیر در حالت‌های دوفازی و تکفازی، ب) توزیع کسر حجمی در مقطع خروجی [۷۸]

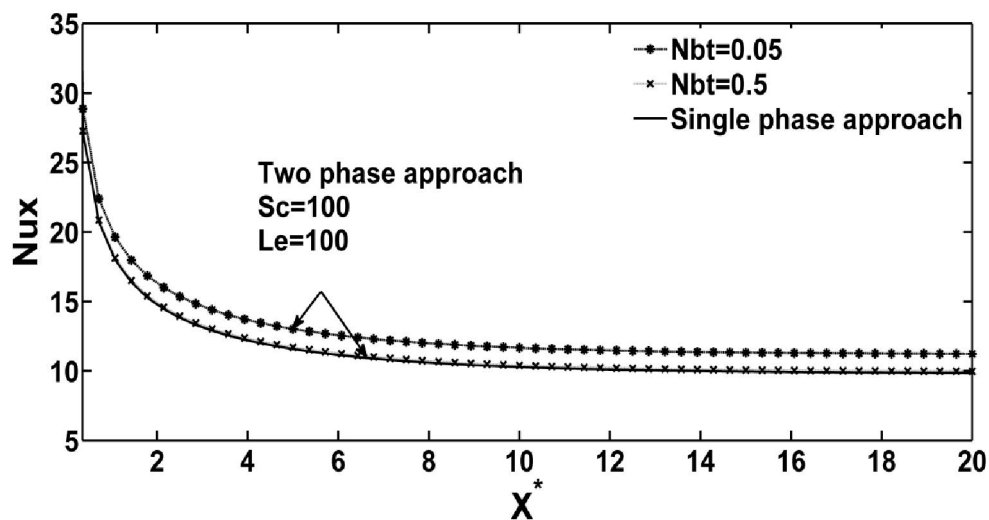
شکل ۳-۱۱ تأثیرات ضریب نفوذ اصلاح شده (N_{bt}) را بر روی عدد ناسلت و توزیع کسر حجمی بیان می‌کند. نسبت نفوذ اصلاح شده دارای مقادیر 0.05 و 0.5 است و عدد اشمیت و لوئیس مقدار ثابت 100

را دارند. شکل ۳-۱۱ الف توزیع کسر حجمی را با تغییرات نسبت نفوذ اصلاح شده نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً اشاره شد با توجه به اینکه دیواره بالاترین دما را دارد، بنابراین ذرات از دیواره به سمت مرکز کانال مهاجرت می‌کنند، به عبارت دیگر در ضریب نفوذ براونی ثابت، یا اعداد اشمیت و لوئیس ثابت، افزایش ضریب ترموفورز منجر به افزایش مهاجرت به مرکز کانال می‌شوند.

شکل ۳-۱۱ ب عدد ناسلت محلی را درون کانال متخلخل برای مقادیر مختلف نسبت نفوذ اصلاح شده برای حالت دوفازی و به شکل مقایسه‌ای با حالت تکفازی نمایش می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند وقتی عدد لوئیس و عدد اشمیت مقادیر بزرگی نیستند، عدد ناسلت محلی و توزیع دما با تغییرات نسبت نفوذ اصلاح شده تغییرات محسوسی می‌کنند. همچنین اثرات نفوذ براونی و ترموفورز بر افزایش عدد ناسلت محلی در روش دوفازی نسبت به روش تکفازی قابل مشاهده است. با افزایش نسبت نفوذ اصلاح شده توزیع کسر حجمی به توزیع یکنواخت (حالت تکفاز) و عدد ناسلت حالت تکفاز نزدیک می‌شود.



(الف)



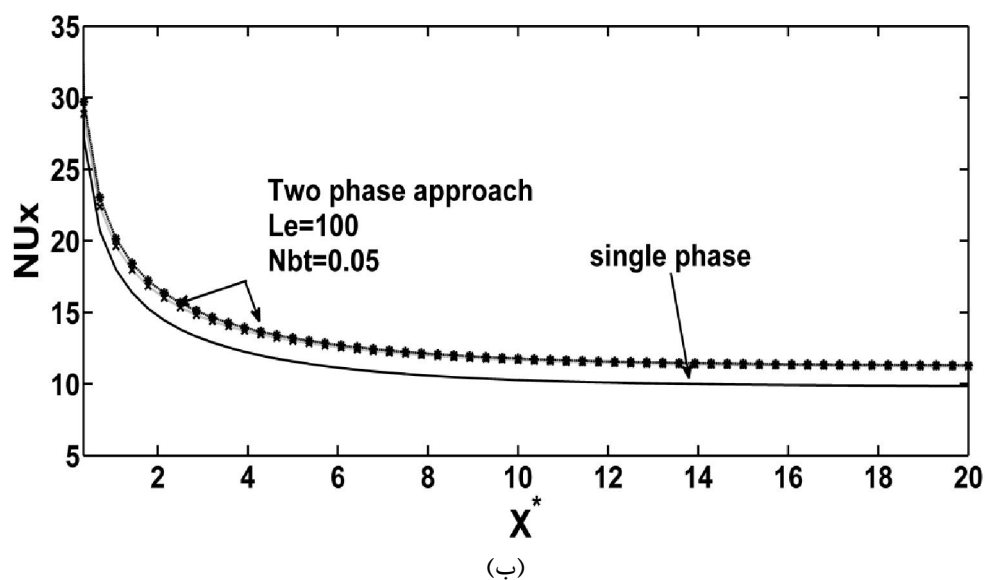
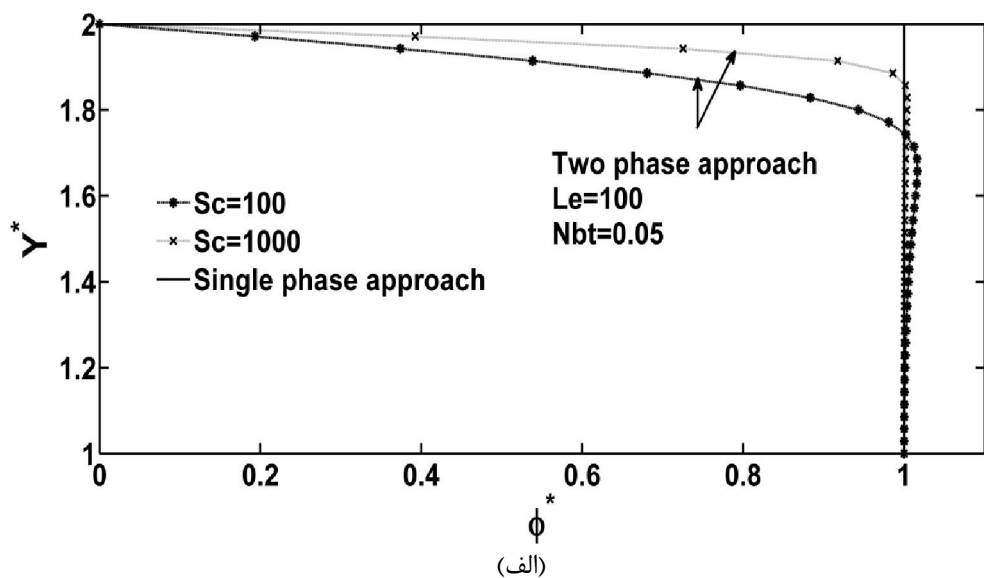
(ب)

شکل ۳-۱۱: الف) کسر حجمی بی‌بعد نانوذرات در مقطع خروجی در مقادیر مختلف نسبت نفوذ اصلاح شده، ب) عدد ناسلت محلی در حالت‌های دوفازی و تکفازی [۷۸]

شکل ۳-۱۲ اثرات تغییر عدد اشمیت را بر روی توزیع کسر حجمی و انتقال حرارت نشان می‌دهد. نسبت نفوذ اصلاح شده و عدد لوئیس به ترتیب دارای مقادیر ۰/۰۵ و ۱۰۰ می‌باشند. وقتی عدد اشمیت افزایش

می‌یابد سمت راست معادله (۷-۲) کاهش یافته و در نتیجه تأثیرات حرکت براونی و ترموفورز کم‌رنگ می‌شود.

همانطور که در شکل ۳-۱۲ الف قابل ملاحظه است، با افزایش عدد اشمیت، جمله جابجایی جمله غالب می‌شود و توزیع کسر حجمی شباهت بیشتری را با توزیع کسر حجمی در حالت تکفازی (توزیع ثابت) دارد.



شکل ۳-۱۲: الف) توزیع کسر حجمی در مقطع خروجی در اعداد اشمیت مختلف، ب) عدد ناسلت محلی به ازای عدد اشمیت در حالت‌های دوفازی و تکفازی [۷۸]

شکل ۳-۱۲ ب) توزیع عدد ناسلت محلی را به ازای مقادیر مختلف عدد اشمیت نشان می‌دهند. با توجه به توضیحات مربوط به توزیع کسر حجمی و اینکه با افزایش عدد اشمیت توزیع کسر حجمی به توزیع همگن نزدیک می‌شود، در نتیجه جمله مربوط به نفوذ براونی بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. بنابراین شکل ۳-۱۲ ب) به روشنی اثرات ترموفورز را بر روی انتقال حرارت نشان می‌دهد.

۳-۲- عدم تعادل حرارتی

۳-۲-۱- ارائه ۴ مدل برای محاسبه شار حرارتی [۷۹]:

چالشی که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته این است که وقتی نانوسیال درون محیط متخلخل جریان دارد و دیواره‌ها دارای دمای ثابت هستند و عدم تعادل حرارتی بین فازها برقرار است، نحوه محاسبه شار کلی چگونه است؟

برای سیال پایه جریان یافته درون محیط متخلخل و در شرایط عدم تعادل حرارتی مدل‌هایی توسط العزمی و وفایی [۸۰] برای محاسبه شار ارائه شده است. در این رساله با الهام گرفتن از مقاله العزمی و وفایی [۸۰]، چهار مدل برای محاسبه شار حرارتی نانوسیالات درون محیط متخلخل و در حالت عدم تعادل حرارتی پیشنهاد شده است:

✓ مدل اول:

در این مدل گرادیان دمای هر کدام از فازها نزدیک دیواره به همراه ضریب انتقال حرارتی و حجمی که توسط هر کدام از فازها اشغال شده است شار حرارتی هر فاز را به دست می‌دهد که مجموع آنها شار حرارتی کل خواهد بود.

$$q'' = \varepsilon(1 - \phi)k_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)_{wall} + \varepsilon(\phi)k_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial y} \right)_{wall} + (1 - \varepsilon)k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_{wall} \quad (۱-۳)$$
$$\& T_w = T_f = T_p = T_s$$

شار حرارتی بدون بعد نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q^* = \frac{q''}{k_f \frac{(T_1 - T_0)}{H}} \quad (۲-۳)$$

$$Q_{m.1}^* = \varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0) \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \right)_{wall} + \varepsilon(\varphi^* \varphi_0) \frac{k_p}{k_f} \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \right)_{wall} + (1 - \varepsilon) \frac{k_s}{k_f} \left(\frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (۳-۳)$$

که در آن شار حرارتی بدون بعد هر کدام از فازها به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q_f^* = \varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0) \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (۴-۳)$$

$$Q_p^* = \varepsilon(\varphi^* \varphi_0) \frac{k_p}{k_f} \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (۵-۳)$$

$$Q_s^* = (1 - \varepsilon) \frac{k_s}{k_f} \left(\frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (۶-۳)$$

✓ مدل دوم:

در این مدل شار حرارتی از مجموع حاصل ضرب ضریب انتقال حرارت هدایتی در حجم اشغال شده توسط هر کدام از فازها در گرادیان دمای جامد نزدیک دیواره به دست می آید:

$$q'' = (\varepsilon(1 - \varphi)k_f + \varepsilon(\varphi)k_p + (1 - \varepsilon)k_s) \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_{wall} \quad \& T_w = T_f = T_p = T_s \quad (۷-۳)$$

شار حرارتی کلی بدون بعد نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q_{m.2}^* = \left(\varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0) + \varepsilon(\varphi^* \varphi_0) \frac{k_p}{k_f} + (1 - \varepsilon) \frac{k_s}{k_f} \right) \left(\frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (۸-۳)$$

✓ مدل سوم:

در این مدل مجموع ضریب انتقال حرارت هدایتی و حجم اشغال شده توسط هر کدام از فازها در گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره ضرب می‌شود:

$$q'' = (\varepsilon(1-\varphi)k_f + \varepsilon(\varphi)k_p + (1-\varepsilon)k_s) \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)_{wall} \quad \& T_w = T_f = T_p = T_s \quad (9-3)$$

$$Q_{m.3}^* = \left(\varepsilon(1-\varphi^*\varphi_0) + \varepsilon(\varphi^*\varphi_0) \frac{k_p}{k_f} + (1-\varepsilon) \frac{k_s}{k_f} \right) \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (10-3)$$

✓ مدل چهارم:

در این مدل مجموع ضریب انتقال حرارت هدایتی و حجم اشغال شده توسط هر کدام از فازها در گرادیان دمای نانوذره نزدیک دیواره ضرب می‌شود:

$$q'' = (\varepsilon(1-\varphi)k_f + \varepsilon(\varphi)k_p + (1-\varepsilon)k_s) \left(\frac{\partial T_p}{\partial y} \right)_{wall} \quad \& T_w = T_f = T_p = T_s \quad (11-3)$$

$$Q_{m.4}^* = \left(\varepsilon(1-\varphi^*\varphi_0) + \varepsilon(\varphi^*\varphi_0) \frac{k_p}{k_f} + (1-\varepsilon) \frac{k_s}{k_f} \right) \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (12-3)$$

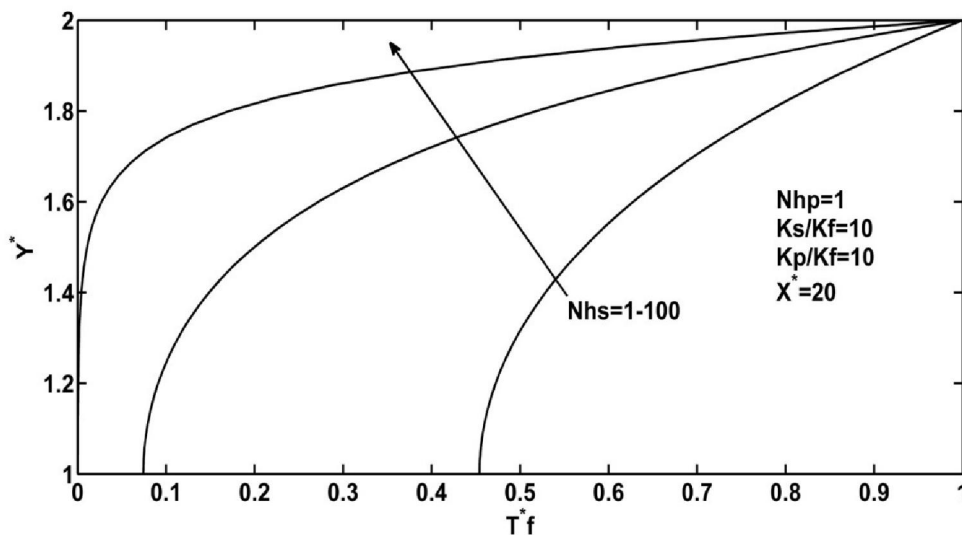
در مدل‌های فوق پیشنهاد می‌شود مقدار φ^* از متوسط‌گیری در مقاطع عرضی محاسبه شود.

۳-۲-۲- بررسی تأثیرات عدد نیلد:

در این قسمت، نتایج عددی حاصل از حل معادلات حاکم در حالت عدم تعادل حرارتی مربوط به مقادیر زیر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که اعداد زیر با استفاده از مقادیر پیشنهادی در مقاله بونگیورنو [۴۰] و مقالات نیلد و کوزنتسو [۶۰-۶۳] آورده شده است.

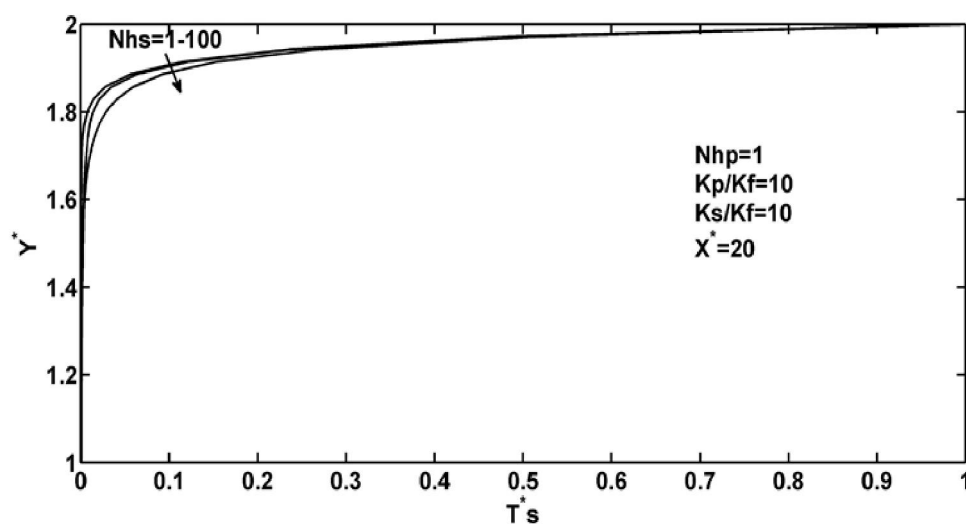
$$\varphi_0 = 0.05, N_{bt} = 0.1, Le = 100, \gamma_p = 10, \gamma_s = 10, Pe = 100, Da = 1/500, \tau = 1, \frac{1}{Da} \frac{dP^*}{dx^*} = -2 \quad (13-3)$$

نتایج، تأثیرات N_{hp} و N_{hs} را بر روی توزیع دما و شار حرارتی بدون بعد نشان می‌دهد. پارامتر انتقال حرارت سیال/نانوذره (N_{hp}) و سیال/جسم جامد (N_{hs}) در بازه ۱ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند و همچنین داریم: $\varepsilon_p = 10$ و $\varepsilon_s = 10$. شکل ۱۳-۳ تأثیر N_{hs} را بر روی توزیع دمای سیال نشان می‌دهد. با افزایش N_{hs} دمای متوسط سیال کاهش می‌یابد ولی گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره افزایش می‌یابد. معادلات انرژی برای فازهای جامد و نانوذرات به ازای $\gamma_p = \gamma_s$ و $\varepsilon_p = \varepsilon_s$ و در شرایط پایدار مقادیر یکسانی را برای جامد و ذره به دست می‌دهد و بنابراین توزیع دمای سیال به ازای تغییرات N_{hp} نیز مانند شکل زیر است:



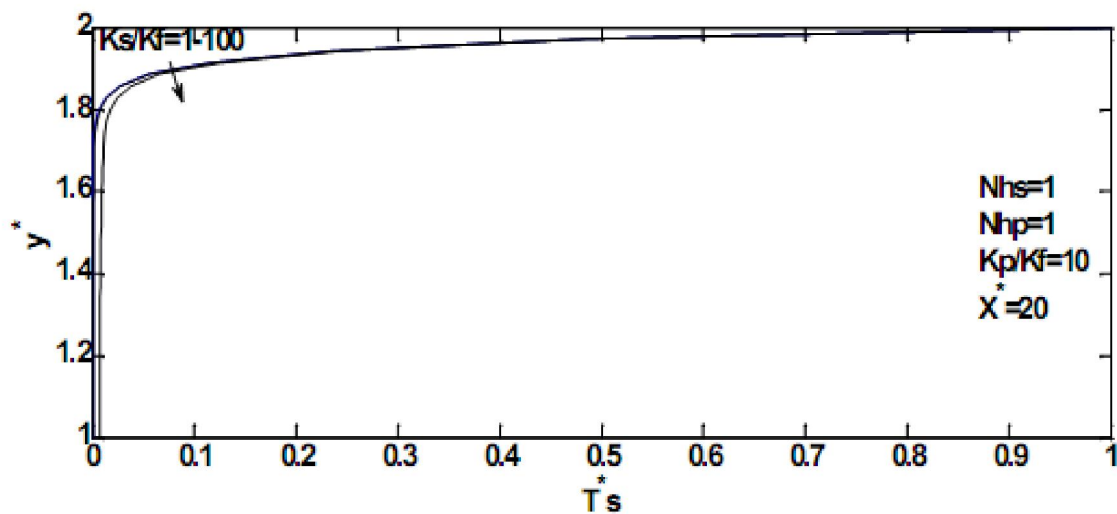
شکل ۱۳-۳: توزیع دمای سیال به ازای مقادیر مختلف N_{hs} [۸۱]

شکل ۱۴-۳ تغییرات توزیع دمای جامد را با تغییرات N_{hs} نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است تغییرات N_{hs} تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی توزیع دمای جامد ندارد.



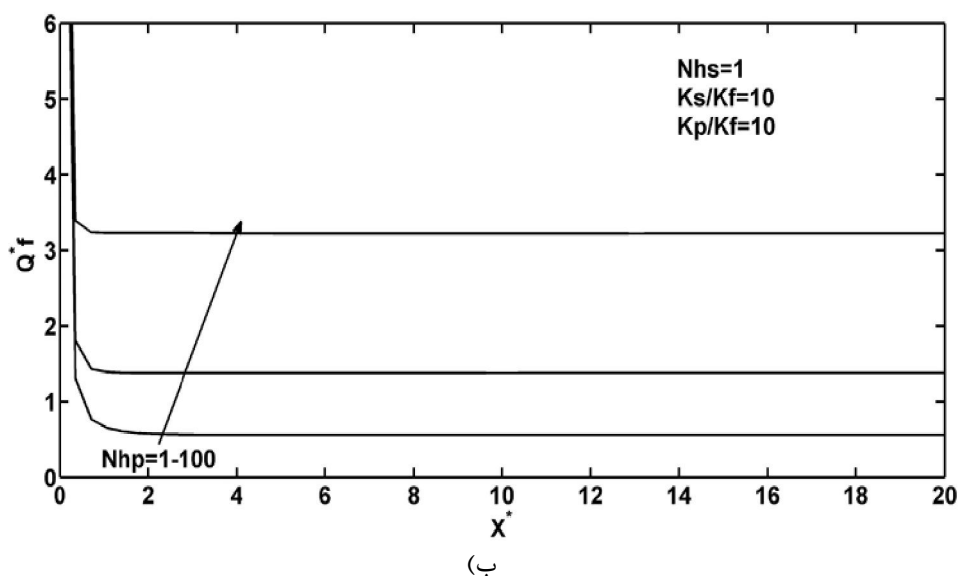
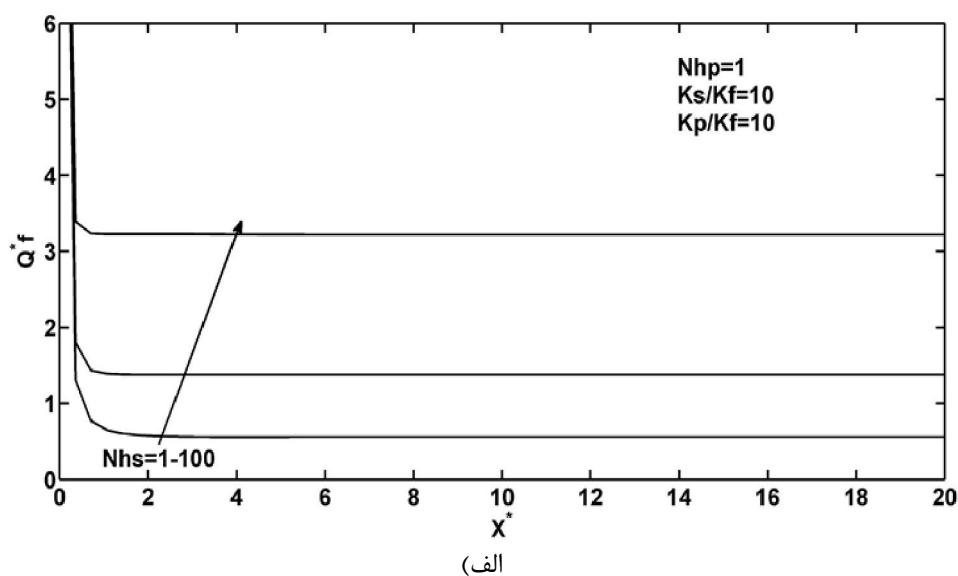
شکل ۳-۱۴: توزیع دمای جامد به ازای مقادیر مختلف N_{hs} [۸۱]

شکل ۳-۱۵ تاثیرات نسبت پارامتر هدایتی را بر روی توزیع دمای جامد در محیط متخلخل نشان می‌دهد. مقدار ε_s در بازه ۱ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند و نتایج به ازای $N_{hs} = N_{hp} = 1$ و $\varepsilon_s = 10$ گزارش شده‌اند. شکل زیر بیانگر افزایش دمای جامد به ازای افزایش ε_s است، ولی تغییرات، به ازای تغییرات ε_s در بازه ۱ تا ۱۰۰ اندک است.



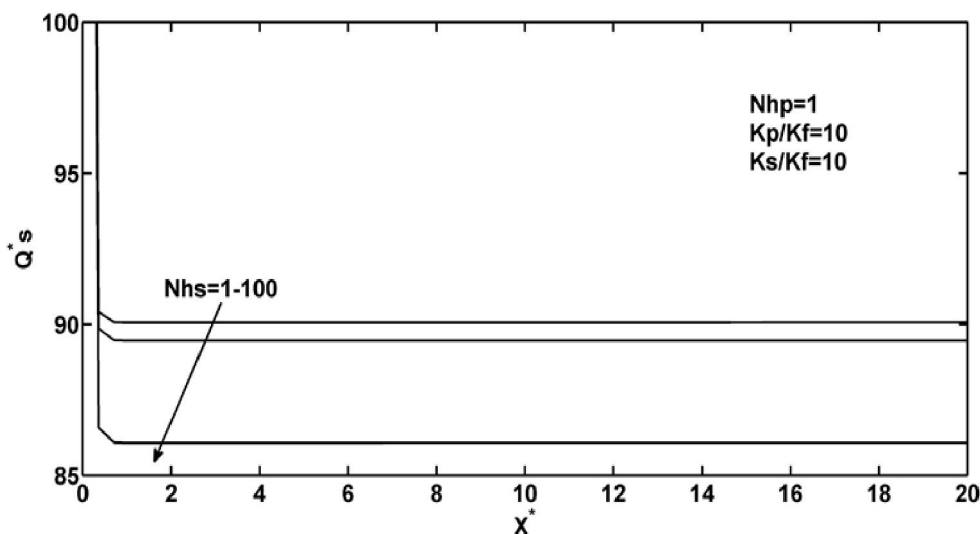
شکل ۳-۱۵: توزیع دمای جامد به ازای مقادیر مختلف نسبت ضریب هدایت [۷۹]

شکل ۳-۱۷ افزایش شار حرارتی بدون بعد جذب شده توسط سیال را با افزایش N_{hs} و N_{hp} نشان می‌دهد. طبق معادله (۳-۴) شار حرارتی سیال، متأثر از گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره و مقدار کسر حجمی نانوسیال در مرکز کانال است و جمله اول، جمله غالب است.



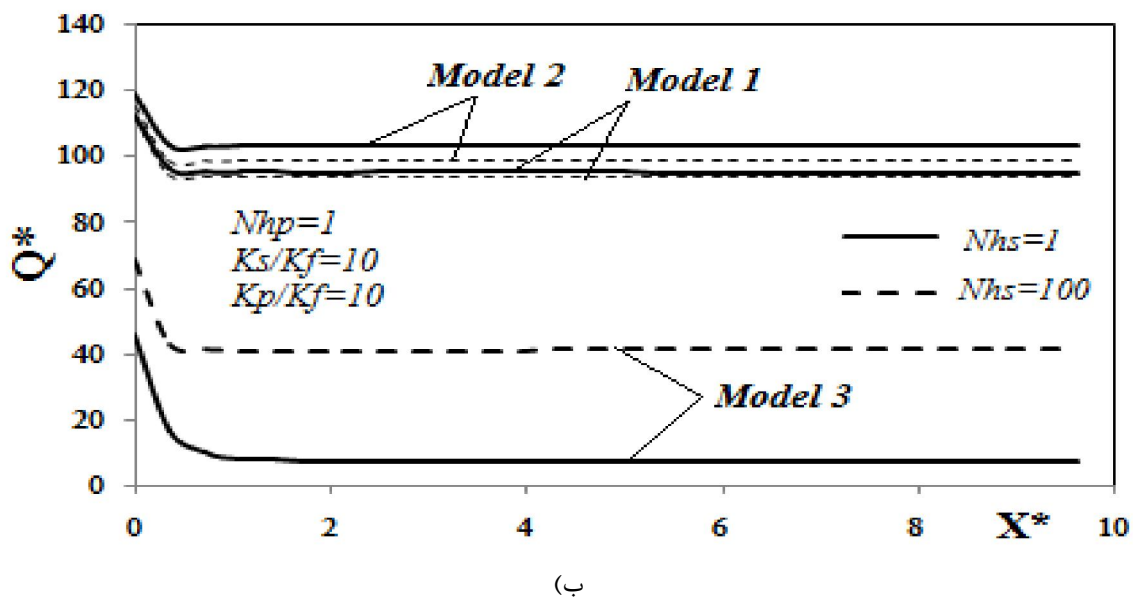
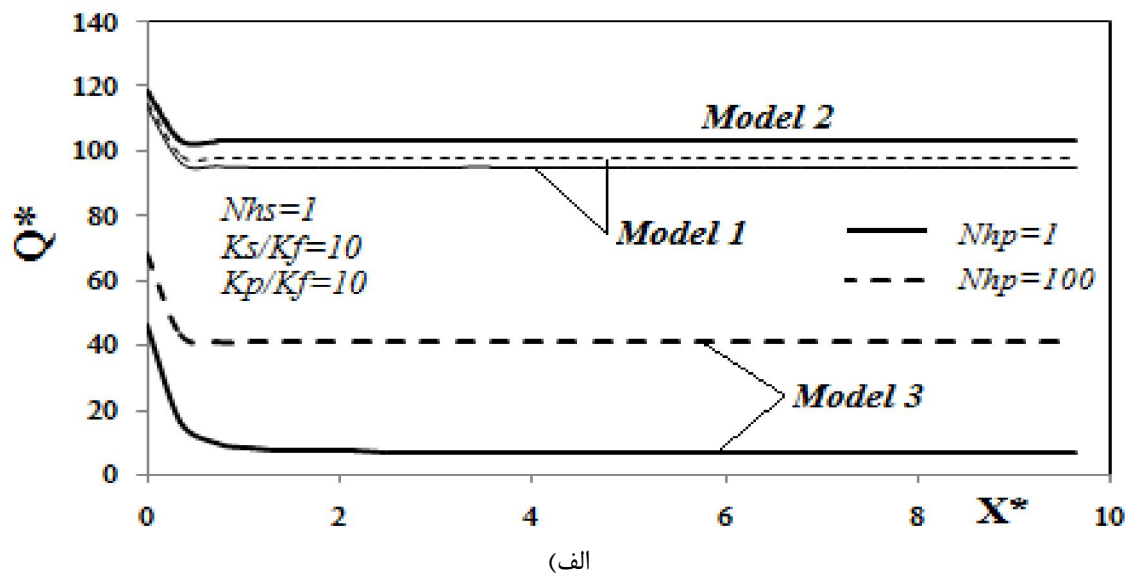
شکل ۳-۱۶: شار حرارتی بدون بعد سیال به ازای مقادیر مختلف: الف) N_{hs} و ب) N_{hp} [۸۱]

شکل ۳-۱۷ الف کاهش شار حرارتی جامد را با افزایش N_{hs} و بخاطر کاهش گرادیان دمای جامد نزدیک دیواره نشان می‌دهد. نتایج نشان داد شار حرارتی نانوذر با افزایش N_{hp} کاهش بسیار کمی دارد. با افزایش N_{hp} ، گرادیان دمای ذره نزدیک دیواره و شار حرارتی ذره کاهش می‌یابد. شار حرارتی جذب شده توسط ذره نیز مانند شار حرارتی سیال طبق معادله (۳-۵) متأثر از گرادیان دمای ذره نزدیک دیواره و کسر حجمی است. جمله اول، جمله غالب برای محاسبه شار حرارتی ذره است. تغییرات شار نانوذر بسیار اندک است و تغییرات محسوسی ندارد.



شکل ۳-۱۷: شار حرارتی بدون بعد جامد-نانوذر به ازای مقادیر مختلف N_{hs} [۸۱]

در ادامه تغییرات شار حرارتی کل بدون بعد را به ازای تغییرات اعداد نیلد برای مدل‌های معرفی شده در این رساله بررسی می‌کنیم. با توجه به مفروضات ($\gamma_s = \gamma_p$ و $\varepsilon_s = \varepsilon_p$) و اینکه توزیع دمایی یکسان و مشابهی برای جسم جامد و نانوذر مشاهده می‌شود، بنابراین برای این مقادیر خاص مدل‌های دوم و چهارم نتایج کاملاً یکسانی را نتیجه می‌دهند. شکل ۳-۱۸ تغییرات شار حرارتی کل را به ازای تغییرات اعداد نیلد نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۸: تغییرات شار حرارتی با تغییرات اعداد نیلد الف) N_{hp} ب) N_{hs} [۷۹]

شکل ۳-۱۸-الف نشان می‌دهد که شار حرارتی منتج از مدل اول ($Q_{m,1}^*$) با افزایش N_{hp} افزایش می‌یابد. همانطور که از مدل اول مشخص است $Q_{m,1}^*$ از گرادیان دمایی سیال، جامد و نانوذره نزدیک دیواره تأثیر می‌پذیرد. گرادیان دمایی جامد با تغییرات N_{hp} تغییر محسوسی نمی‌کند ولی گرادیان دمایی سیال و

نانوذره با تغییرات N_{hp} تغییر می‌کنند. همانطور که از شکل مشخص است $Q_{m,2}^*$ با تغییرات N_{hp} تغییر محسوسی نمی‌کند زیرا $Q_{m,2}^*$ تنها متأثر از تغییرات گرادیان دمای جامد است و با توجه به اینکه گرادیان دمای جامد نزدیک دیواره با N_{hp} تغییر نمی‌کند بنابراین $Q_{m,2}^*$ نیز با تغییرات N_{hp} غیر محسوسی نخواهد کرد. با افزایش N_{hp} ، گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره افزایش می‌یابد بنابراین $Q_{m,3}^*$ نیز افزایش می‌یابد. شار حرارتی منتج از مدل دوم بیشترین مقدار را نسبت به دو مدل دیگر دارد. با توجه به اینکه شار حرارتی منتج از مدل سوم متأثر از گرادیان دمای سیال است و گرادیان دمای سیال نسبت به گرادیان دمای جامد و نانوذره مقدار کمتری دارد بنابراین شار حرارتی منتج از مدل سوم کمینه مقدار را دارد.

شکل ۳-۱۸-ب تغییرات شار حرارتی را با تغییرات N_{hs} نشان می‌دهد. با توجه به شکل در مدل دوم با تغییرات N_{hs} گرادیان دمای جامد کاهش یافته بنابراین $Q_{m,2}^*$ کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش N_{hs} ، Q_s^* کاهش می‌یابد و همانطور که بحث شد جمله مربوط به گرادیان مربوط به شار حرارتی جامد جمله غالب مدل اول است، بنابراین افزایش N_{hs} کاهش $Q_{m,1}^*$ را نتیجه می‌دهد.

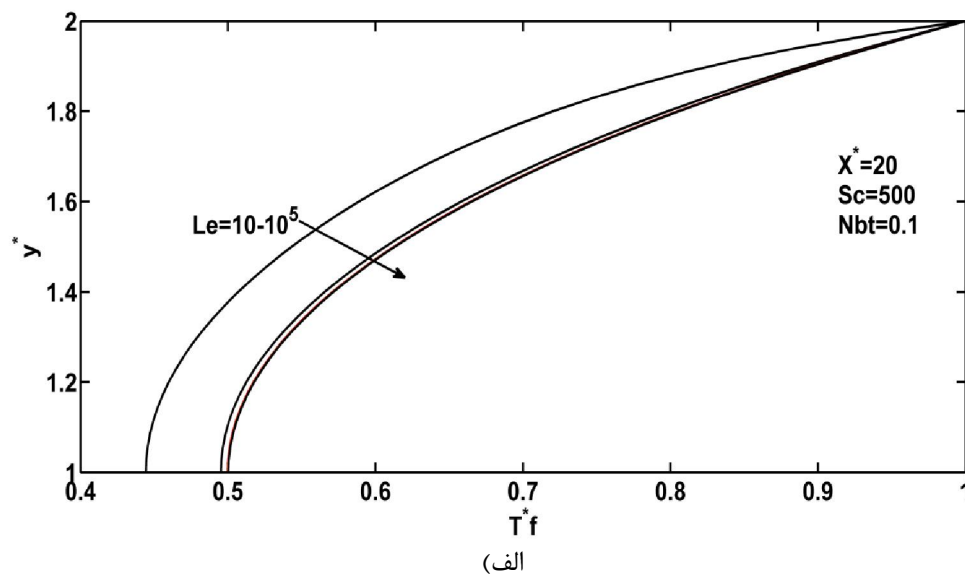
۳-۲-۳- تأثیرات مهاجرت نانوذرات:

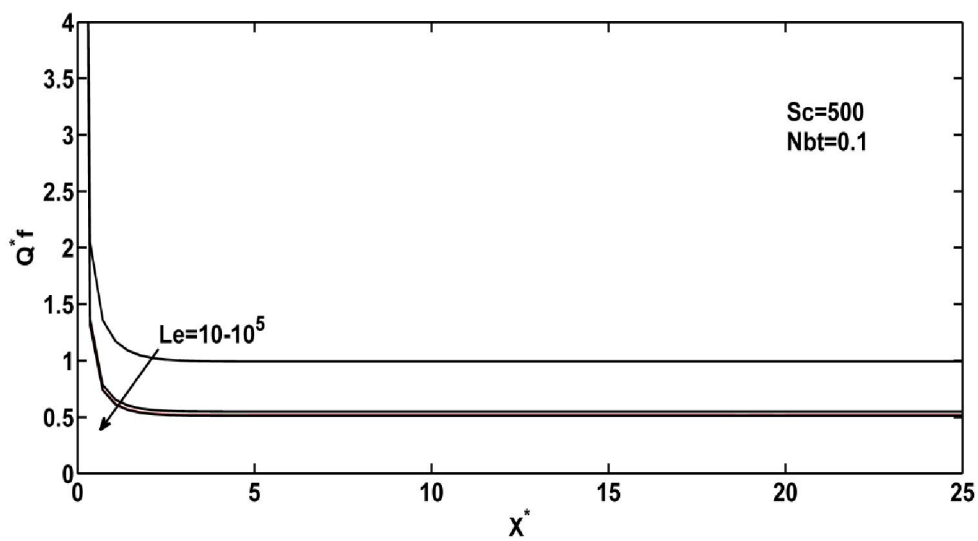
در این قسمت، نتایج عددی حاصل از حل معادلات حاکم در حالت عدم تعادل حرارتی مربوط به مقادیر زیر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد:

$$\varphi_0 = 0.03, \gamma_p = 10, \gamma_s = 10, \text{Pr} = 1, \text{Re} = 150, \text{Da} = 1/500, \tau = 1, \frac{1}{\text{Da}} \frac{dP^*}{dx^*} = -2, \varepsilon_s = 1000, \varepsilon_p = 1000 \quad (۳-۱۴)$$

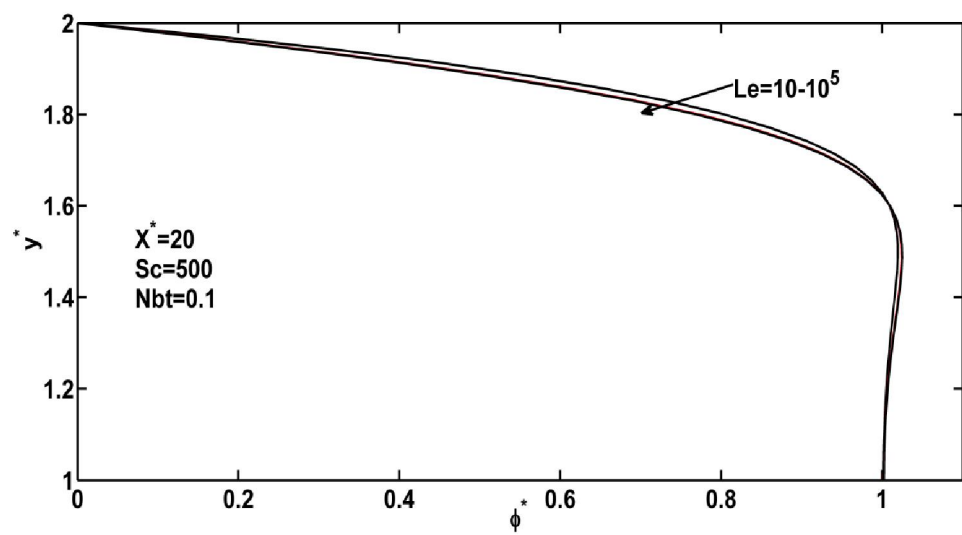
شکل ۳-۱۹ اثرات عدد لوئیس را بر روی شار حرارتی سیال، جامد و نانوذره نشان می‌دهد. این شکل همچنین اثرات عدد لوئیس را بر روی توزیع دما و توزیع کسر حجمی نشان می‌دهد. عدد لوئیس در بازه اعداد ۱۰ تا 10^5 تغییر می‌کند و نتایج برای اعداد ثابت $N_{bt} = 0/1$ و $Sc = 500$ به دست آمده‌اند.

همانطور که شکل ۳-۱۹-الف نشان می‌دهد با افزایش عدد لوئیس گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره برای سیال کاهش می‌یابد بنابراین شار حرارتی بدون بعد سیال نیز با افزایش عدد لوئیس کاهش می‌یابد. این نتیجه در شکل ۳-۱۹-ب به خوبی نشان داده شده است. شکل ۳-۱۹-ج توزیع کسر حجمی را با تغییرات عدد لوئیس نشان می‌دهد. توزیع کسر حجمی تأثیرات محسوسی نسبت به تغییرات عدد لوئیس بزرگ ندارد. به طور کلی در اعداد لوئیس بزرگ ذرات به سمت مرکز کانال مهاجرت می‌کنند.





(ب)

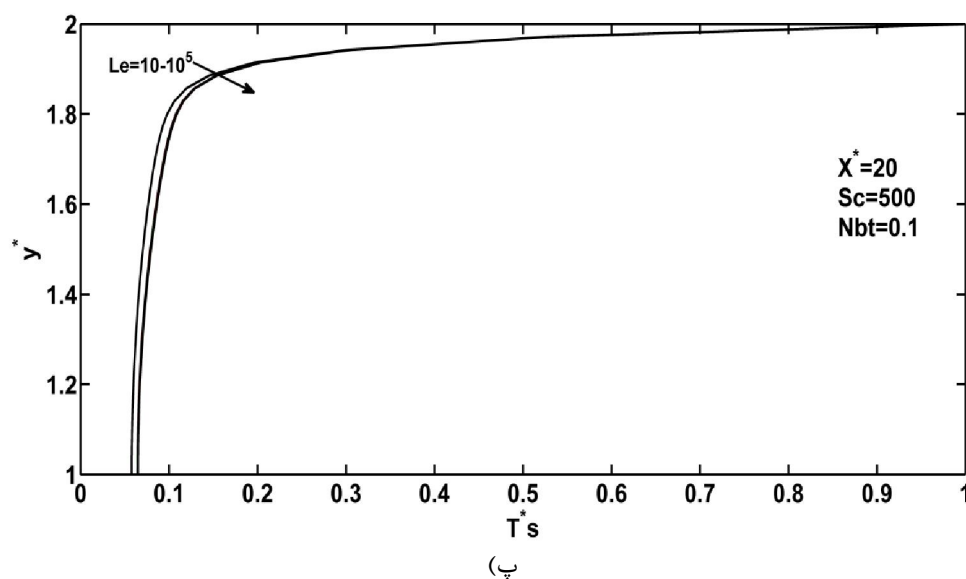


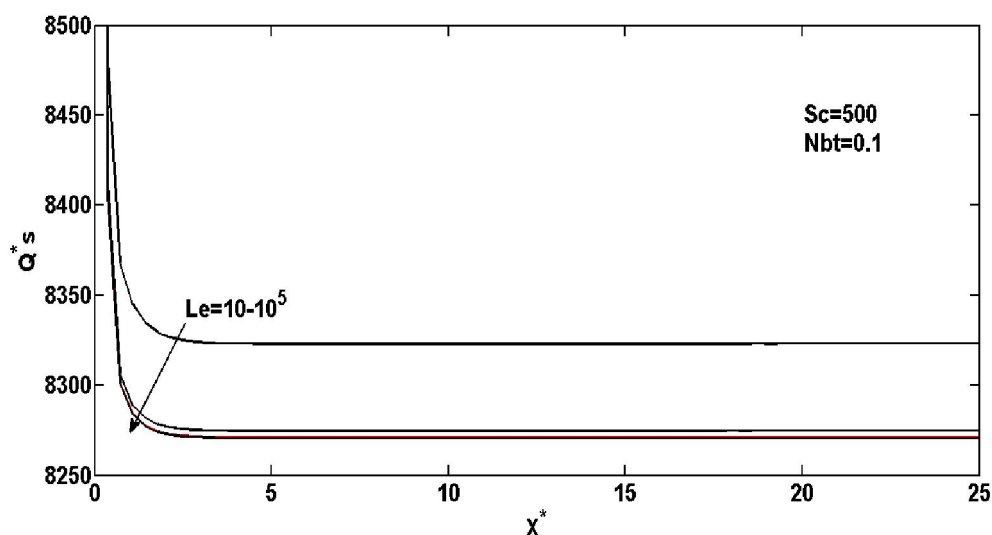
(ج)

شکل ۳-۱۹: الف) تغییرات توزیع دمای سیال - ب) تغییرات شار حرارتی سیال - ج) تغییرات توزیع کسر حجمی با تغییر عدد

لوئیس [۸۲]

شکل ۳-۱۹ د شار حرارتی جامد را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳-۱۹ پ نشان داده شده است با افزایش عدد لوئیس گرادیان دمای جامد (نانوذره) نزدیک دیواره کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه شار حرارتی جامد فقط متأثر از گرادیان دماست شار حرارتی جامد کاهش می‌یابد. شار حرارتی نانوذره متأثر از گرادیان دما و کسر حجمی نانوذره است و جمله اول با افزایش عدد لوئیس کاهش محسوسی دارد و جمله دوم تغییر محسوسی ندارد بنابراین شار حرارتی نانوذره نیز کاهش می‌یابد. در کل کاهش شار حرارتی نانوذره بسیار اندک است و تغییر محسوسی ندارد.

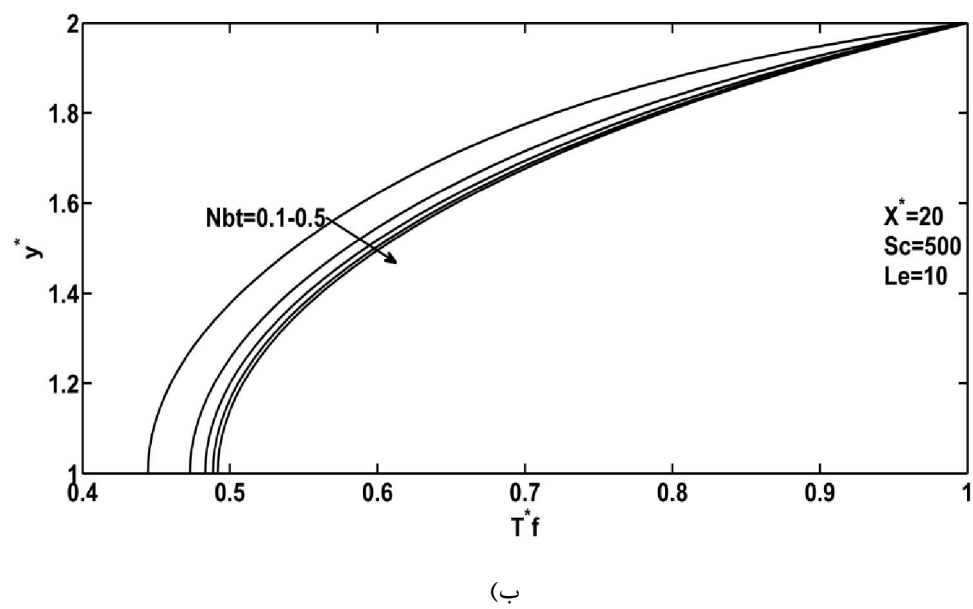
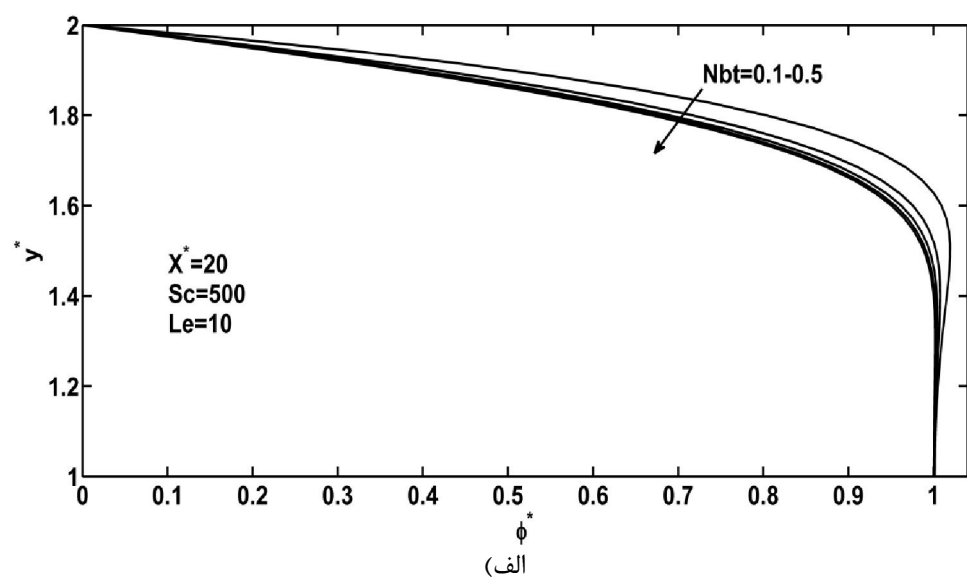


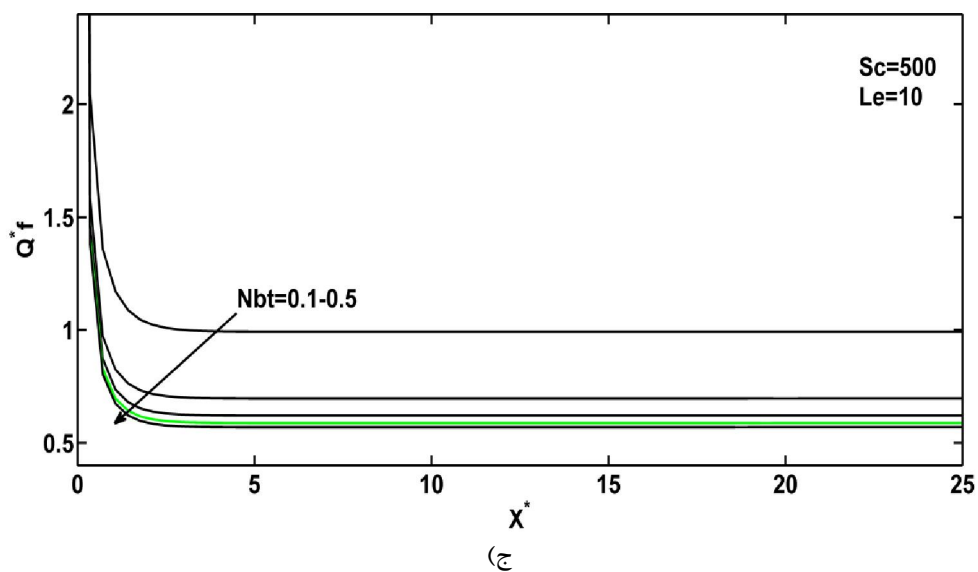


(د)

شکل ۳-۱۹: پ) تغییرات توزیع دمای جامد (د) تغییرات شار حرارتی جامد [۸۲]

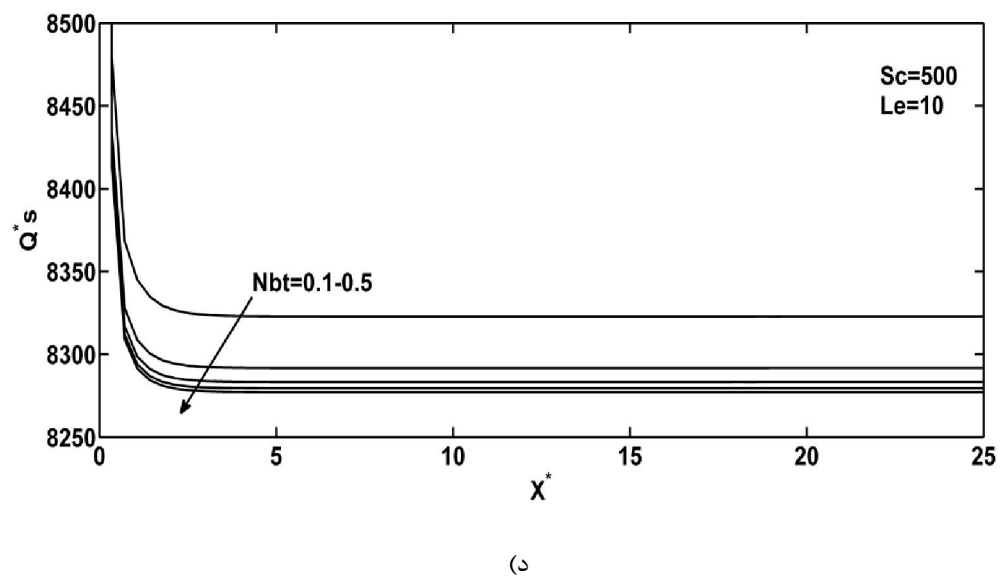
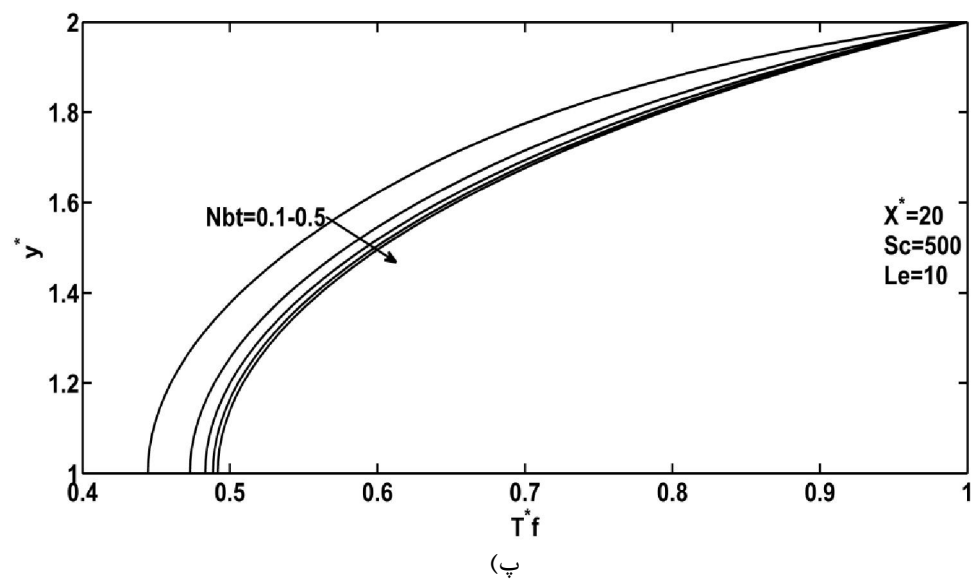
شکل ۳-۲۰ اثرات N_{bt} را بر روی توزیع دما و کسر حجمی و شار حرارتی فازها نشان می‌دهد. عدد N_{bt} در بازه $[0.1/5.0]$ تغییر می‌کند و اعداد اشمیت و لوئیس به ترتیب دارای مقادیر ثابت ۵۰۰ و ۱۰ هستند. شکل ۳-۲۰ الف تغییرات توزیع کسر حجمی را با تغییرات N_{bt} نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است دیواره دارای بالاترین دماست و ذرات نزدیک دیواره به سمت مرکز کانال مهاجرت می‌کنند. بررسی علل تغییرات کسر حجمی با N_{bt} در قسمت تعادل حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۳-۲۰ ب تغییرات دمای سیال را با تغییر N_{bt} نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش N_{bt} ، متوسط دمای سیال افزایش و گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره در یک مقطع مشخص کاهش می‌یابد و بنابراین همانطور که در شکل ۳-۲۰ ج نشان داده شده است شار حرارتی سیال نیز با افزایش N_{bt} کاهش می‌یابد.

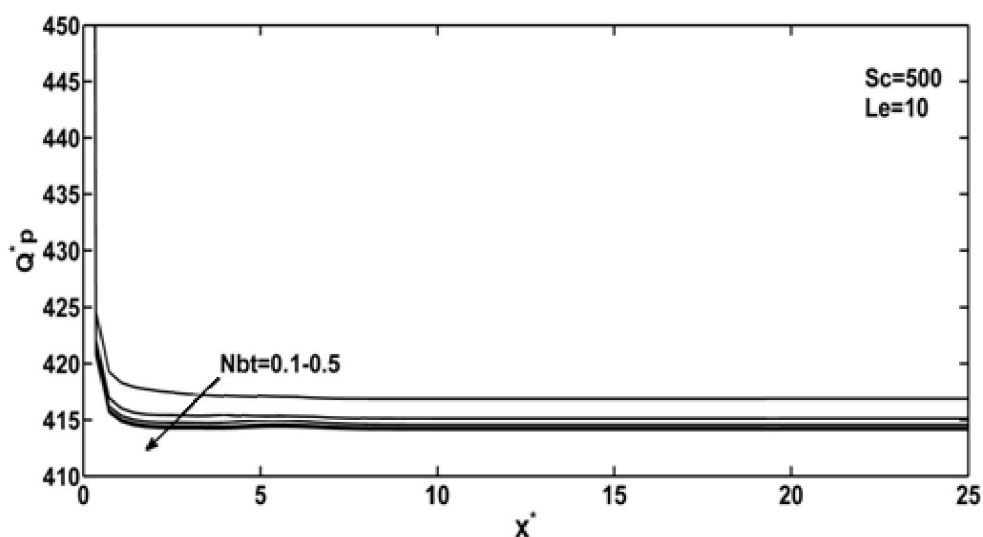




شکل ۳-۲۰: الف) تغییرات توزیع کسر حجمی ب) تغییرات توزیع دمای سیال ج) تغییرات شار حرارتی سیال با تغییر عدد N_{bt} [۸۲]

شکل ۳-۲۰ پ تغییرات دمای جامد را با تغییرات N_{bt} نشان می‌دهد و همانطور که از شکل مشخص است با افزایش N_{bt} مقدار توزیع دما کاهش و گرادیان دمای جامد نزدیک دیواره افزایش می‌یابد و بنابراین شار حرارتی جامد و نانوذره کاهش می‌یابد. شکل‌های ۳-۲۰ د و ۳-۲۰ ح این تغییرات را نشان می‌دهند.

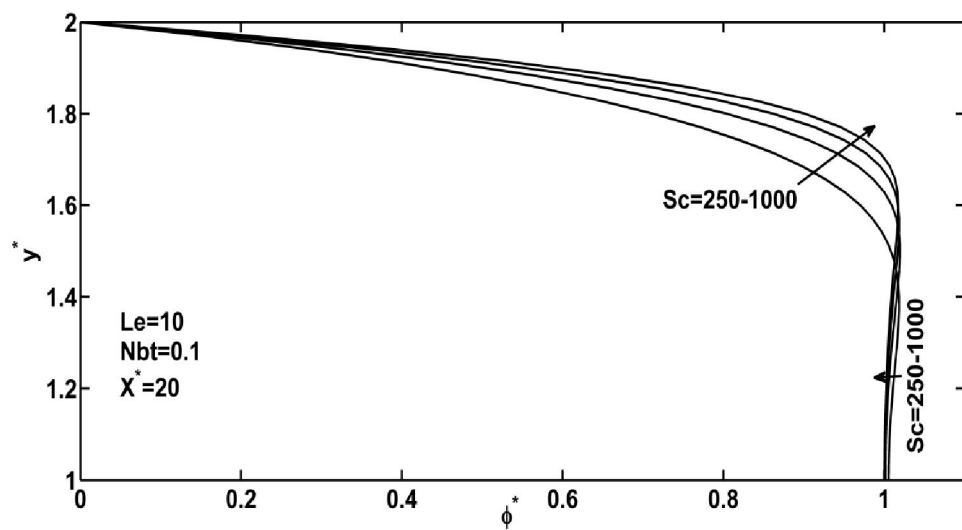




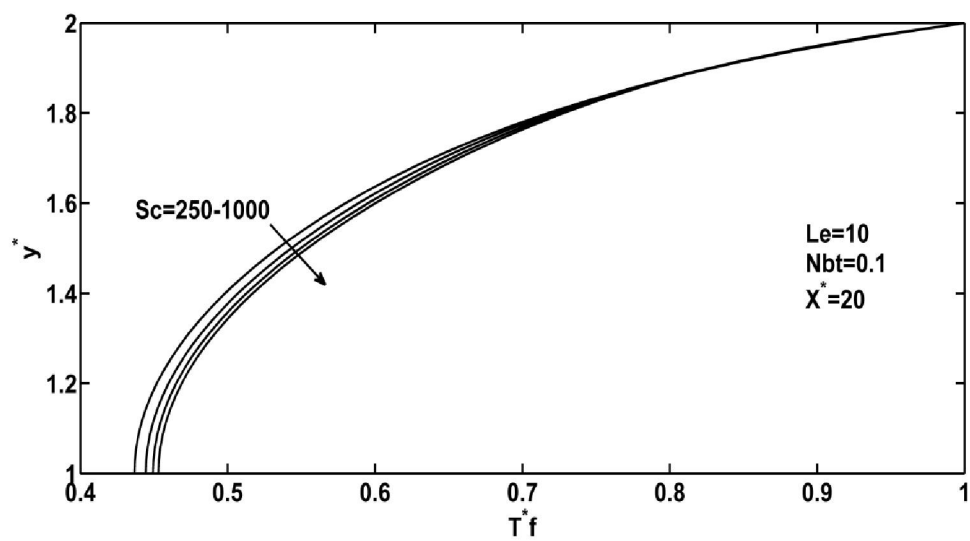
(ح)

شکل ۳-۲۰: پ) تغییرات توزیع دمای جامد. د) تغییرات شار حرارتی جامد. ح) تغییرات شار حرارتی نانوذره با تغییر عدد N_{bt} [۸۲]

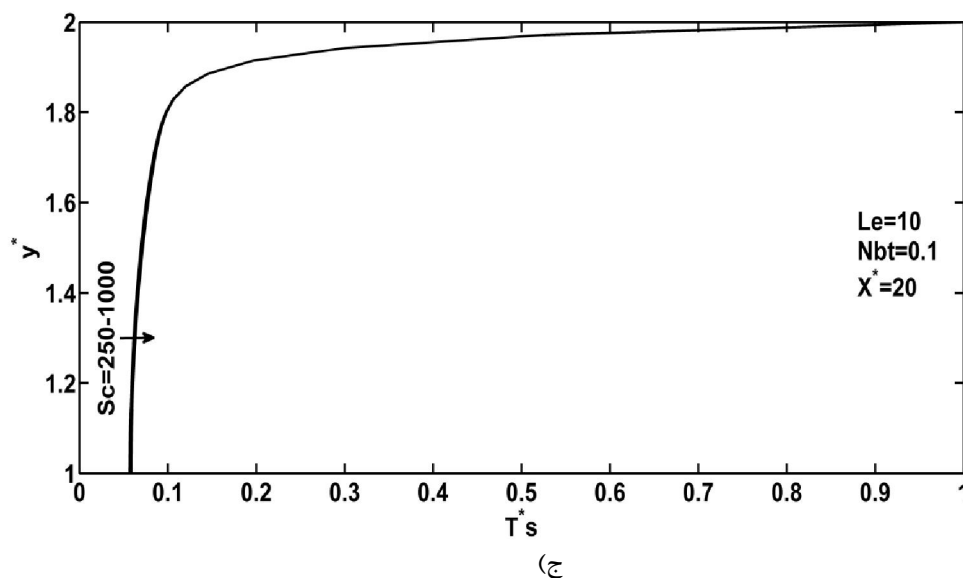
شکل ۳-۲۱ تغییرات توزیع کسر حجمی و توزیع دمای سیال و جامد را با تغییرات عدد اشمیت نشان می‌دهد. عدد اشمیت در بازه ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ تغییر می‌کند و اعداد N_{bt} و لوئیس به ترتیب مقادیر ثابت ۰/۱ و ۱۰ را دارند. وقتی عدد اشمیت افزایش می‌یابد سمت راست معادله (۲-۶) کاهش می‌یابد و توزیع کسر حجمی به توزیع کسر حجمی در ورودی کانال نزدیک می‌شود و اثرات مهاجرت نانوذره کاهش می‌یابد؛ شکل ۳-۲۱-الف این تغییرات را نشان می‌دهد. شکل ۳-۲۱-ب و ۳-۲۱-ج تغییرات دمای سیال و جامد را با تغییرات عدد اشمیت نشان می‌دهد. شار حرارتی جامد، سیال و نانوذره با تغییرات عدد اشمیت تغییرات محسوسی ندارد.



(الف)



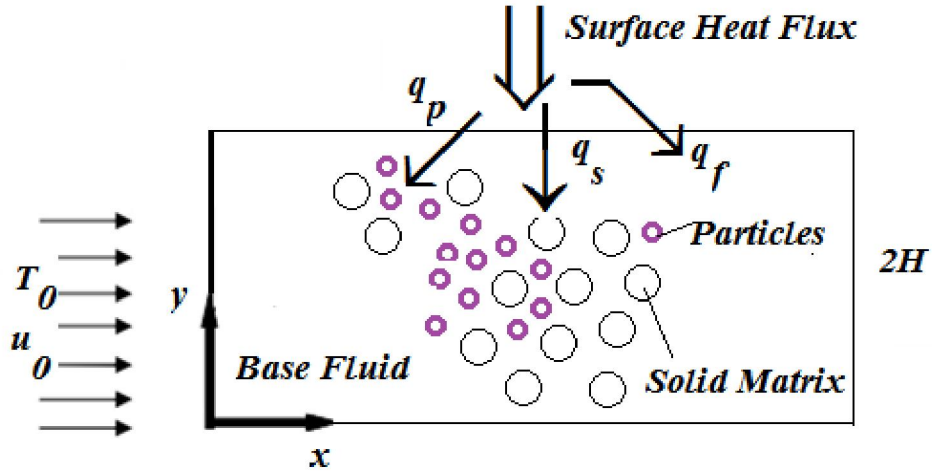
(ب)



شکل ۳-۲: الف) تغییرات توزیع کسر حجمی - ب) تغییرات توزیع دمای سیال - ج) تغییرات توزیع دمای جامد با تغییر عدد اشمیت [۸۲]

۳-۲-۴- پیشنهاد سه مدل برای محاسبه شار جذب شده توسط فازها [۸۳]:

در بررسی انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل با شرط عدم تعادل حرارتی و با شار ثابت روی دیواره‌ها مسئله‌ای که تا کنون بررسی نشده این است که: شرایط مرزی هر یک از فازها برای محاسبه توزیع دما چگونه تعیین می‌شود؟ در این بخش از رساله برای محاسبه شار حرارتی جذب شده توسط سیال، نانوذره و جامد در شرایط مرزی شار ثابت سه مدل ارائه می‌کنیم. در این مدل‌ها سهم شار حرارتی هر کدام از فازها از شار حرارتی دیواره پیشنهاد و مشخص می‌شود. به عبارت دیگر هدف این بخش رساله معرفی حالات مختلف برای شرایط مرزی دیواره برای سیال، جامد و نانوذره برای مدلسازی انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل در حالت عدم تعادل حرارتی و شار ثابت دیواره است. شکل ۳-۲ بیانگر مفاهیم فوق است.



شکل ۳-۲۲: توزیع شار حرارتی دیواره به سیال پایه، نانوذره و جسم جامد.

در بخش قبلی شار حرارتی هر کدام از فازها به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$q_f'' = \varepsilon(1-\phi)k_f \frac{\partial T_f}{\partial y}, \quad q_p'' = \varepsilon\phi k_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \quad \& \quad q_s'' = (1-\varepsilon)k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \quad (15-3)$$

و شار حرارتی کل به صورت زیر به دست می آید:

$$q'' = q_f'' + q_p'' + q_s'' = \varepsilon(1-\phi)k_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)_{wall} + \varepsilon(\phi)k_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial y} \right)_{wall} + (1-\varepsilon)k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_{wall} \quad (16-3)$$

صورت بی بعد معادله بالا به صورت زیر است:

$$1 = \varepsilon(1-\phi^*\phi_0) \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \right)_{wall} + \varepsilon(\phi^*\phi_0) \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \right)_{wall} + (1-\varepsilon) \left(\frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad (17-3)$$

✓ مدل اول:

در مدل اول نسبت شارها بین فازها بر اساس حجم اشغال شده توسط فازها محاسبه می‌شود:

$$\frac{q_f''}{q_s''} = \frac{\varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0)}{1 - \varepsilon} \& \frac{q_f''}{q_p''} = \frac{\varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0)}{\varepsilon \varphi^* \varphi_0} \quad (۱۸-۳)$$

با جایگزینی شارهای حرارتی در معادله بالا خواهیم داشت:

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \& \frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \quad (۱۹-۳)$$

با توجه به برابری گرادیان دمای بی‌بعد فازها و جایگزینی گرادیان دمای بی‌بعد سیال به جای جامد و

نانوذره در معادله بی‌بعد شار خواهیم داشت:

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} [\varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0) + (1 - \varepsilon) + \varepsilon \varphi^* \varphi_0] = 1 \quad (۲۰-۳)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = 1, \frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} = 1, \frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} = 1 \quad (۲۱-۳)$$

✓ مدل دوم:

در این مدل شارها با ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال، نانوذر و جامد ارتباط دارند:

$$\frac{q_f''}{q_s''} = \frac{k_f}{k_s} \quad \& \quad \frac{q_f''}{q_p''} = \frac{k_f}{k_p} \quad (۲۲-۳)$$

با عملیات ریاضی که در مدل اول تشریح شد خواهیم داشت:

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{\varepsilon \varphi^* \varphi_0}{\varepsilon(1-\varphi^* \varphi_0)} \frac{k_f}{k_p} \frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \quad , \quad \frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{(1-\varphi^* \varphi_0)}{\varepsilon(1-\varphi^* \varphi_0)} \frac{k_f}{k_s} \frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \quad (23-3)$$

با اعمال برابری موجود در معادله بالا در معادله بی بعد شار شرایط زیر به دست می آیند:

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \left[\varepsilon(1-\varphi^* \varphi_0) + \varepsilon(1-1-\varphi^* \varphi_0) \frac{k_p}{k_f} + \varepsilon(1-\varphi^* \varphi_0) \frac{k_s}{k_f} \right] = 1 \quad (24-3)$$

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\varepsilon(1-\varphi^* \varphi_0)} \frac{k_f}{(k_f + k_p + k_s)} \quad (25-3)$$

$$\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\varepsilon \varphi^* \varphi_0} \frac{k_p}{(k_f + k_p + k_s)} \quad (26-3)$$

$$\frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} = \frac{1}{(1-\varepsilon)} \frac{k_s}{(k_f + k_p + k_s)} \quad (27-3)$$

✓ مدل سوم:

مدل سوم، ترکیبی از مدل اول و دوم است. به عبارت دیگر شارها با حجم اشغال شده و ضریب انتقال حرارت هدایتی ارتباط دارند.

$$\frac{q_f''}{q_s''} = \frac{k_f}{k_s} \frac{\varepsilon(1-\varphi^* \varphi_0)}{1-\varepsilon} \quad \& \quad \frac{q_f''}{q_p''} = \frac{k_f}{k_p} \frac{\varepsilon(1-\varphi^* \varphi_0)}{\varepsilon \varphi^* \varphi_0} \quad (28-3)$$

با عملیات ریاضی داریم:

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{k_f}{k_p} \frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \quad , \quad \frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{k_f}{k_s} \frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \quad (29-3)$$

با اعمال برابری موجود در معادله بالا در معادله بی بعد شار شرایط زیر به دست می آیند:

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \left[\varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0) + \varepsilon \varphi^* \varphi_0 \frac{k_p}{k_f} + (1 - \varepsilon) \frac{k_s}{k_f} \right] = 1 \quad (30-3)$$

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} = \frac{k_f}{\varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0)k_f + \varepsilon \varphi^* \varphi_0 k_p + (1 - \varepsilon)k_s} \quad (31-3)$$

$$\frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} = \frac{k_s}{\varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0)k_f + \varepsilon \varphi^* \varphi_0 k_p + (1 - \varepsilon)k_s} \quad (32-3)$$

$$\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} = \frac{k_p}{\varepsilon(1 - \varphi^* \varphi_0)k_f + \varepsilon \varphi^* \varphi_0 k_p + (1 - \varepsilon)k_s} \quad (33-3)$$

در پایان اعداد ناسلت را برای سیال، نانوذره و جسم جامد پیشنهاد می کنیم. اعداد ناسلت برای جامد و سیال توسط امیری و همکاران [۸۴] برای شرایط عدم تعادل حرارتی بین سیال خالص و جسم جامد معرفی شدند. در این رساله روابط پیشنهادی امیری و همکاران [۸۴] را برای نانوسیالات بسط می دهیم و عدد ناسلت را برای نانوذره معرفی می کنیم:

$$Nu_f = -\frac{2}{(T_f^*)_W - T_{mf}^*} \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad T_{mf}^* = \frac{\int_0^2 u^* T_f^* dy^*}{U_m^*} \quad (34-3)$$

$$Nu_s = -\frac{2}{(T_s^*)_W - T_{ms}^*} \left(\frac{\partial T_s^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad T_{ms}^* = \int_0^2 T_s^* dy^* \quad (35-3)$$

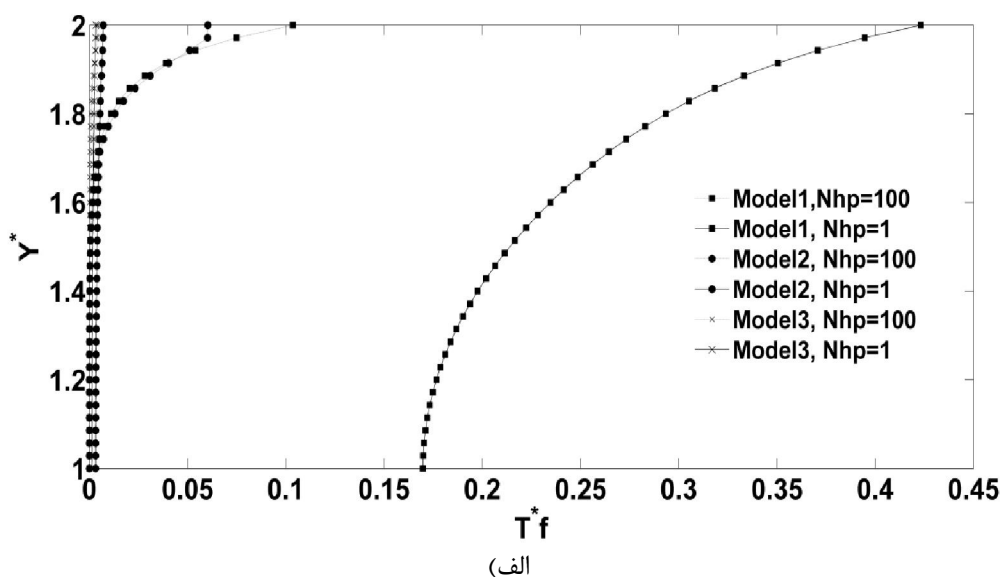
$$Nu_p = -\frac{2}{(T_p^*)_W - T_{mp}^*} \left(\frac{\partial T_p^*}{\partial y^*} \right)_{wall} \quad T_{mp}^* = \frac{\int_0^2 u^* T_p^* dy^*}{U_m^*} \quad (36-3)$$

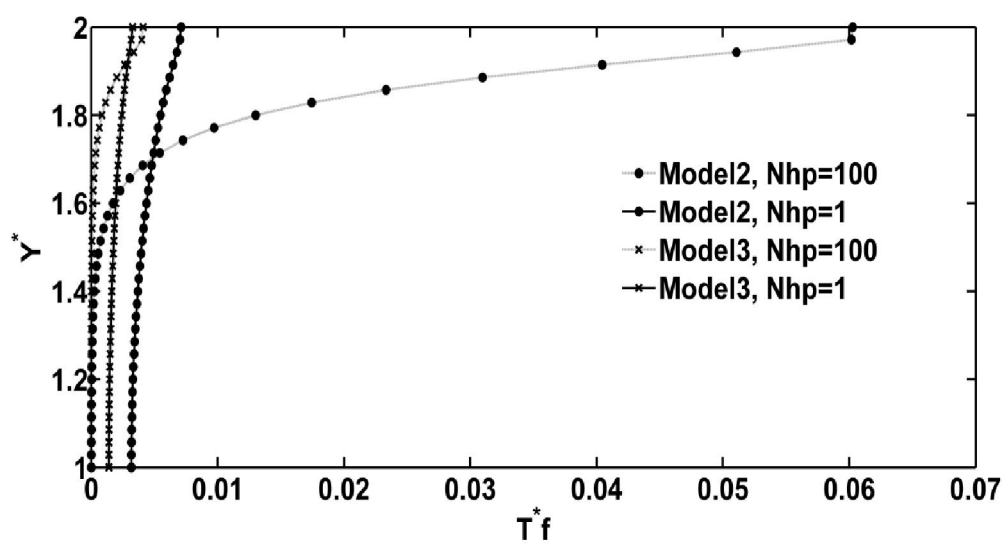
برای بررسی و مقایسه مدل های ارائه شده، معادلات عدم تعادل حرارتی با فرض $\varphi_0 = 0.5$ ، $\gamma_p = 10$ ،

$$\frac{1}{Da} \left(\frac{dP^*}{dx^*} \right) = -2, \varepsilon_p = 100, \varepsilon_s = 500, \tau = 1, Da = 0.02, Re = 150, Pr = 1, \gamma_s = 10$$

و همچنین

$k_s=250$ ، $k_p=50$ و $k_f=0.5$ به صورت عددی حل شده‌اند. شکل ۳-۲۳ تغییرات دمای سیال منتج از مدل‌های پیشنهادی را با تغییرات عدد نیلد نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۳-۲۳-الف مشخص است با تغییرات N_{hp} مدل اول بیشترین تغییر را در توزیع دمای سیال به دست می‌دهد. به عبارت دیگر تغییرات توزیع دما به ازای تغییرات N_{hp} بسیار محسوس است. با افزایش N_{hp} توزیع دما کاهش می‌یابد. بزرگنمایی تغییرات توزیع دمای سیال منتج از مدل‌های دوم و سوم در شکل ۳-۲۳-ب ارائه شده است. توزیع دمای منتج از مدل‌های دوم و سوم با افزایش N_{hp} ، در نزدیک دیواره افزایش یافته و در ناحیه مرکزی کاهش می‌یابند. با توجه به اینکه در مدل‌های دوم و سوم نسبت ضریب انتقال حرارت هدایتی برای محاسبه گرادیان دما نقش اساسی دارد و این نسبت برای محاسبه گرادیان دمای سیال بسیار ناچیز بوده و نزدیک به صفر است مدل‌های مذکور نزدیک دیواره شبیه عایق عمل می‌کنند.

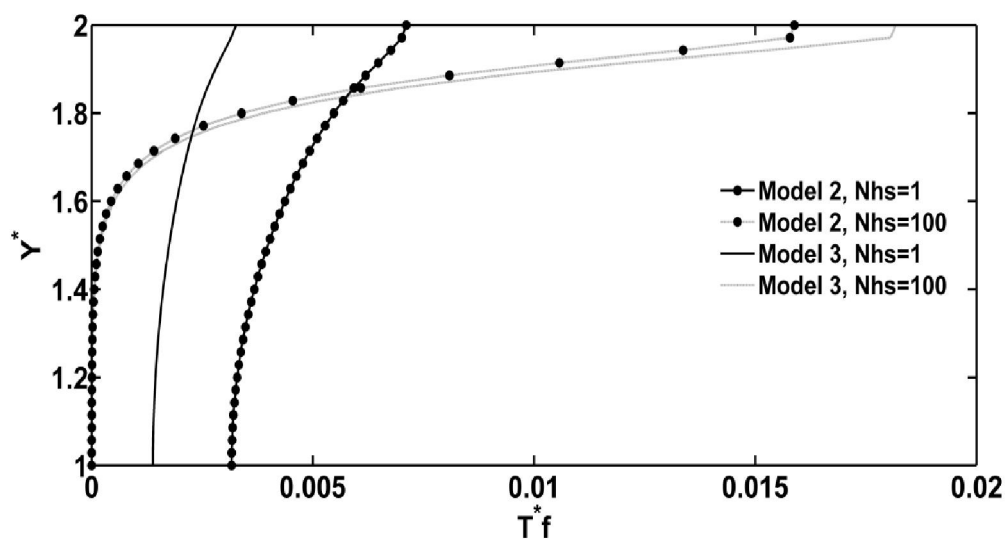




(ب)

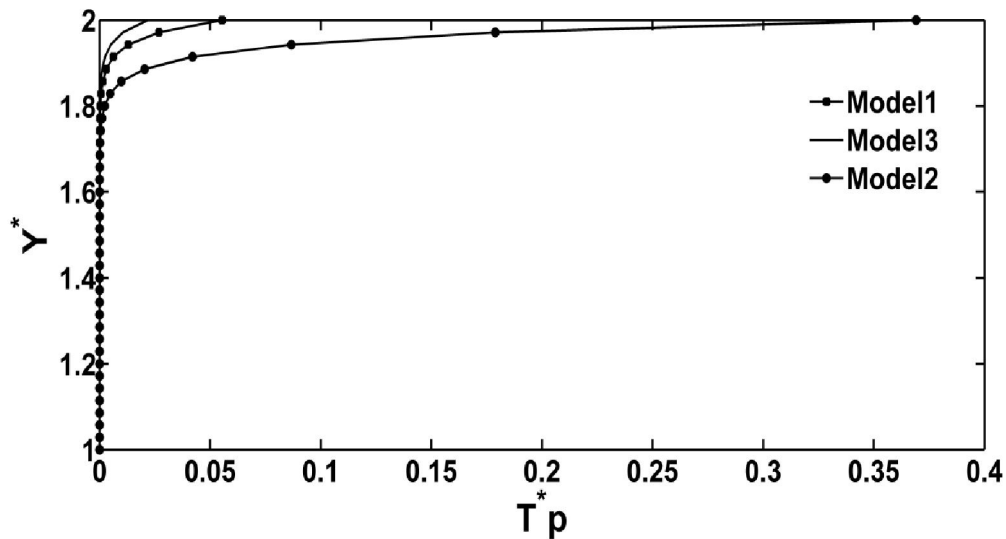
شکل ۳-۲۳: تغییرات توزیع دمای سیال منتج از مدل‌ها با تغییرات N_{hp} [۸۳]

شکل ۳-۲۴ تأثیرات N_{hs} را بر روی توزیع دمای سیال نشان می‌دهد. رویه کلی تغییرات دمای سیال منتج از مدل اول شبیه رفتار تشریح شده در شکل ۳-۲۳ است.



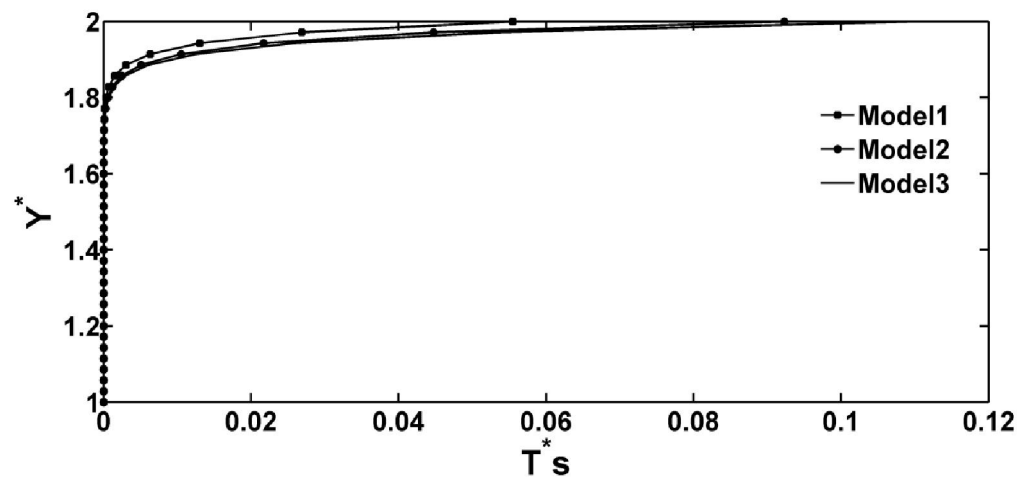
شکل ۳-۲۴: تغییرات توزیع دمای سیال منتج از مدل‌ها با تغییرات N_{hs} [۸۳]

شکل ۳-۲۵ توزیع دمای نانوذره منتج از مدل‌های پیشنهاد شده را در اعداد نیلد ثابت و برابر یک نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که دمای بی‌بعد نانوذره منتج از مدل ۲ بیشترین مقدار را نزدیک دیواره دارد.



شکل ۳-۲۵: توزیع دمای نانوذره منتج از مدل‌های پیشنهاد شده در $N_{hp} = N_{hs} = 1$ [۸۳]

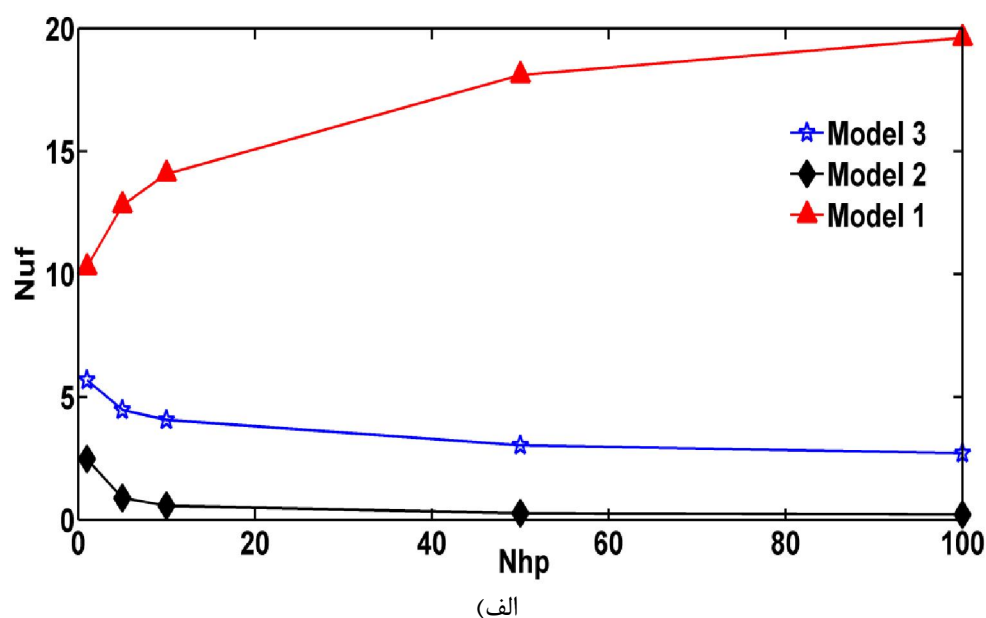
شکل ۳-۲۶ توزیع دمای جامد منتج از مدل‌های پیشنهاد شده را در اعداد نیلد ثابت و برابر یک نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که دمای بی‌بعد جامد منتج از مدل ۳ بیشترین مقدار را نزدیک دیواره دارد.

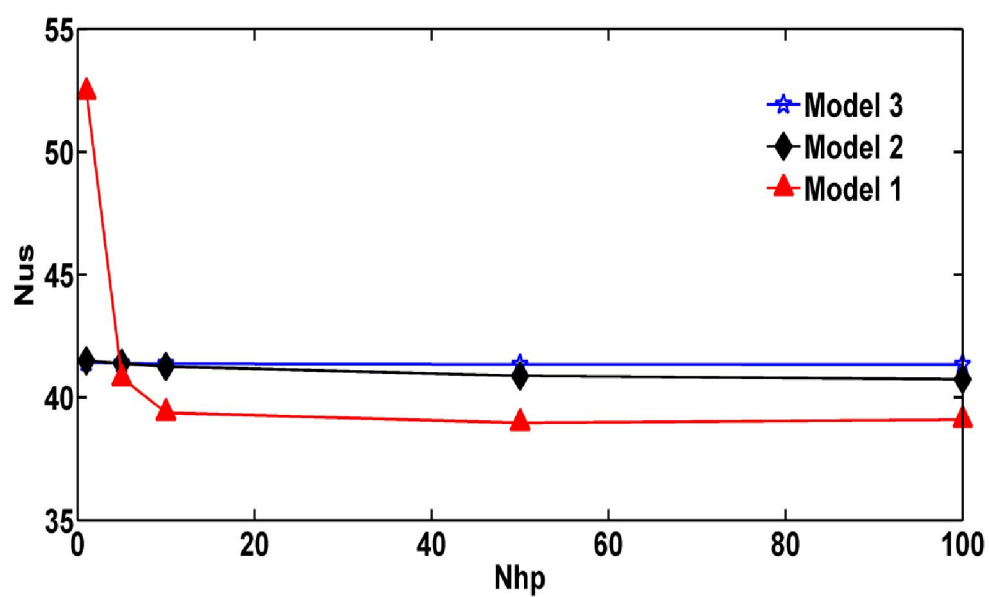


شکل ۳-۲۶: توزیع دمای جسم جامد منتج از مدل‌های پیشنهاد شده در $N_{hp} = N_{hs} = 1$ [۸۳]

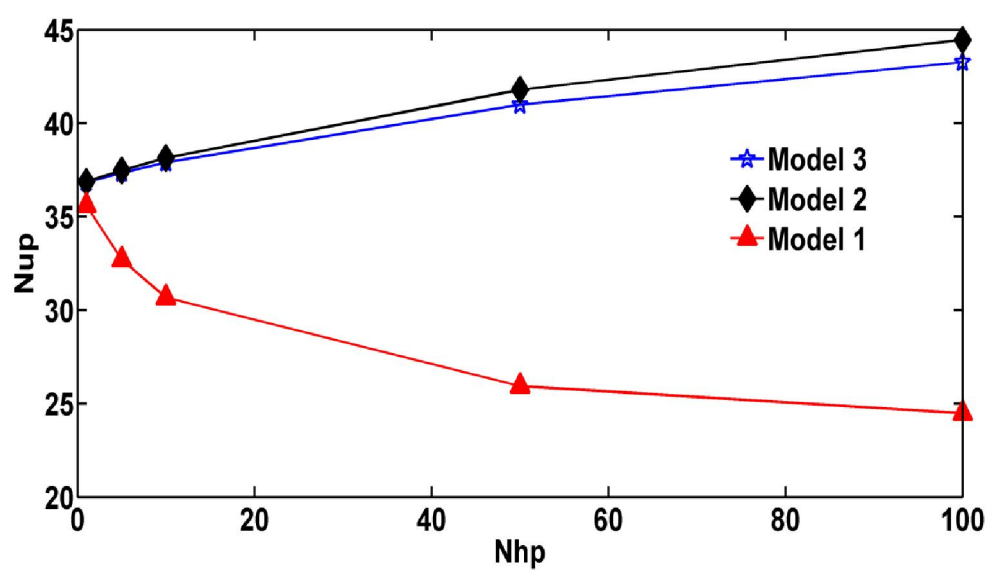
شکل ۲۷-۳ تغییرات عدد ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته حرارتی را با تغییرات N_{hp} نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۲۷-۳-الف مشخص است با افزایش N_{hp} عدد ناسلت سیال منتج از مدل اول افزایش می‌یابد ولی اعداد ناسلت منتج از مدل‌های دوم و سوم کاهش می‌یابند. عدد ناسلت جامد در شکل ۲۷-۳-ب نشان داده شده است. عدد ناسلت جامد منتج از مدل اول با افزایش N_{hp} کاهش می‌یابد ولی اعداد ناسلت جامد منتج از مدل‌های دوم و سوم با تغییر N_{hp} تغییر محسوسی نمی‌کنند. در مدل اول عدد ناسلت نانوذره با افزایش N_{hp} کاهش می‌یابد. این رویه در شکل ۲۷-۳-ج نشان داده شده است.

شکل ۲۸-۳ تغییرات عدد ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته حرارتی را به ازای تغییرات N_{hp} نشان می‌دهد و رویه کلی شبیه رویه تشریح شده در شکل ۲۷-۳ است.



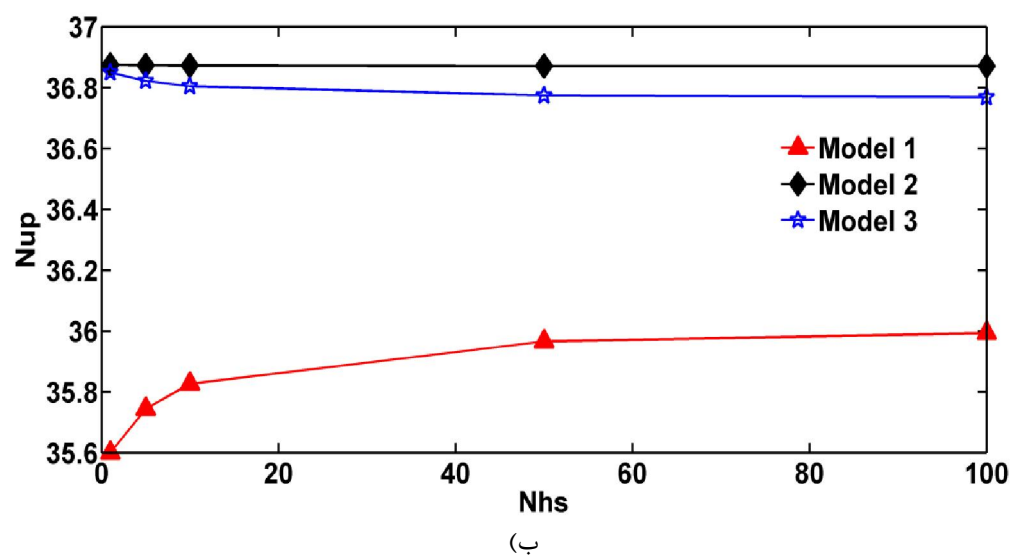
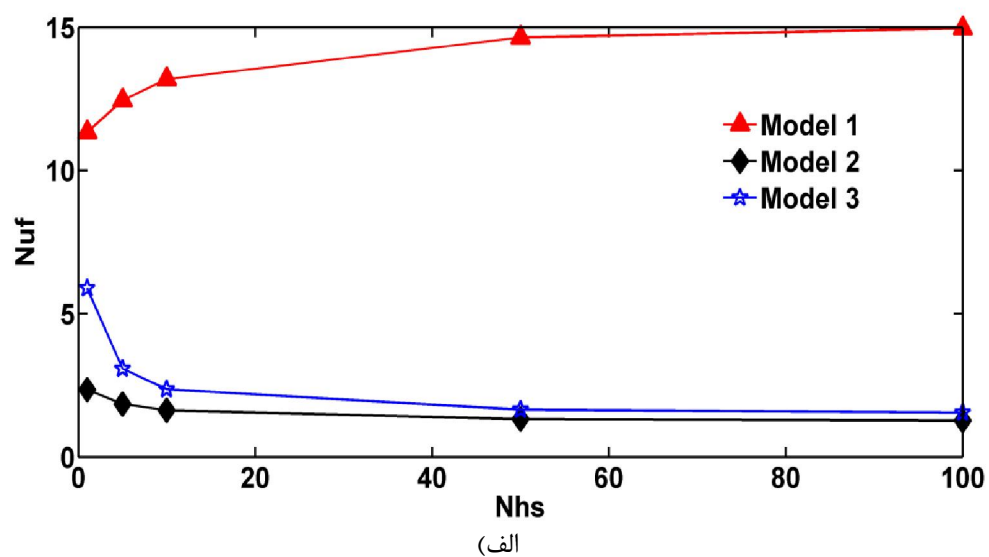


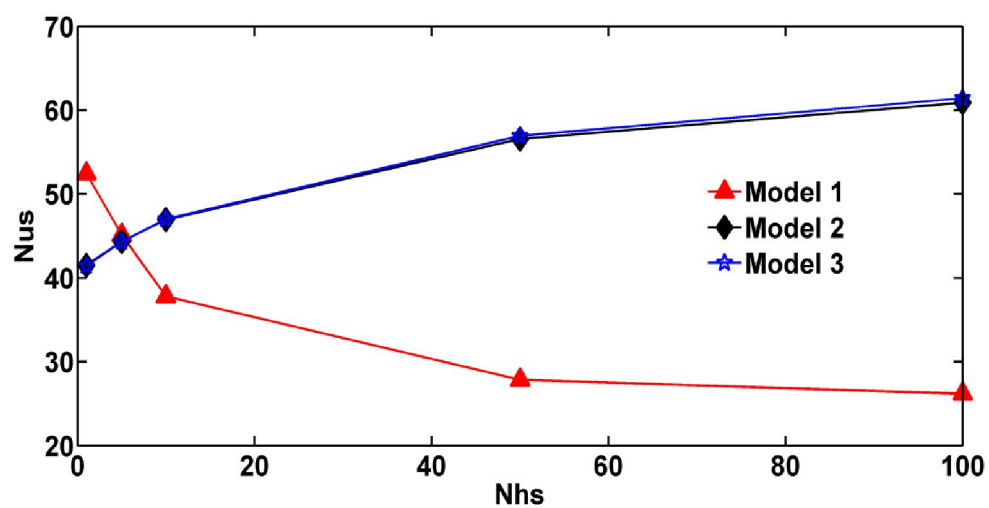
(ب)



(ج)

شکل ۳-۲۷: تغییرات عدد ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته حرارتی با N_{hp} (الف) سیال-ب) جامد-ج) نانوذره [۸۳]





(ج)

شکل ۳-۲۸: تغییرات عدد ناسلت محلی در ناحیه توسعه یافته حرارتی با N_{hp} (الف) سیال-ب) نانوذره -ج) جامد
[۸۳]

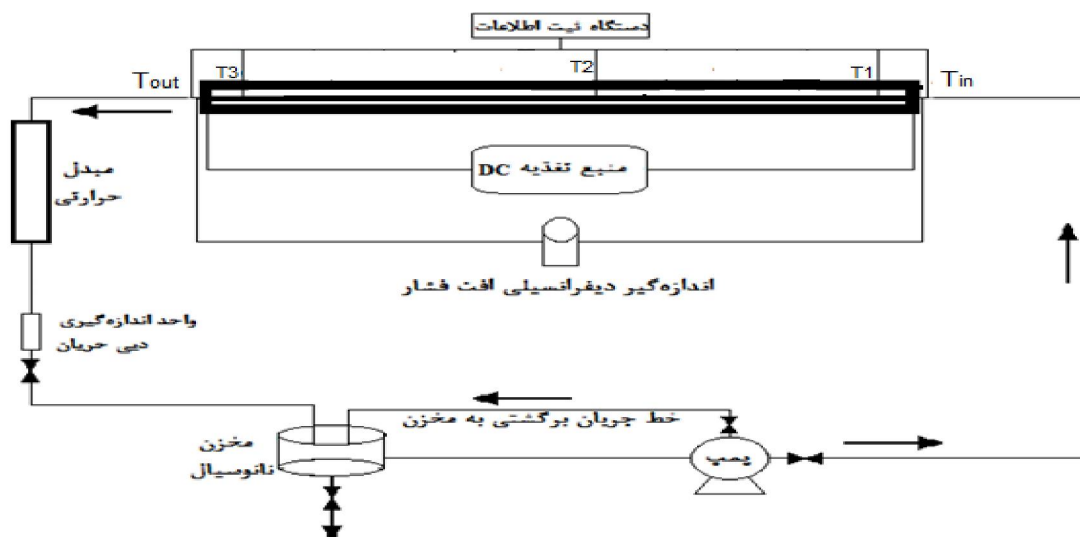
فصل چهارم:

نتایج آزمایشگاهی لوله متخلخل

در فصل سوم تأثیرات پارامترهای مختلف به صورت عددی برای کانال متخلخل در حالت تعادل و عدم تعادل حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. یکی از مواردی که بایستی مورد آزمایش قرار گیرد تا از ادعای محض خارج شود مدل‌های مختلف برای محاسبه شار در حالت دمای ثابت دیواره و پیشنهاد بهترین مدل است. با توجه به اینکه ساخت کانال متخلخل همگن بسیار دشوار است آزمایش برای لوله متخلخل انجام گرفته و در فصل پنجم رساله لوله متخلخل مورد آزمایش به صورت عددی نیز مورد مطالعه قرار گرفته و تمامی ابعاد و جنس و... لحاظ شده در حل عددی تا حد امکان با واقعیت مسئله همخوانی دارد در این فصل نتایج تجربی افزودن نانوذره آلومینا در آب بر انتقال حرارت درون لوله متخلخل بررسی شده است.

۱-۴- طراحی و ساخت

برای دستیابی به اهداف این تحقیق و انجام آزمایش بر روی نانوسیالات، سیستم آزمایشگاهی مطابق شکل ۱-۴ ساخته شده است. این سیستم آزمایش شامل یک مدار جریان، بخش‌های مختلفی همچون واحدهای اندازه‌گیری نرخ جریان، فشار و دما، بخش‌های سرمایش و گرمایش و سیستم کنترل جریان است.



شکل ۱-۴: شماتیک سیستم آزمایشگاهی

بخش آزمایش متشکل از لوله‌ای از جنس مس پر شده با محیط متخلخل و با نسبت تخلخل ۰/۸۵، با قطر داخلی ۲۰ میلی متر، ضخامت ۳ میلی متر و طول ۲۴ سانتی‌متر است. آزمایشات در حالت شار حرارتی یکنواخت انجام شده است. به این منظور جهت ایجاد شار حرارتی یکنواخت در جداره به عنوان شرایط مرزی، از المنت حرارتی و منبع تغذیه الکتریکی استفاده شده است. مقدار ژول گرمای تولید شده برابر است با $I^2 R$ که I شدت جریان الکتریکی و R مقاومت الکتریکی است. جهت کاهش اتلاف حرارت به بیرون، بخش آزمایش به کمک لایه‌ای به ضخامت ۵۰ میلی متر از جنس فویل پشم شیشه عایق بندی شده است.

جهت اندازه‌گیری دمای دیواره از ۳ عدد ترموکوپل نوع RTD PT100 استفاده شده که در فواصل مساوی از یکدیگر روی لوله داخلی توسط چسب حرارتی سیلیکونی نصب شده است. هم‌چنین دو عدد ترموکوپل RTD PT100 نیز جهت اندازه‌گیری دمای متوسط سیال در قسمت‌های ورودی و خروجی بخش آزمایش درون سیال معلق شده است. در نهایت انتخاب سیستم اکتساب اطلاعات^۱ مهم و ضروری است. ترموکوپلها ساخت شرکت جمو آلمان می‌باشد که با دقت $\pm 0/1$ درجه سانتی‌گراد کالیبره شده‌اند.

به منظور تعیین افت فشار جریان در بخش آزمایش از یک دستگاه اندازه‌گیر دیفرانسیلی افت فشار^۲ استفاده شده است، به طوری که می‌توان افت فشار را در طول بخش آزمایش و برای شدت جریان‌های مختلف اندازه‌گیری کرد. اندازه‌گیری افت فشار در طول لوله آزمایش با استفاده از دستگاه LD301 انجام می‌شود. دستگاه اندازه‌گیر دیفرانسیلی افت فشار با دقت ۰/۱ درصد همراه با شیر سه راهه نصب شده است، که به کمک شلنگ شفاف پلاستیکی و توسط سه راهه‌های استاندارد به بخش‌های ورودی و خروجی متصل می‌شود. بنابراین افت فشار سیال از ورود تا خروج مشخص می‌شود. سیال خروجی از بخش آزمایش

^۱ Data Acquisition

^۲ Differential Pressure Transmitter

با عبور از یک لوله مسی که داخل جریان آب سرد قرار گرفته، به دمای تعادل می‌رسد. از یک عدد پمپ گریز از مرکز با قدرت ۰/۵ اسب بخار نیز استفاده شده است.

از یک مخزن شفاف به عنوان مخزن اصلی ذخیره سیال و همچنین جهت کنترل نرخ جریان سیال از یک خط برگشت به مخزن اصلی به همراه یک شیر استفاده شده است. برای تعیین شدت جریان از روش اندازه‌گیری زمان پر و خالی شدن ظرف شیشه‌ای با حجم ۲۵۰ سانتی متر مکعب استفاده شده است. لذا جهت اندازه‌گیری دبی از یک ظرف شیشه‌ای مدرج به حجم ۲۵۰CC که مجهز به شیر تخلیه است و یک زمان‌سنج با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ ثانیه استفاده می‌شود.

۴-۲- کالیبراسیون

گام بعدی، کالیبراسیون سنسورهای مختلف در سیستم انتقال حرارت جابجایی است. ترموکوپل‌ها برای صحت آزمایش باید کالیبره شوند، اما بقیه دستگاه‌ها توسط شرکت‌های سازنده کالیبره شده‌اند. جهت کالیبره کردن ترموکوپل‌ها از ظرف آب صفر درجه و ظرف آب صد درجه به همراه ترمومتر شیشه‌ای مدرج استفاده شده است [۸۵].

۴-۳- نانوسیالات در آزمایشات

بهبود خواص حرارتی نانوسیالات احتیاج به انتخاب روش تهیه مناسب این سوسپانسیون‌ها دارد، تا از ته‌نشینی و ناپایداری آنها جلوگیری به عمل آید. متناسب با کاربرد، انواع بسیاری از نانوسیالات از جمله نانوسیالاتی از اکسید فلزات، نیتريت‌ها، کربید فلزات و غیرفلزات با یا بدون استفاده از مواد فعال سطحی در سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیکول، استون و روغن به وجود آمده است. همانگونه که قبلاً گفته شد دو روش اصلی در تهیه نانوسیالات وجود دارد که عبارتند از روش یک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای. در این آزمایش برای تهیه نانوسیالات مورد نیاز از روش دو مرحله‌ای استفاده شده است.

در طی این آزمایشات، نانوسیال آب-آلومینا مورد مطالعه قرار گرفته است. ابعاد نانوذرات آلومینای مورد استفاده ۴۰ نانومتر است و کروی شکل است که داخل آب پراکنده شده است. با توجه به اینکه خواص حرارتی و فیزیکی یک محلول، بستگی زیادی به فرایند و کیفیت پراکنده‌سازی ذرات جامد در داخل مایع دارد، لذا به منظور عدم تغییر خواص سیستم از هیچ عامل پایدار ساز یا پراکنده‌سازی استفاده نشده است و فقط از سیستم همزن آلتراسونیک به منظور پراکنده‌سازی مناسب ذرات در داخل مایع استفاده شده است.

در طی این آزمایشات، غلظت‌های حجمی ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصدی ذرات آلومینا مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تهیه سوسپانسیون ابتدا وزن مناسبی از پودر نانو از روی دانستیه واقعی که توسط شرکت تولید کننده نانوذره ارائه شده، تعیین و با آب مقطر مخلوط شده و سپس جهت ایجاد پراکندگی، شکستن خوشه ذرات و ایجاد یک سوسپانسیون یکنواخت این مخلوط در سیستم همزن آلتراسونیک به مدت دو الی سه ساعت قرار داده می‌شود. بعد از این مدت هیچ گونه ته‌نشینی برای سوسپانسیون‌های حاوی ذرات آلومینا در مدت یک هفته مشاهده نشده است. نسبت حجمی و دانستیه نانوذرات در سوسپانسیون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi = \frac{v_s}{v_t} \quad (۱-۴)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} \quad (۲-۴)$$

پس جرم لازم نانوذرات برای حجم معینی از نانوسیال به کمک فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$m_s = v_t \varphi \rho_s \quad (۳-۴)$$

۴-۴- روش انجام آزمایش:

در گام اول و قبل از شروع به آزمایش می‌بایست المنت حرارتی را روشن کرد تا شار حرارتی یکنواخت در سرتاسر لوله برقرار شود. مرحله دوم ریختن نانوسیال مربوطه در مخزن ذخیره و روشن کردن پمپ است تا جریان نانوسیال در خط لوله برقرار گردد. برای شروع آزمایش در هر مرحله می‌بایست ابتدا نرخ جریان سیال را تعیین کنیم تا سرعت جریان و به دنبال آن عدد رینولدز مشخص شود. به علاوه در هر لحظه می‌توان مقدار افت فشار دو سر لوله را از نمایشگری که بر روی DP نصب شده خواند و یادداشت نمود. در هر شدت جریان بایستی ۵ الی ۱۵ دقیقه به سیستم اجازه کار دهیم تا سیستم به حالت پایا برسد، به طوریکه دمای سیال ورودی به بخش آزمایش دچار تغییر نشود و همواره سیال با یک دما وارد بخش آزمایش گردد. با رسیدن سیستم به حالت پایا می‌توانیم دماهای ورودی و خروجی سیال به بخش آزمایش را از روی نمایشگرهای ترموکوپل‌های RTD PT100 بخوانیم. هم‌چنین دمای بدنه را با اتصال ترموکوپل‌ها به نمایشگرهای دما می‌خوانیم. حال با در دست داشتن اطلاعات فوق می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت این جریان سیال را مشخص کرد.

۴-۵- تست آب

پس از تکمیل ساخت سیستم و کالیبراسیون حلقه جریان، تست کاربردی برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و افت فشار لزجی آغاز می‌شود. تست اولیه با آب مقطر انجام می‌شود تا عملکرد و خواص آن با نتایج علمی منتشر شده از آب مطابقت داده شود. تست‌های اولیه با دبی‌ها و دماهای ورودی مختلف انجام شده است.

۴-۵-۱- تست ضریب انتقال حرارت آب در لوله خالی

گام‌های زیر در محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند:

توان: توان به طور مستقیم از بخش آزمایش اندازه گرفته می‌شود. با فرض اینکه تلفات وجود ندارد انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی تبدیل شده و انرژی به صورت $Q = IV$ (جریان I و اختلاف ولتاژ V) و شار حرارتی روی جداره داخلی لوله هم به صورت زیر

$$q'' = \frac{Q}{\pi D_{in} L} \quad (4-4)$$

قابل محاسبه است.

فرض تلفات حرارتی از بالانس انرژی و افزایش دمای متوسط در مرحله بعدی منظور شده است.

دمای جداره و متوسط: می‌دانیم که چنین رابطه‌ای برای دبی جریان برقرار است: $\dot{m} = \rho VA$. دمای متوسط ورودی را هم که اندازه گرفته‌ایم. بنابراین دمای متوسط محلی با استفاده از بقاء انرژی برابر است با:

$$T_b(x) = \frac{Q(x)}{\dot{m} c_p} + T_{b,in} \quad (5-4)$$

برای اطمینان از صحت آن، این مقدار با دمای متوسط خروجی مقایسه می‌شود. در روابط بالا، D_{in} قطر داخلی لوله، V سرعت متوسط، ρ چگالی، C_p ظرفیت حرارتی مخصوص است. A نیز مساحت مقطع داخلی لوله است که برابر $\pi D^2/4$ است.

ترموکوپل‌ها، دمای سطح خارجی جداره را اندازه می‌گیرند. اما با توجه به اینکه هدایت حرارتی مس بسیار بالاست و ضخامت جداره لوله بسیار اندک، می‌توان دماهای داخلی و خارجی را برابر فرض نمود.

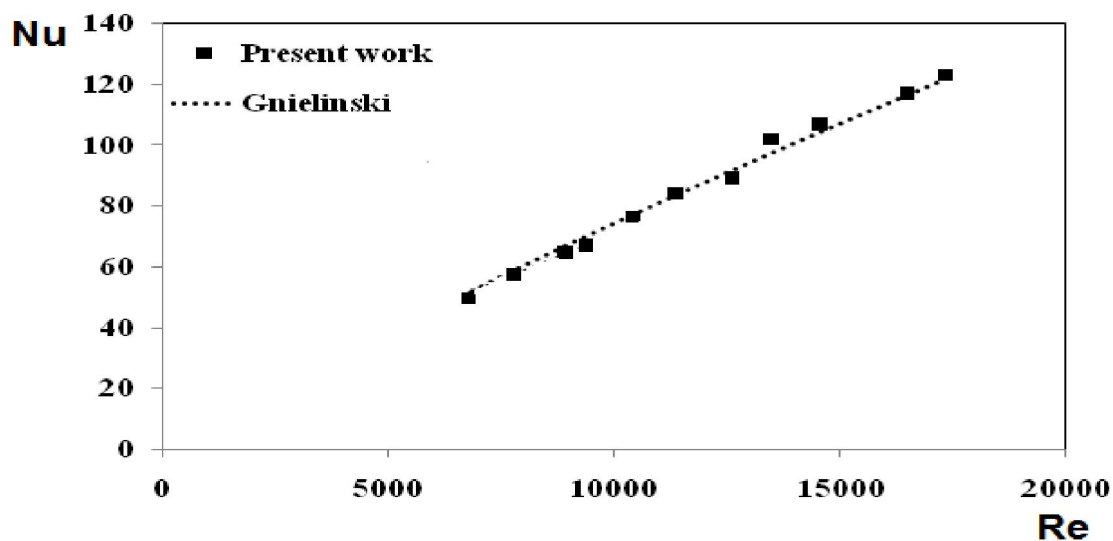
ضریب انتقال حرارت: ضریب انتقال حرارت محلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h_x = \frac{q''}{(T_{w,i} - T_{b,x})} \quad (۶-۴)$$

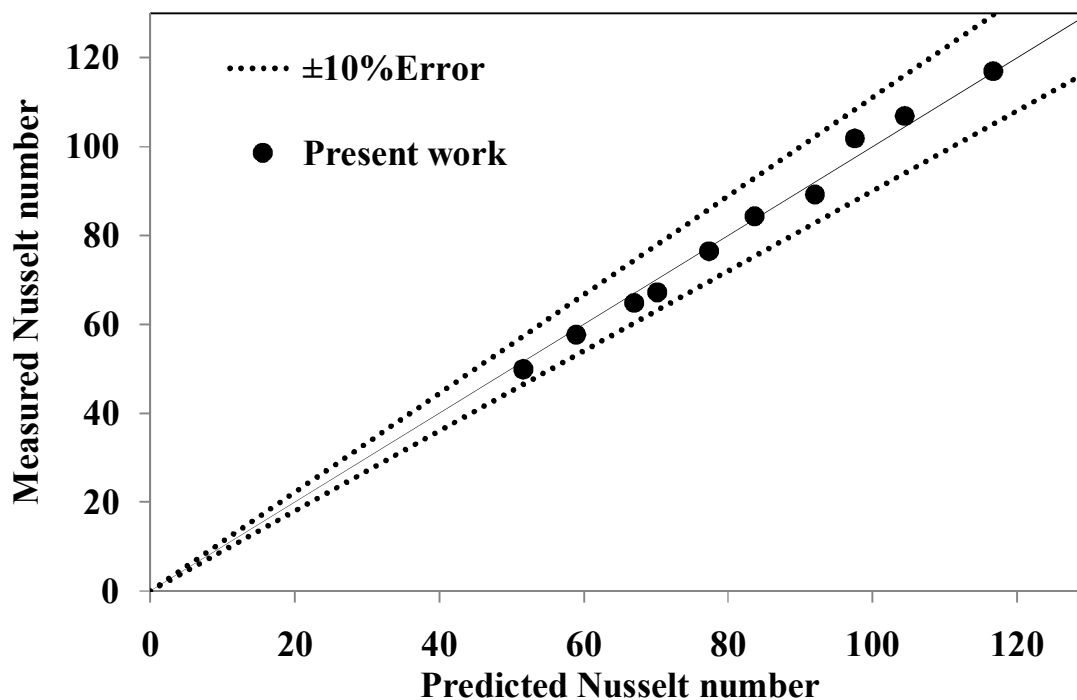
که همه‌ی مقادیر در بالا تعریف شده‌اند. در نهایت بوسیله‌ی ضریب انتقال حرارت می‌توان عدد ناسلت جریان را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$Nu(x) = h(x)D / k_{nf} \quad (۷-۴)$$

که k_{nf} هدایت حرارتی سیال است. به علاوه می‌توان این مقدار را با نتایج پیش‌بینی شده حاصل از معادلات گنیلینسکی [۸۶] و دیتوس-بولتر [۸۷] برای جریان درهم و از معادله شاه و لندن [۷۷] برای جریان آرام مقایسه نمود تا صحت نتایج بررسی شود. برای نمونه شکل ۴-۲ این مقایسه را برای جریان درهم نشان می‌دهد و بیان می‌کند که توافق خوبی بین نتایج تجربی و رابطه گنیلینسکی [۸۶] وجود دارد که بر صحت و اطمینان نتایج تأکید دارد.



شکل ۴-۲-الف: مقایسه عدد ناسلت تجربی و روابط پیش‌بینی برای آب خالص در جریان درهم



شکل ۴-۲-ب: مقایسه عدد ناسلت تجربی و رابطه گنیلینسکی برای آب خالص

همچنین می‌توان در شکل ۴-۲-ب دید که تمامی داده‌ها در محدوده ۱۰٪ مقادیر پیش‌بینی شده قرار

گرفته‌اند. به بیان دیگر در بدبینانه‌ترین حالت همه‌ی داده‌ها شامل عدم قطعیت ۱۰٪ شده‌اند.

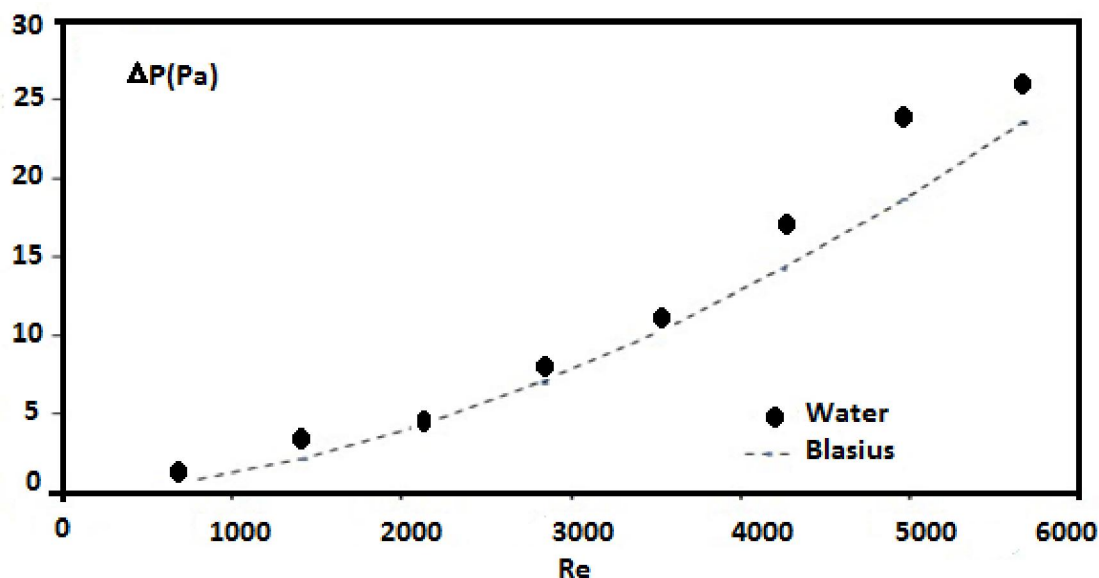
۴-۵-۲- تست افت فشار لزجی آب

در بخش شار ثابت تجهیزاتی استفاده شده‌اند تا داده‌های افت فشار را بررسی کنند. مقادیر اندازه‌گیری

شده را می‌توان با رابطه‌ی تجربی افت فشار مقایسه نمود که برابر است با:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (4-8)$$

که f ضریب اصطکاک است و می‌تواند در جریان درهم کاملاً توسعه یافته با استفاده از $f = 0.316 Re^{-0.25}$ که رابطه‌ی بلازیوس^۱ نام دارد در ناحیه $Re < 3000$ محاسبه شود. در جریان آرام نیز f از رابطه $f = 64/Re$ به دست می‌آید. نتایج افت فشار در شکل ۳-۴ دیده می‌شود.



شکل ۳-۴: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده با معادله بلازیوس

از این نتایج به نظر می‌رسد که آزمایشات به خوبی انجام شده است. تکمیل تست‌گیری از آب تأیید کرد که دستگاه به درستی قادر به اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و افت فشار لزجی سیالات در حالت شار ثابت است.

^۱ Blasius equation

۴-۶- تست نانوسیال آلومینا/آب

۴-۶-۱- محاسبه خواص نانوسیال آلومینا/آب

خواص فیزیکی مورد استفاده برای نانوسیال شامل دانسیته، ویسکوزیته، حرارت مخصوص و ضریب هدایت حرارتی هستند. برای دانسیته و ظرفیت حرارتی نانوسیال روابط کلاسیک مخلوط‌های دوفاز برقرار و مورد تأیید هستند [۱۹] و با توجه به خواص آب و ذرات نانو در دمای متوسط تعیین می‌شوند. دانسیته نانوسیال با این تئوری برابر است با:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_w \quad (۹-۴)$$

که ϕ نسبت حجمی ذرات نانو، ρ_s دانسیته ذرات نانو و ρ_w دانسیته آب است. محققان از دو رابطه متفاوت برای برای محاسبه ظرفیت حرارتی یا گرمای مخصوص استفاده می‌کنند. محققان قدیمی‌تر از رابطه زیر که از همان دیدگاه رابطه دانسیته تبعیت می‌کند استفاده می‌کردند [۱۹]:

$$Cp_{nf} = \phi Cp_s + (1 - \phi) Cp_w \quad (۱۰-۴)$$

اما، در تحقیق حاضر از رابطه دقیق‌تر زیر برای گرمای مخصوص نانوسیالات که مبتنی بر مدل تعادل حرارتی است، استفاده شده است [۴۶]:

$$Cp_{nf} = \frac{\phi(\rho_s Cp_s) + (1 - \phi)(\rho_w Cp_w)}{\rho_{nf}} \quad (۱۱-۴)$$

در روابط بالا Cp_s گرمای مخصوص ذرات نانو و Cp_w گرمای مخصوص آب است.

برای محاسبه هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال نیز از روابط زیر استفاده شده است:

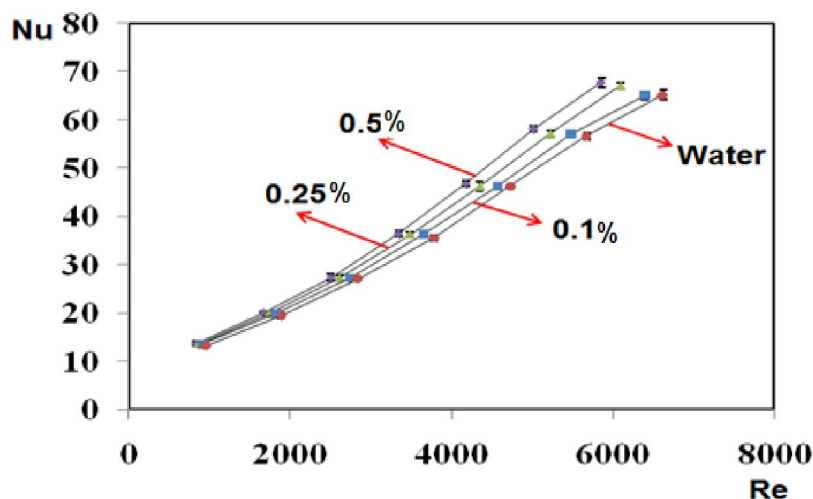
$$K_{nf} = \left[\frac{K_p + 2K_{bf} + 2(K_p - K_{bf})(1 + \beta)^3 \phi}{K_p + 2K_{bf} - (K_p - K_{bf})(1 + \beta)^3 \phi} \right] K_{bf} \quad (۱۲-۴)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 0.025\phi + 0.015\phi^2 \quad (13-4)$$

روابط (۱۲-۴) و (۱۳-۴) به ترتیب توسط یو و چوی [۸۸] و نگوین و همکاران [۸۹] ارائه شده است.

۴-۶-۲- آزمایشات انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا/آب در لوله متخلخل

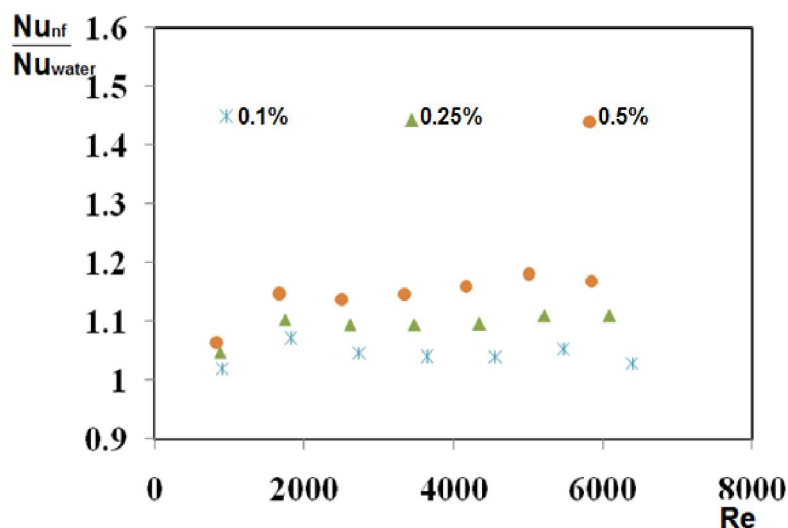
شکل ۴-۴ عدد ناسلت نانوسیال آلومینا/آب را در کسر حجمی‌های مختلف بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است افزایش کسر حجمی نانوذرات آلومینا منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در یک عدد رینولدز ثابت می‌شود.



شکل ۴-۴: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب

شکل ۴-۵ نسبت عدد ناسلت نانوسیال به آب خالص را در همان اعداد رینولدز به صورت تابعی از عدد رینولدز نشان می‌دهد. دیده می‌شود که افزایش قابل توجه انتقال حرارت با تعلیق ذرات نانومتری Al_2O_3 در آب حاصل می‌شود. در آزمایشات انجام شده نسبت Nu_{nf}/Nu_w برای کسر حجمی ۰/۵ درصد نانوذرات آلومینا در آب برابر با ۱/۱۷ بدست آمد. بنابراین ۱۷ درصد افزایش مشاهده شده است که این مقدار بالاترین افزایش در آزمایشات بوده است. این افزایش قابل توجه دلایل دیگری به غیر از افزایش ضریب

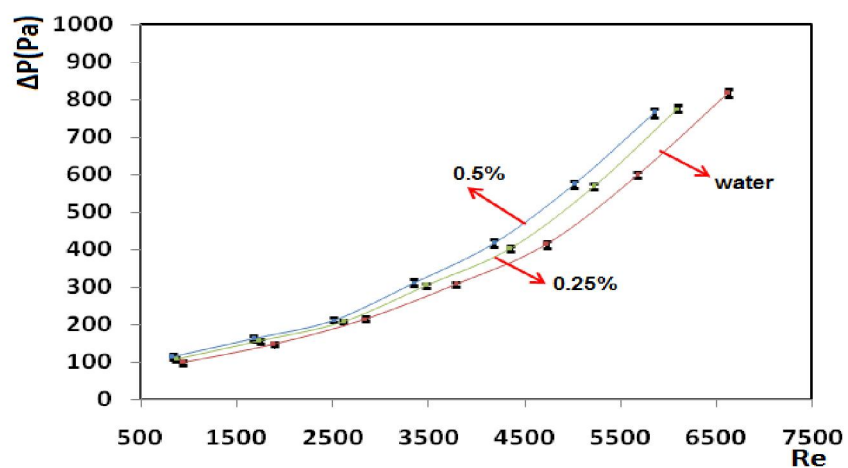
هدایت حرارتی دارد. از جمله تئوری‌های پرداخته شده می‌توان به مهاجرت ذرات و اثرات ترموفورز اشاره کرد. حرکات نامنظم ذرات یا حرکت براونی (که در بخش عددی به‌طور کامل معرفی شد) با جابجا شدن آنها، مخصوصاً در کنار دیواره‌ها منجر به کاهش لایه مرزی حرارتی شده و پروفیل دما را تغییر می‌دهد. این امر فرایند تبادل انرژی را شتاب می‌دهد.



شکل ۴-۵: نسبت افزایش عدد ناسلت (Nu_{nf}/Nu_w) بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیال آلومینا/آب

۴-۷- آزمایشات افت فشار لزجی نانوسیال آلومینا/آب

به منظور به کار بردن نانوسیال در کاربردهای صنعتی، افت فشار نانوسیال باید مورد بررسی قرار گیرد. نتایج اندازه‌گیری‌های افت فشار لزجی در شکل ۴-۶ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌ها می‌توان دریافت که افزودن نانوذرات در غلظت‌های پایین به سیال مینا در این تحقیق موجب افزایش قابل توجه در افت فشار نشده است. بنابراین نتایج این شکل بیان می‌کند که رابطه افت فشار و ضریب اصطکاک برای جریان تک‌فاز می‌تواند برای نانوسیال آلومینا/آب نیز تعمیم داده شود.



شکل ۴-۶: مقایسه افت فشار اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده برای نانوسیال آلومینا/آب

فصل پنجم:

نتایج عددی لوله متخلخل

در این قسمت نتایج مربوط به حل عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آلومینا/آب درون لوله متخلخل از جنس آلومینیوم آورده شده است. برای مدل سازی جریان نانوسیالات از مدل داری برینکمن فورچهیمر استفاده شده است. نانوسیال دارای کسر حجمی نیم درصد است.

۵-۱- هندسه مورد مطالعه:

هندسه مورد مطالعه لوله دو بعدی پر شده از ماده متخلخل است. لوله دارای طول ۲۵ سانتی متر و قطر ۲ سانتی متر است. نسبت تخلخل برابر نیم فرض شده است. دیواره لوله دارای دمای ثابت است. در زیر شماتیکی از هندسه به همراه شبکه بندی محاسباتی آورده شده است:



شکل ۵-۱: شماتیکی از هندسه مورد مطالعه و شبکه بندی محاسباتی

همانطور که در شکل دیده می شود با توجه به اینکه تغییرات نزدیک دیواره شدید است برای افزایش دقت محاسبات، شبکه نزدیک دیواره ریزتر می شوند.

۵-۲- معادلات حاکم و روش حل:

با توجه به اینکه هدف این بخش از رساله، بررسی تطابق مدل های ارائه شده در بخش ۳-۲-۱ با نتیجه تجربی و پیشنهاد مدلی است که نزدیکترین نتایج را به نتایج تجربی دارد و اینکه نتایج عددی مربوط به حل تعادل حرارتی بین فازها اختلاف زیادی با نتایج تجربی نشان می دهد و تحقیق تجربی نمونه ای از انتقال حرارت اجباری نانوسیالات درون لوله متخلخل با شرط عدم تعادل حرارتی بین فازها است در این بخش نتایج مربوط به عدم تعادل حرارتی آورده شده است. در این بررسی ابعاد هندسه، جنس نانوذرات و

کسر حجمی آنها، جنس ماده متخلخل و شرایط مرزی و ورودی کاملاً مطابق با تحقیق تجربی در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه نتایج تجربی در کسر حجمی نیم درصد و عدد رینولدز ۶۲۷ به دست آمده است و در اعداد ذکر شده توزیع کسر حجمی نانوذرات تقریباً یکنواخت است و با توجه به اندک بودن کسر حجمی انتقال حرارت نانوذرات با سیال پایه بسیار اندک است و بنابراین می توان با تقریب مناسبی از دو معادله انرژی به جای سه معادله انرژی استفاده کرد. صورت برداری معادلات حاکم در حالت پایدار به صورت زیر است:

$$\nabla.V = 0 \quad (۱-۵)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\varepsilon} \nabla^2 V - \frac{\mu_{nf}}{K} V - \rho_{nf} F \frac{\varepsilon}{\sqrt{K}} V|V| - \nabla P = \frac{\rho_{nf}}{\varepsilon} (V \cdot \nabla) V \quad (۲-۵)$$

$$(\rho c)_{nf} V \cdot \nabla T_{nf} = k_{nf} \nabla^2 T_f + \varepsilon (\rho c)_p \left(D_B \nabla \varphi \cdot \nabla T_{nf} + \frac{D_T}{T_c} \nabla T_{nf} \cdot \nabla T_{nf} \right) + h_{fs} (T_s - T_{nf}) \quad (۳-۵)$$

$$k_s \nabla^2 T_s + h_{fs} (T_{nf} - T_s) = 0 \quad (۴-۵)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} V \cdot \nabla \varphi = \nabla \cdot (D_B \nabla \varphi + \frac{D_T}{T_c} \nabla T_{nf}) \quad (۵-۵)$$

که در آن V بردار سرعت نانوسیال است و مابقی پارامترها در فصل سوم معرفی شده اند. پارامترهای مربوط به نانوسیالات از روابط ارائه شده در این فصل محاسبه می شوند. مقادیر مربوط به خواص ترموفیزیکی سیال و نانوذره در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۵-۱: خواص آب و آلومینا

آب	آلومینا	خواص
۴۱۸۲/۲	۸۸۰	$C \left(\frac{J}{kgK} \right)$
۹۹۸/۲	۳۹۲۰	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$
۰/۶۰۲۸	۴۲/۳۴	$K \left(\frac{W}{mK} \right)$

برای محاسبه ضریب تراوایی^۱ (نفوذ پذیری) و ضریب فورچهمر از روابط پیشنهادی امیری و وفایی [۹۰] استفاده شده است و این مقادیر به ترتیب برابر $10^{-7} \times 1/11$ و $0/24$ فرض شده‌اند. مقادیر مربوط به نفوذ براونی و اثرات ترموفورز با روابطی که در مرجع [۴۰] آمده است محاسبه و به ترتیب برابر $9/91 \times 10^{-11}$ و $10^{-10} \times 1/076$ اقرار داده شده است.

معادلات (۵-۱) الی (۵-۵) از روش حجم محدود^۲ و شبکه هم‌مکان^۳ حل شده‌اند. برای حل ترمهای جابجایی از طرح اختلاف بالادست^۴ مرتبه اول و ترمهای نفوذ از روش اختلاف مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است. و در نهایت برای حل معادله مومنتوم از الگوریتم سیمپل^۵ استفاده شده است. با توجه به شرایط موجود در تحقیق تجربی، شرط مرزی دیواره دمای ثابت ۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است و همچنین دمای ورودی سیال، دمای محیط و تقریباً برابر ۲۳ درجه سانتی‌گراد فرض شده است. با توجه به تقارن محوری نیمی از لوله حل شده است. در جدول زیر شرایط مرزی آورده شده است.

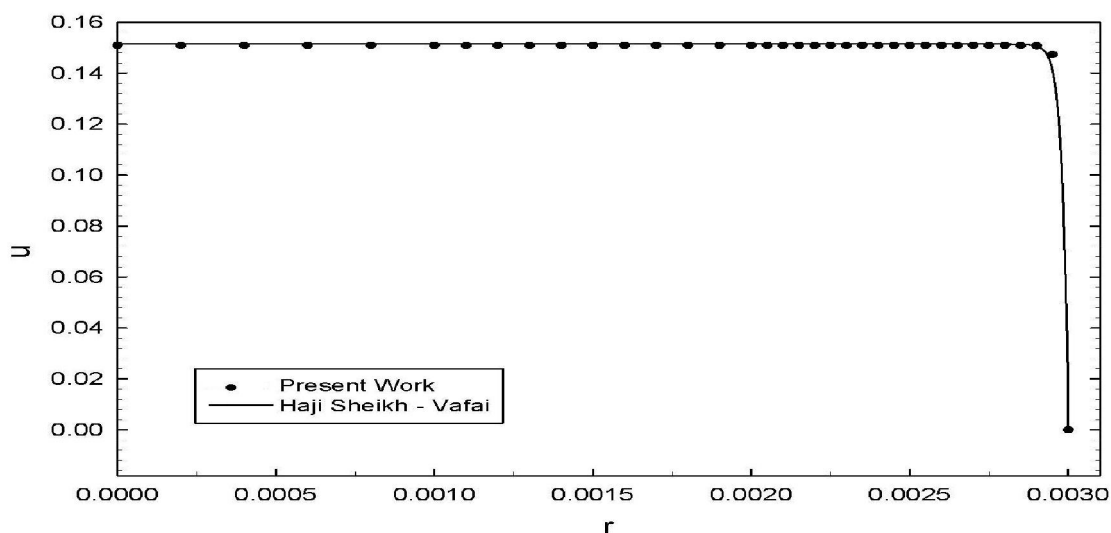
^۱ Permeability
^۲ Control volume
^۳ Collocated
^۴ Upwind
^۵ SIMPLE

جدول ۵-۲: شرایط مرزی

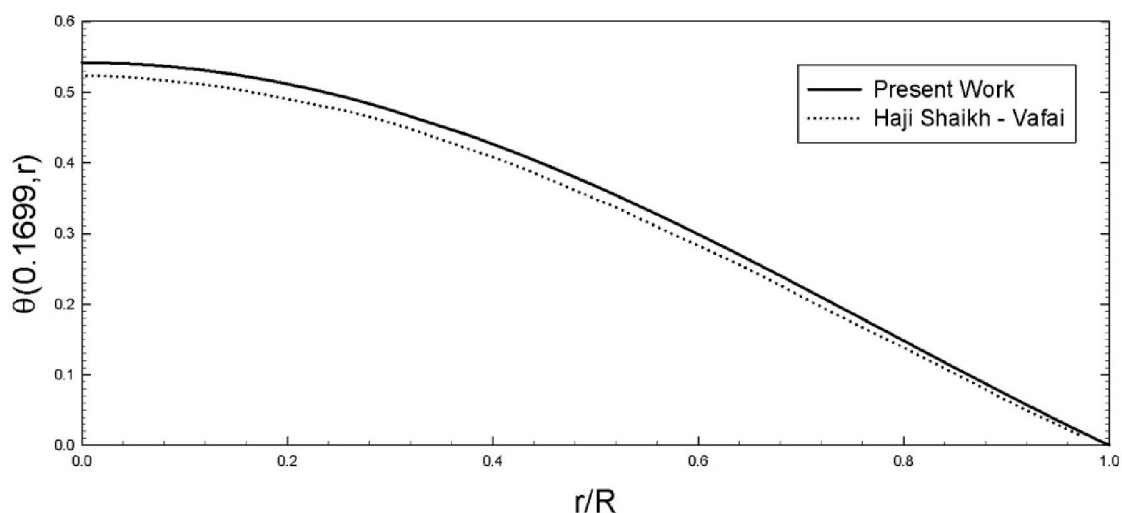
کسر حجمی	دمای جسم جامد	دمای نانوسیال	سرعت	
مقدار یکنواخت ۰/۵ درصد	مقدار یکنواخت ۲۳ درجه سانتی گراد	مقدار یکنواخت ۲۳ درجه سانتی گراد	مقدار یکنواخت ۰/۰۳ متر بر ثانیه	صفحه ورودی
گرادیان محوری صفر	گرادیان محوری صفر	گرادیان محوری صفر	گرادیان محوری صفر	صفحه خروجی
مقدار صفر	مقدار ثابت ۳ درجه سانتی گراد	مقدار ثابت ۳ درجه سانتی گراد	مقدار صفر (شرط عدم لغزش)	دیواره لوله
گرادیان شعاعی صفر	گرادیان شعاعی صفر	گرادیان شعاعی صفر	گرادیان شعاعی صفر	خط تقارن محوری

۵-۳- اعتبار سنجی نتایج عددی:

در نهایت برای آگاهی از صحت و درستی کد مربوط به جریان و انتقال حرارت نانوسیال جاری درون لوله پر شده از محیط متخلخل، پروفیل سرعت توسعه یافته و پروفیل دمای بی بعد در $x = 0.1699m$ رسم شده اند. نتایج عددی با نتایج تحلیلی حاجی شیخ و وفايي [۹۱] مقایسه و اعتبارسنجی شده اند. در حل تحلیلی حاجی شیخ و وفايي [۹۱] جریان توسعه یافته فرض شده و معادله دارسی برینکمن برای مدلسازی جریان استفاده شده است. نتایج عددی برای لوله متخلخل با ضریب تخلخل ۰/۹ و طول یک متر و قطر ۶ میلی متر و در حالت تعادل حرارتی به دست آمده اند.



شکل ۵-۲: پروفیل سرعت توسعه یافته برای جریان نانوسیال در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۹



شکل ۵-۳: پروفیل دما برای نانوسیال در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۹

شکل‌های ۲-۵ و ۳-۵ تطابق بسیار خوبی را بین نتایج عددی و نتایج تحلیلی حاجی‌شیخ و وفایی [۹۱] را نشان می‌دهد. در ادامه استقلال حل عددی از شبکه نیز بررسی شده است که در جدول زیر آورده می‌شود. نتایج در حالت عدم تعادل حرارتی و با $h_{fs} = 50000$ گزارش شده‌اند. هندسه و شرایط مرزی کاملاً مطابق با کار تجربی است.

جدول ۵-۳: بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه

$T_{out}(K)$	تعداد شبکه در راستای x	تعداد شبکه در راستای r
۲۹۴/۸۲	۲۰	۸۰
۲۹۴/۵۳	۳۰	۹۰
۲۹۴/۲۷۱	۴۰	۱۰۰
۲۹۴/۲۷۰	۵۰	۱۲۰

نتایج جدول ۳-۵ استقلال نتایج از تعداد شبکه را نشان می‌دهد و بنابراین برای هندسه مورد بررسی شبکه 40×100 انتخاب شده است.

۵-۴- نتایج عددی:

با توجه به نتایج تجربی و اینکه ضریب انتقال حرارت نانوسیال و جسم جامد (h_{fs}) نقش بسیار مهمی در محاسبه نتایج عددی دارد، با توجه به روابطی که برای محاسبه ضریب انتقال حرارت نانوسیال و جسم جامد در کتب مرجع محیط متخلخل [۹۲] پیشنهاد شده است و به شرح زیر است مقدار ضریب انتقال حرارت نانوسیال و جسم ۵۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

$$h_{fs} = a_{fs} h^* \quad (۵-۶)$$

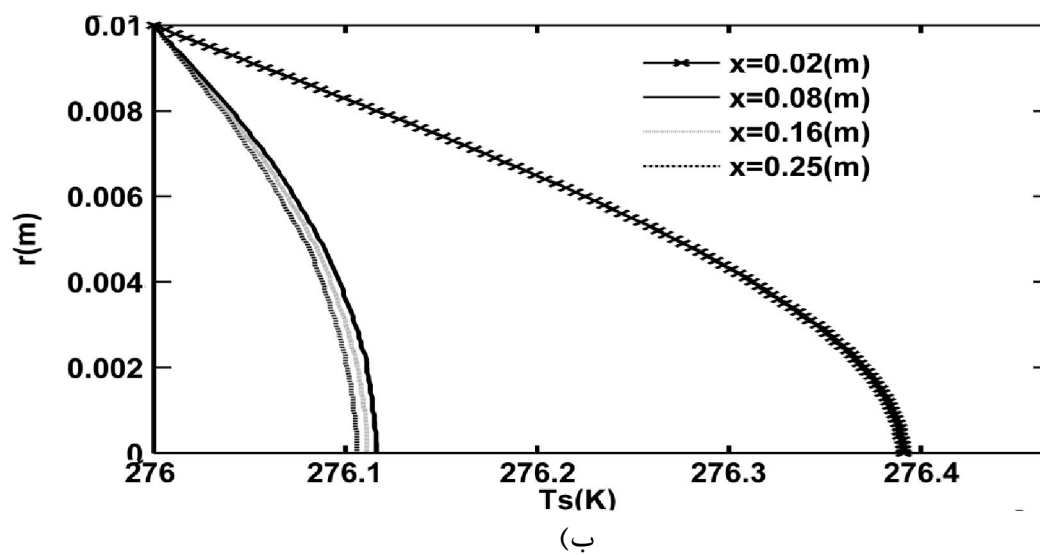
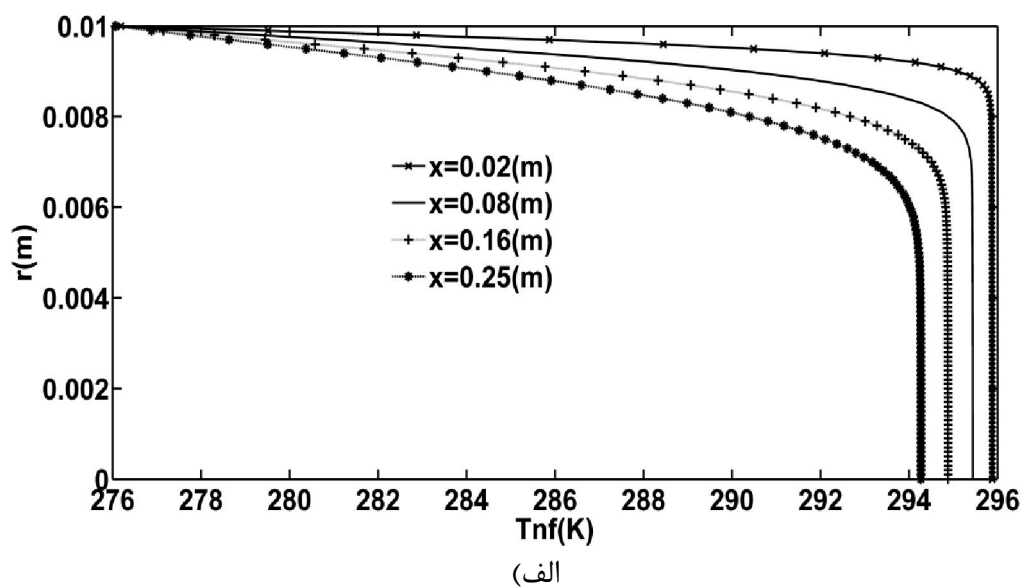
$$a_{fs} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (۵-۷)$$

$$\frac{1}{h^*} = \frac{d_p}{Nu_{fs} k_{nf}} + \frac{d_p}{10k_s} \quad (۵-۸)$$

$$Nu_{fs} = \left(\frac{0.255}{\varepsilon} \right) Pr^{\frac{1}{3}} Re_p^{\frac{2}{3}} \quad (۵-۹)$$

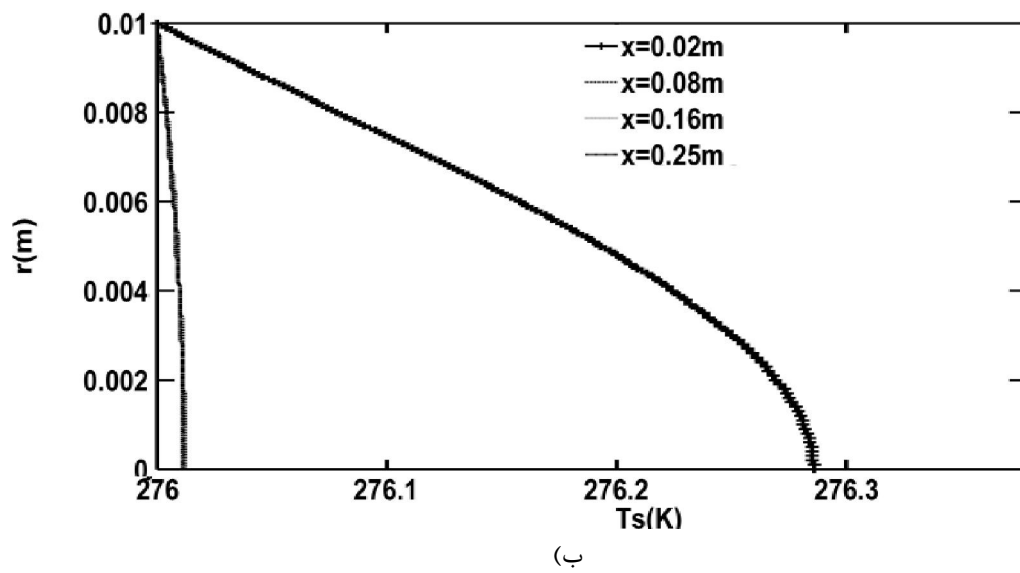
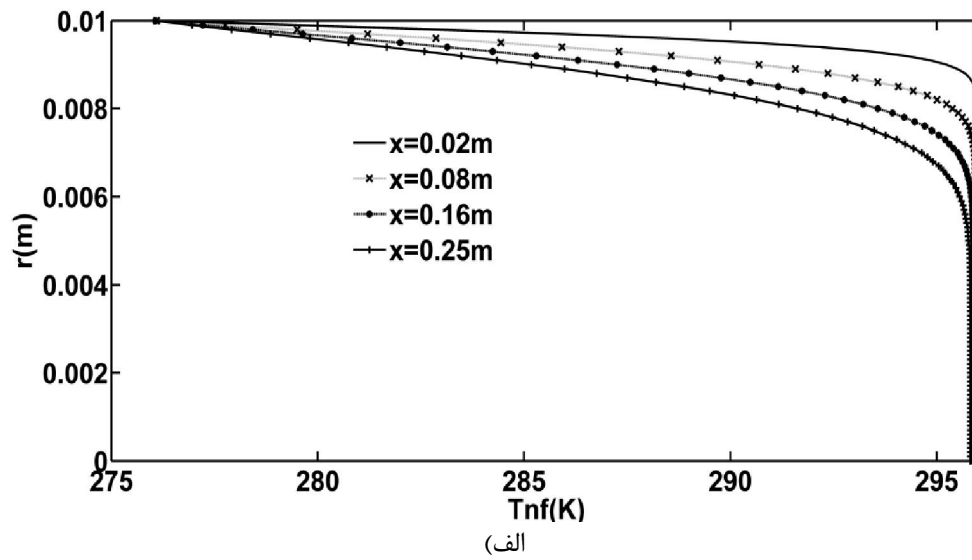
که در آن a_{fs} سطح تماس نانوسیال و جسم جامد، d_p قطر حفره (با توجه به لوله متخلخل مورد آزمایش قطر حفره دارای ابعاد چند میلی متری است) و Re_p عدد رینولدز بر اساس قطر حفره است. مابقی پارامترها در فصول قبل معرفی شده اند.

در شکل ۵-۴ تغییرات دمای نانوسیال و جسم جامد آورده شده است. همانطور که در شکل ۵-۴ مشاهده می شود پروفیل دمای جسم جامد در مقاطع مختلف به جز ابتدای لوله تغییر محسوسی نداشته و پروفیل دمای نانوسیال نیز تغییرات اندکی دارد. در h_{fs} برابر ۵۰۰۰۰ همانطور که در شکل مشاهده می شود دمای نانوسیال در مقطع خروجی تقریباً دو درجه با دمای نانوسیال در مقطع ورودی اختلاف دارد و این مقدار در کار تجربی نیز به دست آمده است.

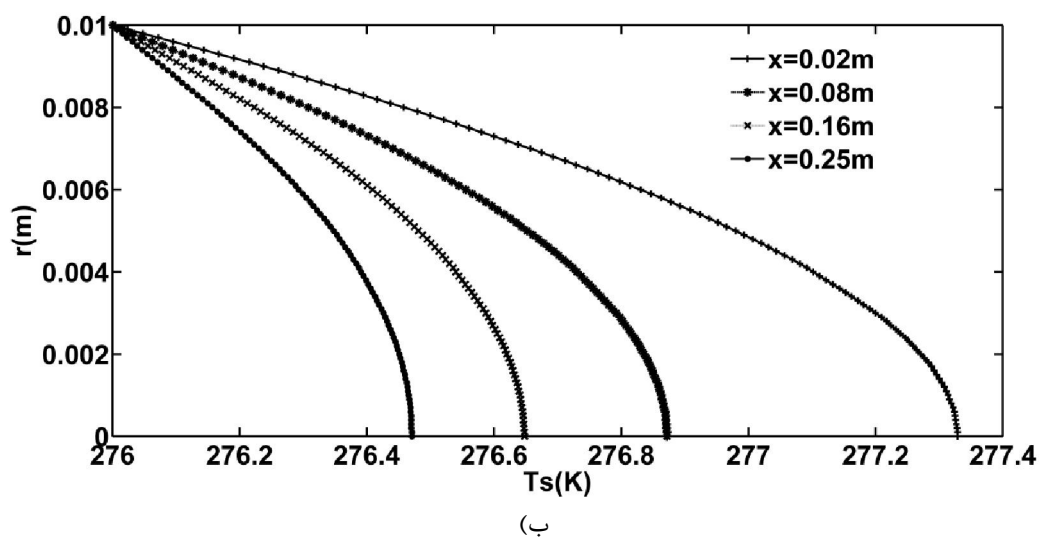
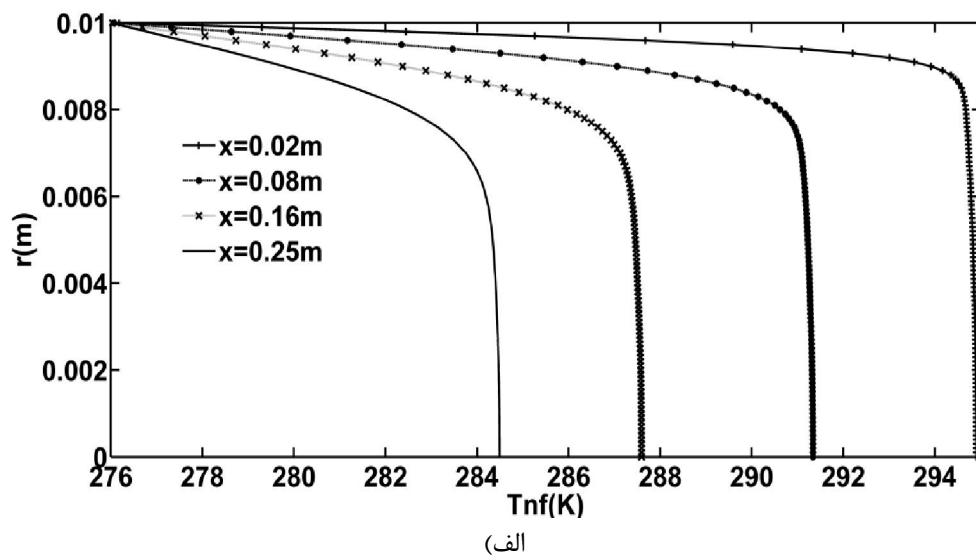


شکل ۴-۵: توزیع دما برای $h_{fs} = 50000$ الف) نانوسیال ب) جسم جامد

تأثیرات ضریب انتقال حرارت بر روی دمای نانوسیال و جسم جامد در شکلهای زیر آمده است:



شکل ۵-۵: توزیع دما برای $h_{fs} = 5000$ الف) نانوسیال ب) جسم جامد

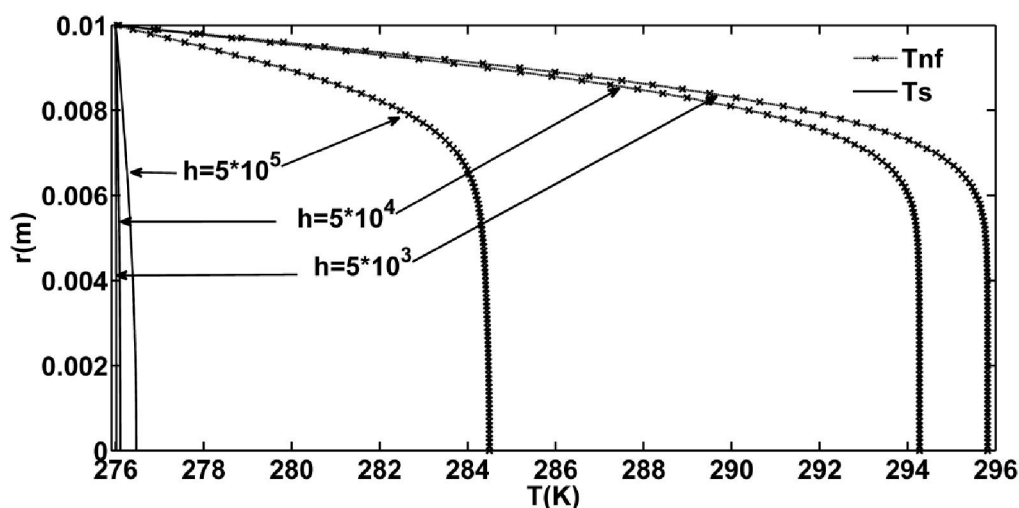


شکل ۵-۶: توزیع دمای نانوسیال و جسم جامد برای $h_{fs} = 500000$

همانطور که در شکل‌های ۵-۴ الی ۵-۶ مشاهده می‌شود با افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال و جسم جامد دمای نانوسیال و جسم جامد به هم نزدیک شده و به عبارت دیگر به شرایط تعادل حرارتی نزدیک می‌شوند. پروفیل دمای جسم جامد در h_{fs} برابر ۵۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ در مقاطع مختلف به جز ابتدای لوله تغییر محسوسی نداشته و پروفیل دمای نانوسیال نیز تغییرات اندکی دارد. در h_{fs} برابر ۵۰۰۰۰ همانطور

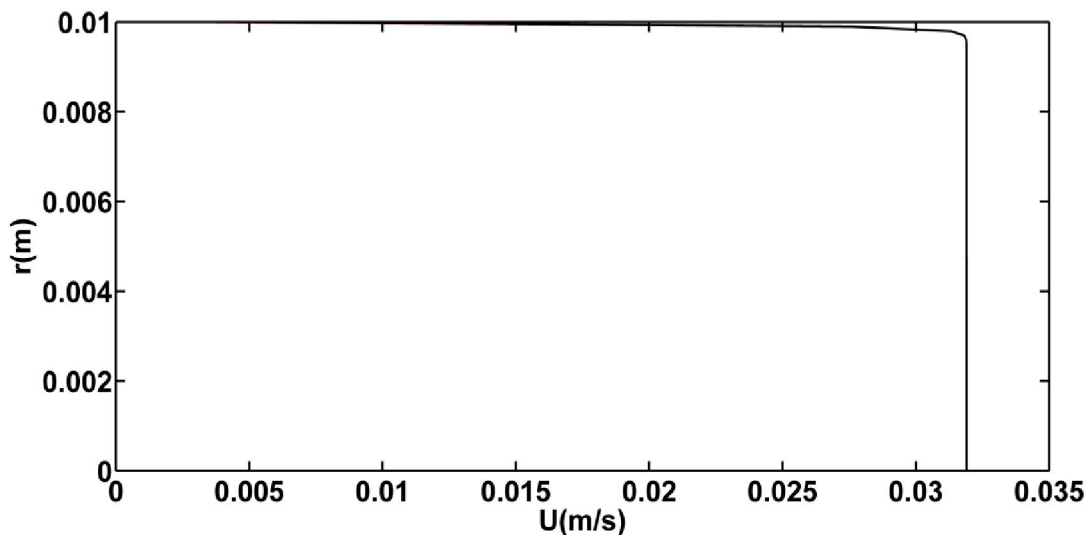
که اشاره شد دمای نانوسیال در مقطع خروجی تقریباً دو درجه با دمای نانوسیال در مقطع ورودی اختلاف دارد و این مقدار در کار تجربی به دست آمده است.

در شکل ۵-۷ پروفیل دمای نانوسیال و جسم جامد در مقطع خروجی و در مقادیر مختلف ضریب انتقال حرارت نانوسیال و جسم جامد آورده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است با افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال و جسم جامد دمای نانوسیال و جسم جامد به هم نزدیک می‌شوند.



شکل ۵-۷: دمای نانوسیال و جسم جامد در مقطع خروجی و در مقادیر مختلف ضریب انتقال حرارت نانوسیال و جسم جامد

شکل ۵-۸ توزیع سرعت در ناحیه توسعه یافته را نشان می‌دهد. سرعت در ابتدای لوله توسعه یافته می‌شود و در بخش اعظمی از لوله سرعت توسعه یافته است.



شکل ۵-۸: توزیع سرعت در لوله متخلخل

۵-۵- مقایسه مدل‌های پیشنهادی با نتایج تجربی:

در این بخش از رساله نتایج منتج از حل عددی لوله با نتایج تجربی مقایسه شده است. در کار تجربی لوله در حمام آب و یخ قرار گرفت و جداره لوله دمای حدود ۳ درجه سانتی‌گراد را دارا بود. نانوسیال آلومینا/آب با کسر حجمی نیم‌درصد و در دمای اتاق (۲۳ درجه سانتی‌گراد) وارد لوله پر شده از فوم آلومینیومی با ضریب تخلخل نیم شده است و با دمای مرکزی حدود ۲۱/۶ خارج شده است. با توجه به رابطه زیر می‌توان مقدار تقریبی شار حرارتی را محاسبه کرد.

$$q'' = \frac{\dot{m} C_p (T_{in} - T_{out})}{\pi D L} \quad (۵-۱۰)$$

مقدار شار حرارتی در کار تجربی برابر است با: $q'' = 9457 \frac{W}{m^2}$.

مدل‌های پیشنهادی در قسمت ۱-۲-۳ برای حالتی که انتقال حرارت نانوذره/ سیال و نانوذره و جسم جامد ناچیز است و قابل صرف‌نظر کردن است به‌صورت زیر است:

$$q''_{m,1} = \varepsilon k_{nf} \left(\frac{\partial T_{nf}}{\partial y} \right)_{wall} + (1 - \varepsilon) k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_{wall} \quad (11-5)$$

$$q''_{m,2} = (\varepsilon k_{nf} + (1 - \varepsilon) k_s) \left(\frac{\partial T_{nf}}{\partial y} \right)_{wall} \quad (12-5)$$

$$q''_{m,3} = (\varepsilon k_{nf} + (1 - \varepsilon) k_s) \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_{wall} \quad (13-5)$$

برای محاسبه مقادیر شار حرارتی پیشنهادی در روابط (۱۱-۵) الی (۱۳-۵) مقدار ضریب هدایتی نانوسیال

از مقدار پیشنهادی کار تجربی برابر $0.65 \frac{W}{mK}$ قرار داده شد و مقدار ضریب هدایتی آلومینیوم $204 \frac{W}{mK}$

اختیار شده است. با توجه به اینکه مدل اول از هر دو گرادیان دمای نانوسیال و جسم جامد و همچنین

ضریب هدایت نانوسیال و جسم جامد سهم دارد به نظر کاملترین مدل است و این امر مورد بررسی قرار

گرفت و نتایج نشان دادند مدل اول با مقدار شار حرارتی $10848 \frac{W}{m^2}$ و ۱۲ درصد اختلاف با شار حرارتی

منتج از روش تجربی کاملترین مدل است.

ولی به نظر می‌رسد که مدل‌ها بر اساس مقادیر مختلف ضریب هدایت ممکن است نتایج گوناگونی

داشته باشند و به قطعیت رسیدن و پیشنهاد مدل نهایی نیازمند تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ای با

بازه‌ی وسیعی از نانوسیال‌ها و محیط‌های متخلخل با جنس‌های مختلف و خواص تخلخل متفاوت است.

بحث و نتیجه گیری:

در این رساله انتقال حرارت نانوسیالات درون کانال متخلخل در حالت تعادل و عدم تعادل حرارتی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. برای مدلسازی انتقال حرارت از مدل بونگیورنو (در این مدل اثرات حرکت براونی و ترموفورز به معادله کلاسیک انرژی افزوده می شود) استفاده شده است. برای حالت تعادل حرارتی اثرات مهاجرت نانوسیال بر روی انتقال حرارت بررسی شد و نتایج افزایش عدد ناسلت را به ازای افزایش مهاجرت نانوذرات نشان دادند. همچنین با افزایش عدد اشمیت توزیع غیر یکنواخت نانوذرات به سمت توزیع یکنواخت ورودی پیش می رود و در نتیجه انتقال حرارت کاهش می یابد.

نتایج حاصل از مدل بونگیورنو با مدلسازی تکفازی نانوسیالات نیز مقایسه شد و نتایج نشان دادند که مهاجرت نانوذرات نقش مهمی در افزایش انتقال حرارت نسبت به مدل تکفازی دارد. در حالت عدم تعادل حرارتی بین فازها و با شرط دمای ثابت دیواره چهار مدل برای محاسبه شار ارائه شده است و تاثیرات عدد نیلد و مهاجرت نانوذرات بر روی انتقال حرارت نانوسیالات در محیط متخلخل و در حالت عدم تعادل حرارتی نیز بررسی شد. نتایج نشان دادند با افزایش عدد نیلد شار حرارتی سیال افزایش یافته ولی شار حرارتی جامد و نانوذره کاهش می یابد.

در حالت عدم تعادل حرارتی و با شرط شار ثابت روی دیواره سه مدل برای محاسبه سهم شار هر کدام از فازها ارائه شده است. نتایج نشان دادند که مدل های ۲ و ۳ رفتاری شبیه به هم دارند و با مدل ۱ کاملاً متفاوت هستند. مدل ۲ بیشترین مقدار را برای دمای بی بعد نانوذره نتیجه می دهد و مدل ۳ بیشترین مقدار را برای دمای بی بعد جسم جامد نتیجه می دهد و این در حالیست که دمای بی بعد سیال بیشترین مقدار را از مدل اول تجربه می کند.

برای بررسی مدل های پیشنهادی در حالت دمای ثابت دیواره نتایج عددی برای لوله متخلخل به دست آمد و با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج نشان دادند که مدل اول به واقعیت نزدیکتر است.

نتایج تجربی نیز برای لوله متخلخل با شار ثابت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان دادند که افزودن ۰/۵ درصد نانوذره آلومینا در آب باعث افزایش ۱۷ درصدی انتقال حرارت آب می‌شود.

پیشنهادهای و کارهای آینده:

با توجه به اینکه رساله حاضر در زمینه انتقال حرارت اجباری نانوسیالات در محیط متخلخل پیشگام است، موارد بسیاری برای تحقیقات آینده موجود است که در ذیل به برخی از آنها اشاره می‌شود:

- ۱- در نظر گرفتن فرض نسبت تخلخل متغیر و حل معادلات در حالت تعادل و عدم تعادل حرارتی.
- ۲- در نظر گرفتن فرض محیط متخلخل موضعی و حل معادلات فوق.
- ۳- بررسی انتقال حرارت اجباری در محیط متخلخل هندسه‌های مختلف.
- ۴- استفاده از روش تفاضل محدود فشرده و حل معادلات.
- ۵- بررسی اثرات جنس محیط متخلخل بر روی انتقال حرارت (آزمایشگاهی).
- ۶- راهکارهای افزایش پایداری نانوسیال در محیط متخلخل برای امکان آزمایش نانوسیال با کسر حجمی بالاتر از ۱٪ (آزمایشگاهی).
- ۷- بررسی تنوع سیال پایه بر روی انتقال حرارت (عددی و آزمایشگاهی).
- ۸- بررسی تنوع نانوذره بر روی انتقال حرارت (عددی و آزمایشگاهی).

پیوست: مفاهیم فیزیکی متغیرها

همانطور که در رساله اشاره شد و با استناد به مقاله بونگیورنو [۴۰] نفوذ براونی و اثرات ترموفورز مهمترین علل افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات هستند. در این بخش مفاهیم و تعابیر فیزیکی و محدوده تغییرات این دو ضریب و همچنین اعداد بی بعد مورد بحث در رساله بررسی می شوند.

۱- ضریب نفوذ براونی: ضریب نفوذ براونی به صورت زیر به دست می آید

$$D_B = \frac{K_B T_{nf}}{3\pi\mu_{nf}d_p} \quad (1)$$

که صورت رابطه (۱) از جنس سنیتیک انرژی است و واحد آن نیوتن در متر است و واحد ضریب نفوذ براونی متر مربع بر ثانیه است. برای نانوذره با قطر ۱-۱۰۰ نانومتر و سیال پایه آب و در هوای اتاق ضریب نفوذ براونی در محدوده زیر تغییر می کند [۴۰].

$$4 \times 10^{-12} \leq D_B \leq 4 \times 10^{-10} \quad (2)$$

۲- ضریب نفوذ حرارتی (ترموفورز):

$$D_T = \beta \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \varphi \quad (3)$$

$$\beta = 0.26 \frac{k_f}{2k_f + k_p} \quad (4)$$

همانطور که از روابط (۳ و ۴) مشخص است ضریب ترموفورز برای نانوسیالات مختلف و کسر حجمی مختلف مقادیر متفاوتی دارد و محدوده تغییر آن از مرتبه 10^{-11} الی 10^{-8} می باشد.

اعداد بی بعدی که تأثیرات آنها بر روی انتقال حرارت جابجایی در این رساله مورد بررسی قرار گرفته اند از قرار زیر است:

۳- عدد لوئیس: عدد لوئیس بیانگر نسبت نفوذ گرمایی به نفوذ مولکولی می‌باشد و با توجه به رابطه (۸-۲) در یک محیط متخلخل با جنس مشخص با تغییر ضریب نفوذ براونی و کسر حجمی نانوسیال تغییر می‌کند با توجه به اینکه k_m از مدلهای مختلف مقادیر مختلفی به دست می‌دهد و با توجه جنسهای مختلف جسم جامد k_m در محدوده ۱ الی ۱۰۰ متغیر بوده و بنابراین عدد لوئیس در بازه ۱۰۰۰ الی 10^6 تغییر می‌کند. در بازه ذکر شده تغییرات توزیع دمای سیال و توزیع کسر حجمی کم است فلذا در این رساله محدوده تغییرات بیشتر از محدوده فوق است و تغییرات برای اعداد لوئیس کمتر از ۱۰۰۰ نیز بررسی شده‌اند.

۴- عدد اشمیت: عدد اشمیت بیانگر نسبت نفوذ مومنتوم به نفوذپذیری جرمی است و وقتی مقدار آن بسیار زیاد باشد به این مفهوم است که نانوذره توزیع ورودی را در کانال نیز حفظ می‌کند. با توجه به رابطه (۸-۲) با تغییر ضریب نفوذ براونی تغییر می‌کند. در بازه ذکر شده در مرجع [۴۰] تغییرات توزیع دمای سیال و توزیع کسر حجمی بسیار کم است فلذا در این رساله محدوده تغییرات بیشتر از محدوده فوق است و تغییرات برای اعداد اشمیت کمتر از کمینه مقدار مرجع [۴۰] نیز بررسی شده‌اند.

۵- نسبت نفوذ اصلاح شده: بیانگر نسبت نفوذ براونی به نفوذ ترموفورز است و با توجه به مرجع [۴۰] برای نانوسیال آلومینا در آب با قطر نانوذره ۱۰ نانومتر و کسر حجمی ۰/۱ مقدار آن در بازه ۰/۲ تا ۲ قرار دارد.

۶- عدد نیلد: عدد بی بعد نیلد بیانگر پارامتر انتقال حرارت بین سیال و جسم جامد و سیال و نانوذره است و بسیار وابسته به ضریب انتقال حرارت موثر (h_{fs}) است که در فصل پنجم نحوه محاسبه آن آمده است. همانطور که در مرجع [۹۲] آمده است بازه تغییرات عدد نیلد از یک تا بینهایت است و عدد نیلد بینهایت تعبیر دیگری از تعادل حرارتی است.

- [1] Choi, S.U.S. (2002) "Two are better than one in nanofluids", **Argonne National Laboratory**, <http://at.knu.ac.kr/Colloquium.pdf>
- [2] Keblinski, P., Eastman, J. A., Cahill, D.G. (2005) "Nanofluids for thermal transport", **Mater. Today**, 8, pp. 36-44.
- [3] Putra, N., Roetzel, W., Das, S. K. (2003), "Natural Convection of Nanofluids", **Heat Mass Trans.**, 39, pp. 775-784.
- [4] Eastman, J., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. J., (2001) "Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene-Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," **Appl. Phys. Let.**, 78, pp. 718-720.
- [5] Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., and Roetzel, W. (2003) "Temperature dependence of Thermal conductivity enhancement for nanofluids", **ASME J. of Heat Trans.**, 125, pp. 567-574.
- [6] Pak, B. C., and Cho, Y. I., (1998) "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles," **Exp. Heat Transfer**, 11, pp. 151-170.
- [7] Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., Choi, S. U. S., (2008) "Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements", **Heat Trans. Eng.**, 29, pp. 432-460.
- [8] Wang, X., Xu X., Choi S. U. S.(1999) "Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture", **J. Thermophys. Heat Trans.**, 13, pp. 474-480.
- [9] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., and Hishinuma, N., (1993) "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ Ultra-Fine Particles)," **Netsu Bussei**, 4, pp. 227-233.
- [10] Maxwell-Garnett, J. C., (1904) "Colours in Metal Glasses and in Metallic Films," **Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A**, 203, pp. 385-420.
- [11] Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., Eastman, J. A., (1999) "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles". **ASME J. of Heat Trans.**, 121, pp. 280-289.
- [12] Hamilton, R. L., and Crosser O. K. (1962) "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems", **Ind. Eng. Chem. Fundam.**, 1, pp. 187-191.

- [13] Xuan, Y. and Li, Q., (2000) "Heat transfer enhancement of nanofluids". **Int. J. Heat Fluid Flow**, 21, pp. 58-64.
- [14] Wang, B. X., Zhou, L. P., Peng, X. F., (2003) "A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles". **Int. J. Heat Mass Trans.**, 46, pp. 2665-2672.
- [15] Xue, Q. Z. (2003) "Model for effective thermal conductivity of nanofluids", **J. Phys. Lett.**, A, 307, pp. 313-317.
- [16] Choi, S. U. S., Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, and E. A. Grulke (2001). "Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions", **Appl. Phys. Lett.**, 79, pp. 2252-2254.
- [17] Xie, H. Q., Wang, J. C., Xi, T. G., Liu, Y., Ai, F., and Wu, Q. R. (2002) "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles", **J. Appl. Phys.**, 91, pp. 4568-4572.
- [18] Yu, W., Choi, S. U. S., (2003), "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model", **J. Nanoparticle Res.**, 5, pp. 167-171.
- [19] Das, S. K., Putra, N., and Roetzel, W. (2003). "Pool boiling characterization of nanofluids", **Int. J. Heat Mass Trans.**, 46, pp. 851-862.
- [20] Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Soye, G., Thompson, L.J., DiMelfi, R.J.,(1999) "Novel thermal properties of nanostructure materials", **Material Sci. Forum** 312, pp. 629-634.
- [21] Wen, D. and Ding, Y., (2004) "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions". **Int. J. Heat and Mass Trans.**, 47, pp. 5181-5188.
- [22] Zeinali Heris, S., Etemad, S.Gh., Nasr Esfahany, M., (2006). "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer", **Int. Comm. in Heat and Mass Trans.**, 33, pp. 529.
- [23] Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M., and Etemad, S. Gh., (2007), "Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Al₂O₃/Water Nanofluid in Circular Tube," **Int. J. Heat Fluid Flow**, 28, pp. 203-210.
- [24] Lai WY, Duculescu B, Phelan PE, Prasher RS. Convective heat transfer with nanofluids in a single 1.02-mm tube. In: Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2006); 2006.

- [25] Jung J-Y, Oh HS, Kwak HY. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. In: Proceeding of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2006); 2006.
- [26] Williams, W., Buongiorno, J., Hu, L-W. (2008) “Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/ water nanoparticle colloids in horizontal tubes”. **ASME J. of Heat Trans.**, 130, pp. 1-7.
- [27] Xuan, Y., and Li, Q., (2003) “Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids.” **ASME J. of Heat Trans.**, 125, pp. 151-155.
- [28] Xuan, Y., Li, Q., (2004) “Flow and heat transfer performances of nanofluids inside small hydraulic diameter flat tube.” **J. of Eng. Thermophy.**, 25, pp. 305-307.
- [29] Zhou, D.W., (2004) “Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation”. **Int. J. Heat and Mass Trans.**, 47, pp. 3109-3117.
- [30] Li, Q., Xuan, Y., Jiang, J., Xu, J.W., (2005) “Experimental investigation on flow and convective heat transfer feature of a nanofluid for aerospace thermal management.” **J. of Astronautics**, 26, pp. 391-394.
- [31] Faulkner, D., Rector, D.R., Davison, J.J., Shekarriz, R., Enhanced heat transfer through the use of nanofluids in forced convection. In: Proceedings of ASME Heat Transfer Div; 2004. pp. 219-224.
- [32] Yang, Y., Zhang, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B., Wu, G., (2005) “Heat transfer properties of nanoparticles-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow.” **Int. J. Heat and Mass Trans.**, 48, pp. 1107-1116.
- [33] Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R.A., (2006) “Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids).” **Int. J. Heat and Mass Trans.**, 49, pp. 240-250.
- [34] Duangthongsuk, W., Wongwises, S., (2008) “Effect of thermo-physical properties models on the prediction of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid.” **Int. Comm. in Heat and Mass Trans.**, 35, pp. 1320-1326.
- [35] Jang, S.P., Choi, S.U.S., (2004) “Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids.” **App. Physics Let.**, 84, pp.4316-4318.
- [36] Duangthongsuk, W., Wongwises, S., (2009) “Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger.” **Int. J. Heat and Mass Trans.**, 52, pp.2059-2067.

- [37] Choi, S., Zhang, Z., Yu, W., Lockwood, F., Grulke, E., (2001) "Anomalously thermal conductivity enhancement of in nanotube suspensions." **App. Phy. Let.** 79, pp.2252-2254.
- [38] Xuan, Y., and Roetzel, W., (2000), "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids," **Int. J. Heat Mass Trans.**, 43,19, pp. 3701-3707.
- [39] Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M., (2003) "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids." **Int. J. Heat Mass Trans.**, 46, pp.3639-3653.
- [40] Buongiorno, J., (2006) "Convective heat transfer enhancement in nanofluids." Heat and Mass Transfer Conference, January, HMT-2006-C335.
- [41] Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M., Galanis, N., (2007) "Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using two phase approach." **Int. J. Heat Fluid Flow**, 28,2, pp. 211-219.
- [42] Maiga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G., (2004) "Heat transfer behaviors of nanofluids in a uniformly heated tube." **Superlattices and Microstructures**, 35, pp. 543-557.
- [43] Roy, G., Nguyen, C.T., Lajoie, P.R., (2003) "Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids." **Superlattices and Microstructures**, 35, pp. 497-511.
- [44] Ding, Y. and Wen, D., (2005) "Particle migration in a flow of nanoparticles suspensions." **Powder Technology**, 149, pp.84-92.
- [45] Kim, J., Kang, Y.T., Choi, C.K., (2007) "Soret and Dufour effects on convective instabilities in binary nanofluids for absorption application." **Int. J. of Refrigeration**, 30,2, pp.323-328.
- [46] Mansour, R.B., Galanis, N., Nguyen, C.T., (2007) "Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids." **App. Ther. Eng.**, 27,1, pp.240-249.
- [47] Prakash, M. and Giannelis, E.P., "Mechanism of heat transfer in nanofluids." **J. of Computer-Aided Materials Design**. doi:10.1007/s10820-006-9025-x.
- [48] Heyhat, M.M. and kowsary, F., (2010) "Effect of particle migration on flow and convective heat transfer of nanofluids flowing through a circular pipe." **ASME J. Heat Trans.**,132, pp. 062401-9.

- [49] Kim, S.Y., koo, .J.M, kuznesov, .A.V. (2001) “effect of an isotropy in permeability and effective thermal conductivity on thermal performance of an aluminum foam heat sink.” **Numer Heat Transf.A.**, 40, pp. 21-36.
- [50] Kim, S.Y., koo, J.M., kuznesov, A.V. (2003) “optimization of pin-fin heat sinks using an isotropic local thermal non equilibrium porous model model in a jet impinging channel.” **Numer Heat Trans. A.**, 44, pp. 771-787.
- [51] Abbassi, H. and Aghanajafi, C., (2006) “evaluation of heat transfer augmentation in a nanofluid – cooled microchannel heat sink.” **J. fusion energy**, 25, pp. 187-197.
- [52] Tsai, T. and Chein, R., (2006) “performance analysis of nanofluid-cooled micro channel heat sinks.” **Int. J. Heat Fluid Flow**, 28, pp. 1013-1026.
- [53] Ghazvini, M., Akhavan –behabadi, M.A, Esmaeili, M. (2009) “the effect of viscous dissipation on laminar nanofluid flow in a microchannel heat sink.” **Ime.j.meck.eng.sei.**, 223, pp. 2697-2706.
- [54] Ghazvini, M. and Shokouhmand, H., (2009) “investigation of a nanofluid-cooled micro channel heat sink using fin and porous media approaches.” **Energy. Convers. Manag.**, 50, pp. 2373-2380.
- [55] Salloum, M., Mar, H., Weeks, D., Zhu, L., (2008) “controlling nanoparticle delivery in magnetic nanoparticle hyper thermia for cancer treatment: experimental study in agarose gel”. **Int. J. Hyper Thermia.**, 24, pp. 337-345.
- [56] Salloum, M., Mar, H., Zhu, L., (2008) “aum-vivo experimental study of emperawe elevations in animal use Sue during managncue nanoparticle hyperthermia”. **Int. J. Hyper Thermia.** 24, pp. 589-593.
- [57] Salloum, M., Mar, H., Zhu, L., “enhancement in treatment planning for magnetic nanoparticle hyperhemia optimization of the heat absorption pattern.” **Int. J. Hyper Thermia.** 25, pp. 309-321.
- [58] kuznetsov A.V., Niled D.A., (2010) “The Onset of Double-Diffusive Nanofluid Convection in a Layer of a Saturated Porous Media.” **Trans. In Porous Med.**, 85, pp. 941-951.
- [59] Chakama, A., Gorla, R.S.R., Ghodeswar, K., (2011) “Non-similar solution for natural convection boundary layer flow over a sphere Embedded in a porous medium saturated with a nanofluid.” **Trans. In Porous Med.**, 86, pp. 13-22.

- [60] kuznetsov, A.V., Nield D.A., (2010) "Effect of local thermal non-equilibrium on the onset of convection in a porous medium layer saturated by a nanofluid." **Trans. In Porous Med.**, 83, pp. 425-436.
- [61] Kuznetsov, A.V., Nield, D.A., (2010) "Thermal instability in a porous medium saturated by a nanofluid: Brinkman model." **Trans. In Porous Med.**, 81, pp. 409-422.
- [62] Kuznetsov, A.V., Nield, D.A., (2011) "the effect of local thermal non-equilibrium on the onset of convection in a porous medium layer saturated by a nanofluid: Brinkman model." **J. Porous Med.**, 14, pp. 285-293.
- [63] Nield, D.A., Kuznetsov, A.V., (2009) "Thermal instability in a porous medium layer saturated by a nanofluid", **Int. J. Heat Mass Trans.** 52, pp. 5796-5801.
- [64] Tham L., Nazar R., (2012) "Mixed convection flow about a solid sphere embedded in a porous medium filled with a nanofluid", **sains Malaysiana**. 41, pp. 1643-1649.
- [65] Rosca, A.V., Rosca, N.C., Grosan, T., Pop, I., (2012) "Non-Darcy mixed convection from a horizontal plate embedded in a nanofluid saturated porous medium". **Int. J. Comm. Heat Mass Trans.** 39, pp. 1080-1085.
- [66] Sun, Q., Pop, I., (2011). "Free convection in a triangle cavity filled with a porous medium saturated a nanofluid with flush mounted heater on the wall", **Int. J. Therm. Sci.**, 50, pp. 2141-2153.
- [67] Rashad A.M., Chamkha A.J., Abdou M.M.M., (2013). "Mixed convection flow of non-newtonian fluid from vertical surface saturated in a porous medium filled with a nanofluid", **J. of App. Fluid Mech.**, 6, pp. 301-309.
- [68] Chamkha, A.J., Abbasbandy, S., Rashad, A.M., Vajravelu, K. (2013). "Radiation effects on mixed convection about a cone embedded in a porous medium filled with nanofluid", **Meccanica**. 48, pp. 275-285.
- [69] Nield, D.A., Kuznetsov, A.V., (2014). "Forced convection in a parallel-plate channel occupied by a nanofluid or a porous medium saturated by a nanofluid", **Int. J. Heat Mass Trans.**, 70, pp. 430-433.
- [70] Maghrebi, M.J., Nazari, M., Armaghani, T. (2012) "Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel." **Trans. In Porous Med.**, 93, pp. 401-413.
- [71] Nield, D.A., Kuznetsov, A.V., Ming Xiong (2003) "Thermally developing forced convection in a porous medium: parallel plate channel with walls at uniform temperature, with axial conduction and viscous dissipation effects." **Int. J. Heat Mass Trans.** 46, pp. 643-651.

[72] Vadasz, P., (2006) "Heat conduction in nanofluid suspension." **ASME J. of Heat Trans.** 128, pp. 465-477.

[73] Niled, D.A., (1998) "Effects of local thermal nonequilibrium in steady convective processes in a saturated porous medium: Forced convection in a channel." **J. Porous Med.** 1, pp. 181-189.

[74] Epperson, J.F., (2010) "**An introduction to numerical methods and analysis.**" John Wiley & Sons.

[75] Patankar, S.V., (1980) "**Numer. Heat Trans. Fluid Flow.**" Hemisphere, New York.

[76] Kuznetsov, A.V., (1998) "Analytical study of fluid flow and heat transfer during forced convection in a composite channel partly filled with a Brinkman-Forchheimer porous medium." **Flow, Turbulence and Combustion**, 60, pp. 173-192.

[77] Shah, R.K., London, A. L., (1978) "**Laminar Flow Forced Convection in Ducts, supplemental to advances heat transfer.**" Academic, New York.

[۷۸] ارمغانی ط.، مغربی م.ج. و نظری م.، مقایسه انتقال حرارت تکفازی و دوفازی نانوسیالات در کانال متخلخل، پذیرفته شده در مجله مدل سازی در مهندسی.

[79] Nazari, M., Maghrebi, M.J., Armaghani, T., "Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel: Three-Phase Approach." **Submitted to Meccanica.**

[80] Alazmi, B., Vafai, K., (2002) "Constant wall heat flux boundary condition in porous media under local thermal non-equilibrium conditions." **Int. J. Heat Mass Trans.** 45, pp. 3071.

[81] Armaghani, T., Chamkha, A.J., Maghrebi, M.J., Nazari, M., (2014) "Numerical Analysis of a Nanofluid Forced Convection in a Porous Channel: A New Heat Flux Model in 'L.T.N.E.' Condition," **J. Porous Med. to be appeared in 2014.**

[82] Armaghani, T., Maghrebi, M.J., Chamkha, A.J., Nazari, M., (2014) "Effects of nanoparticles migration on Forced Convection Heat Transfer in a Non-Thermal Equilibrium Porous Channel," **J. Of Nanofluids**, 3, pp. 51-59.

[83] Nazari, M., Maghrebi, M.J., Armaghani, T., Chamkha, A.J., "New Models for Heat Flux Splitting at the Boundary of a Porous Medium: Three Energy Equations for Nanofluid Flow under Local Thermal Non-Equilibrium Condition, **Canadian J. of Phys. to be appeared in 2014.**

[84] Amiri, A., Vafai, K., Kuzay, TM. (1995) "Effects of boundary condition on non-darcian heat transfer through porous media and experimental comparison." **Numer Heat Trans. A.**, 27, pp. 651-664.

[۸۵] سلطانزاده ح، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال در جریان جابجایی اجباری درون یک لوله افقی"، دانشکده مکانیک، دانشگاه شاهرود.

[86] Gnielinski, V., (1976), "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", **Int. Chem. Eng.** 16, pp. 359-365.

[87] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., (2002) "**Introduction to Heat Transfer**," John Wiley & Sons, New York. pp. 459–463.

[88] Yu, W. and Choi, S.U.S., (2003) "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated maxwell model," **J. of Nanoparticle Res.**, 5, pp. 167-171.

[89] Nguyen, C.T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Mare, T., Boucher, S., Angue Mintsa, H., (2007) "Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids-Hysteresis phenomenon," **Int. J. Heat Fluid Flow**. 28, pp. 1492-1506.

[90] Amiri, A., Vafai, K. (1994) "Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non- Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media." **Int. J. Heat Mass Trans.**, 37, pp. 939-954.

[91] Haji-Sheikh, A., Vafai, K. (2004) "Analysis of flow and heat transfer in porous media imbedded inside various-shaped ducts." **Int. J. Heat Mass Trans.**, 47, pp. 1889-1905.

[92] Nield, D.A., Bejan, A., (2013) "**Convective in Porous Media**," Springer, pp. 36-39.

Abstract: In this study the forced convection heat transfer of nanofluid in occupied porous media is investigated numerically and experimentally. In numerical study: The fully-developed flow and steady Darcy-Brinkman-Forchheimer/ Darcy-Brinkman equation is employed in porous channel. The local thermal equilibrium model (LTE) and local thermal non-equilibrium (LTNE) models are assumed between nanofluid and solid phases. It is assumed that the nanoparticles are distributed non-uniformly inside the channel. As a result the volume fraction distribution equation is also coupled with governing equations. The results obtained by single phase and two phase model (Boungiorno model) are compared and discussed. The effects of parameters such as Lewis number, Schmidt number, Brownian diffusion and thermophoresis on the heat transfer are completely studied. The results show that the local Nusselt number is decreased when the Lewis number is increased. It is observed that as the Schmidt number is increased, the wall temperature gradient is decreased and as a consequence the local Nusselt number is decreased. The effects of Lewis number, Schmidt number and modified diffusivity ratio on the volume fraction distribution are also studied and discussed. In LTNE condition, the present work includes *three-equation energy model*, for fluid/particle/solid phases, in the porous channel. In constant temperature condition, four different heat flux models are proposed and compared together. As a result, the volume fraction distribution equation is also coupled with other governing equations. The effects of Nield number and modified thermal capacity ratio on the heat transfer are completely studied. The results show the fluid mean temperature is decreased by increasing the Nield number. On the other hand, the solid and nanoparticle temperature haven't significant change with various Nield numbers. Another indication pertains to the temperature gradient at the wall and the volume fraction of

particles at the channel center which found to exhibit an important role in the heat flux absorbed by fluid phase. By increasing Nield number, the fluid temperature gradient at wall is increased, therefore, at the wall region the thermophoresis diffusion is augmented and the particles migrate from the vicinity of the wall to the channel center. One of the challenging points in the simulation of nanofluid flowing through porous media is modeling the surface heat flux in the presence of nanoparticles and internal solid matrix. The question is that how much energy is absorbed by solid phase, fluid phase and particles at the surface of imposing heat flux? To reach a suitable answer, local thermal non-equilibrium approach (including three energy equations) is presented in this work and three heat flux models are proposed for the first time. The effects of particle volume fraction on heat transfer and pressure drop are also investigated experimentally. The numerical solution is used for investigation of heat transfer of nanofluid in pipe occupied by porous media and the proposed total heat fluxes obtained by numerical study are compared with experimental results. The results show the heat flux obtained by model 1 has nearest value to experimental data.

Keywords: Nusselt number, Particle migration, Brownian motion, Thermophoresis effect, LTE and LTNE.



Shahrood University of Technology

Faculty: Mechanical Engineering

**Forced Convection Heat Transfer of Nanofluid in Saturated Porous
Media**

Taher Armaghani

Supervisor:

Prof. Mohammad Javad Maghrebi

Advisor:

Dr. Mohsen Nazari

Date: March 2014