بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
گرایش تبدیل انرژی

شبیه سازی جریان و انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیالات به کمک روش شبکهٔ بولتزمن

استاد راهنما :
دکترمحمد رهنما

استاد مشاور :
دکتر امین بهزادمهر

مؤلف :
علیرضا شهریاری

شهریورماه ۱۳۹۰

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی مکانیک

دانشکدۀ فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو :

استاد راهنما :جناب آقای دکتر محمد رهنما

استاد مشاور :جناب آقای دکتر امین بهزادمهز

داور ۱ : جناب آقای دکتر مظفر علی مهرابیان

داور۲ : جناب آقای دکتر سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده :

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

این مجموعهٔ تحقیق و پژوهش را اگر ارج و منزلتی باشد تقدیم می‌کنم به پدرگرامی و مادر مهربانم که نعمت خداوند رحمان در زندگی‌ام بوده و هستند و به خواهر و برادران عزیزم که همواره مشوق من در طول تحصیل بوده‌اند.

تشکر و قدردانی :

سپاس خدای را که هر چه دارم از اوست به امید آنکه توفیق یابم جز در راه او نکوشم.
پژوهش حاضر حاصل بیش از یک سال تلاش مستمر اینجانب و اساتید محترم بوده که بی شک جز با عنایت پروردگار اتمام آن ممکن نبود. در این راستا بر خود لازم می‌بینم از زحمات استاد راهنما **جناب آقای دکتر محمد رهنما** و استاد مشاور **جناب آقای دکتر امین بهزادمهر** و **جناب آقای دکتر سعید جعفری** که مشوق و همراه من در به ثمر رسیدن این پژوهش بودند و از هیچ مساعدتی دریغ نفرمودند، تشکر و قدردانی کنم و از خداوند منان برای تمام این عزیزان آرزوی توفیقات روز افزون دارم.

علیرضا شهریاری
شهریور ماه ۱۳۹۰

چکیده :

در مطالعهٔ حاضر، انتقال حرارت جابجایی آزاد آرام یک نانوسیال در محفظهٔ دوبعدی با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن[1] مورد بررسی قرار گرفته است. اثر مدل‌های ویسکوزیته و هدایت حرارتی برای نانوسیال شامل نانوذرات اکسید آلومینیم(Al_2O_3) و اکسید تیتانیم(TiO_2) بررسی شده اند، هم چنین اثرات پارامترهای دمای نانوسیال و قطر نانوذرات بر روی مشخصات جریان و انتقال حرارت در انتها بررسی شده است. نتایج شبیه سازی حاضر توافق خوبی با نتایج دیگر کارهای عددی (با روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مرسوم CFD[2]) و کارهای تجربی را نشان می‌دهند.

هم چنین اثرات پارامترهایی چون کسر حجمی نانوذرات، عدد رایلی، نوع نانوذرات بر روی نمودارهای سرعت ، خطوط جریان ، خطوط همدما و نمودارهای عدد ناسلت مورد بحث قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که میدان‌های جریان و دما بطور قابل توجهی با حضور نانوذرات تغییر می کنند که تغییرات نمودارهای تابع جریان برای رایلی‌های کم و تغییرات عدد ناسلت(کاهش عدد ناسلت میانگین با حضور نانوذرات) در رایلی بالا، بیشتر است. هم چنین کاهش عدد ناسلت با کاهش قطر نانوذرات یا افزایش دمای نانوسیال بیشتر خواهد شد.

کلمات کلیدی: نانوسیال، روش شبکهٔ بولتزمن، انتقال حرارت جابجایی آزاد آرام، محفظهٔ مربعی

[1] Lattice Boltzamnn Method(LBM)
[2] Computational Fluid Dynamics(CFD)

فهرست مطالب

عنوان ---------- صفحه

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ نانوسیالات ۳

۱-۲-۱ فواید نانوسیالات ۴

۱-۲-۲ مشکلات نانوسیالات ۵

۱-۲-۳ نانوسیالات در مقالات ۵

۱-۳ تاریخچه تحقیقات قبلی ۵

۱-۴ هدف از مطالعه حاضر ۱۰

۱-۵ مطالب فصل‌های آینده ۱۱

فصل دوم: روش شبکه بولتزمن ۱۲

۲-۱ مقدمه ۱۳

۲-۲ روش شبکه بولتزمن ۱۴

۲-۳ روش شبکه گاز منشاء روش شبکه بولتزمن ۱۶

۲-۴ معادله بولتزمن برای میدان جریان ۱۹

۲-۵ معادله بولتزمن برای میدان دما ۲۳

۲-۶ نیروی خارجی ۲۴

۲-۷ اعداد بی بعد ۲۵

فصل سوم: معادلات حاکم برای خواص نانوسیالات ۲۷

۳-۱ مقدمه ۲۸

۳-۲ چگالی نانوسیالات ۲۸

۳-۳ ظرفیت حرارتی نانوسیالات ۲۸

۳-۴ ضریب انبساط حرارتی نانوسیالات ۲۸

۳-۵ لزجت دینامیکی نانوسیالات ۲۹

۳-۶ هدایت حرارتی نانوسیالات ۳۱

فصل چهارم: شبیه سازی جریان جابجایی آزاد آرام نانوسیال..... ۳۳
۴-۱ مقدمه..... ۳۴
۴-۲ معرفی مساله..... ۳۴
۴-۳ بررسی تعداد گره و معیار همگرایی..... ۳۶
۴-۴ اعتبار سنجی نتایج بری سیال خالص..... ۳۷
۴-۵ شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت برای نانوسیال..... ۳۹
۴-۵-۱ اثر نانوذرات بر روی نمودارهای سرعت..... ۴۰
۴-۵-۲ اثر نانوذرات بر روی نمودارهای خطوط جریان و خطوط همدما..... ۴۳
۴-۵-۳ اثر نانوذرات بر روی اعداد ناسلت میانگین..... ۴۶
فصل پنجم: تاثیر مدل‌های مختلف برای ویسکوزیته موثر و هدایت حرارتی موثر نانوسیال..... ۵۰
۵-۱ مقدمه..... ۵۱
۵-۲ مدل‌های ویسکوزیته موثر و هدایت حرارتی موثر نانوسیالات..... ۵۱
۵-۳ ترکیب‌های مختلف مدل‌های ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال..... ۵۲
۵-۴ بررسی اثر مدل‌های مختلف برای ویسکوزیته و هدایت حرارتی..... ۵۳
۵-۵ بررسی اثر مدل‌های مختلف بر روی نمودارهای خطوط جریان و خطوط همدما..... ۵۴
۵-۶ بررسی اثر مدل‌های مختلف بر روی اعداد ناسلت میانگین..... ۵۹
فصل ششم: بررسی تاثیر دمای نانوسیال و قطر نانوذرات..... ۶۴
۶-۱ مقدمه..... ۶۵
۶-۲ بیان مساله برای بررسی اثر قطر و دما..... ۶۵
۶-۳ اثرات قطر متوسط نانوذرات..... ۶۶
۶-۴ اثرات دمای نانوسیال..... ۷۲
۶-۵ اثرات دمای نانوسیال و قطر نانوذرات با مدل ویسکوزیته مختلف..... ۷۵
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۷۷
۷-۱ نتیجه‌گیری ۷۸
۷-۲ پیشنهادات..... ۷۹
مراجع..... ۸۰

فهرست علائم

C	سرعت ذرات مجازی روی شبکه
C_p	گرمای ویژه
C_s	سرعت صوت روی شبکه
dp	قطر نانوذرات
e_i	سرعت گسسته شده روی شبکه
F_i	نیروی خارجی در راستاهای گسسته شده
f_i	تابع توزیع چگالی
f_i^{eq}	تابع توزیع چگالی تعادلی
g_i	تابع توزیع برای میدان دما
g_i^{eq}	تابع توزیع تعادلی برای میدان دما
g_y	شتاب گرانشی
H	ارتفاع محفظه
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
k	ضریب هدایت حرارتی
K_b	ثابت بولتزمن
l_f	مسافت آزاد میانگین
Nu	عدد ناسلت میانگین
Pr	عدد پرانتل
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
T	دما
T_h	دمای دیواره گرم
T_c	دمای دیواره سرد
T_m	دمای میانگین
u, v	مولفه عمودی و افقی سرعت

U, V	مولفه عمودی و افقی سرعت بدون بعد
W	عرض محفظه
ω_i	ضریب وزنی
x,y	مختصات کارتزین
X,Y	مختصات بدون بعد

علائم یونانی

α	ضریب نفوذ حرارتی
β	ضریب انبساط حرارتی
Δt	گام زمانی شبکه
Δx	گام مکانی شبکه
δ_l	فاصله میان نانوذرات
φ	کسر حجمی نانوذرات
μ	ویسکوزیته دینامیکی
ϑ	ویسکوزیته استاتیکی
ρ	چگالی
Ψ	تابع جریان
τ	زمان آرامش شبکه
τ_v	زمان آرامش شبکه برای میدان سرعت
τ_T	زمان آرامش شبکه برای میدان دما
θ	دمای بدون بعد

زیرنویس‌ها

B	برونیین
f	سیال
i	راستای گسسته شده شبکه
nf	نانوسیال
p	ذرات جامد

فهرست شکل‌ها

عنوان		صفحه
شکل(۲-۱)	تقسیم بندی مدل کردن سیالات	۱۳
شکل(۲-۲)	جایگاه روش شبکه بولتزمن	۱۶
شکل(۲-۳)	بردارهای سرعت‌های گسسته شده در مدل D_2Q_9	۲۱
شکل(۴-۱)	محفظهٔ دو بعدی و دستگاه مختصات	۳۴
شکل(۴-۲)	بررسی تعداد گره	۳۷
شکل(۴-۳)	مقایسهٔ دمای بدون بعد	۳۹
شکل(۴-۴)	مولفهٔ عمودی سرعت بدون بعد بر روی محور گذرنده از وسط دیوارهٔ عمودی برای کسرهای حجمی مختلف	۴۱
شکل(۴-۵)	مولفهٔ عمودی سرعت بدون بعد بر روی محور گذرنده از وسط دیوارهٔ عمودی برای نانوذرات مختلف	۴۳
شکل(۴-۶)	نمودارهای خطوط جریان و خطوط همدما برای سیال پایه و نانوسیال (φ =۰/۰۳)	۴۴
شکل(۴-۷)	نمودارهای خطوط جریان و خطوط همدما برای سیال پایه و نانوسیال ($Ra = ۱۰^۵$)	۴۶
شکل(۴-۸)	تغییرات عدد ناسلت میانگین در اثر افزودن نانوذرات	۴۷
شکل(۴-۹)	تغییرات عدد ناسلت میانگین برای نانوذرات مختلف	۴۹
شکل(۵-۱)	ویسکوزیته موثر بدون بعد برای مدل‌های مختلف	۵۳
شکل(۵-۲)	هدایت حرارتی موثر بدون بعد برای مدل‌های مختلف	۵۴
شکل(۵-۳)	مقایسهٔ نمودار خطوط جریان و خطوط همدما برای نانوسیال و سیال پایه برای مدل‌های مختلف ($Ra = ۱۰^۳, \varphi$ = ۰/۰۳)	۵۵
شکل(۵-۴)	مقایسهٔ نمودار خطوط جریان و خطوط همدما برای نانوسیال و سیال پایه برای مدل‌های مختلف ($Ra = ۱۰^۳, \varphi$ = ۰/۰۳)	۵۶
شکل(۵-۵)	مقایسهٔ نمودار خطوط جریان و خطوط همدما برای نانوسیال و سیال پایه برای مدل‌های مختلف ($Ra = ۱۰^۶, \varphi$ = ۰/۰۳)	۵۷
شکل(۵-۶)	مقایسهٔ نمودار خطوط جریان و خطوط همدما برای نانوسیال و سیال	۵۸

پایه برای مدل‌های مختلف ($Ra = 10^6, \varphi = 0/03$)
شکل(۵-۷) نمودار ناسلت میانگین بر حسب کسرهای حجمی متفاوت برای مدل‌های مختلف ($Ra = 10^3$) ۶۰
شکل(۵-۸) نمودار ناسلت میانگین بر حسب کسرهای حجمی متفاوت برای مدل‌های مختلف ($Ra = 10^3$) ۶۱
شکل(۵-۹) نمودار ناسلت میانگین بر حسب کسرهای حجمی متفاوت برای مدل‌های مختلف ($Ra = 10^6$) ۶۲
شکل(۵-۱۰) نمودار ناسلت میانگین بر حسب کسرهای حجمی متفاوت برای مدل‌های مختلف ($Ra = 10^6$) ۶۳
شکل(۶-۱) مولفه عمودی سرعت بدون بعد($Pr = 5/83, \varphi = 0/05$) ۶۷
شکل(۶-۲) تغییرات عدد ناسلت میانگین با کسر حجمی نانوذرات ($Pr = 5/83$) ۶۹
شکل(۶-۳) مقایسهٔ نمودارهای خطوط جریان و خطوط همدما برای نانوسیال و سیال پایه ($Pr = 5/83, \varphi = 0/05$) ۷۰
شکل(۶-۴) مقایسهٔ نمودارهای خطوط جریان و خطوط همدما برای نانوسیال و سیال پایه ($Pr = 5/83, \varphi = 0/05$) ۷۱
شکل(۶-۵) مقایسهٔ نمودارهای خطوط جریان و خطوط همدما برای نانوسیال و سیال پایه ($Pr = 5/83, \varphi = 0/05$) ۷۲
شکل(۶-۶) نسبت هدایت حرارتی نانوسیال به هدایت حرارتی سیال پایه ۷۳
شکل(۶-۷) مقایسهٔ نمودارهای خطوط جریان و خطوط همدما برای نانوسیال در پرانتل‌های مختلف ($Gr = 10^4, \varphi = 0/05$) ۷۴
شکل(۶-۸) تغییرات عدد ناسلت میانگین برای قطرهای مختلف ۷۵
شکل(۶-۹) نسبت ویسکوزیته نانوسیال به ویسکوزیته سیال پایه برای قطرهای مختلف ($Pr = 5/83$) ۷۶

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول(۴-۱) خواص ترموفیزیکی نانوذرات و سیال پایه ۳۵

جدول(۴-۲) مقایسهٔ مشخصات جریان و انتقال حرارت درکار حاضر با مراجع دیگر ۳۸
جدول(۴-۳) نسبت ویسکوزیته موثر به ویسکوزیته سیال در مدل‌های مختلف ۴۲
جدول(۵-۱) مدل‌های مختلف ویسکوزیته موثر و هدایت حرارتی موثر نانوسیال ۵۲

فصل اول

مقدمه

۱.۱ مقدمه

در دهه‌های اخیر شاهد پیشرفت روزافزون علوم در زمینه‌های مختلف می‌باشیم که پیامد مستقیم آن رشد تکنولوژی و راحتی و آسایش هرچه بیشتر برای انسان‌ها می‌باشد. علوم مربوط به انتقال حرارت نیز از این قضیه مستثنی نبوده و در سال‌های اخیر دست خوش تغییرات فراوانی شده‌اند. که نتیجهٔ تلاش‌ها و مطالعات انجام شده توسط دانشمندان علم انتقال حرارت در این زمینه می‌باشد.

خنک‌کاری برای حفظ کارآیی مطلوب و قابل اعتماد بسیاری از محصولات مانند کامپیوترها، وسایل الکتریکی، وسایل خطوط انتقال برق، موتور اتومبیل‌ها، دستگاه‌های تولید لیزر با قدرت بالا و...امری ضروری است. با افزایش فوق‌العاده‌ی بارهای حرارتی (در بعضی حالات به ۲۵ kW می‌رسد) و شارهای حرارتی (در بعضی حالات به W/cm^2 ۲۰۰۰ می‌رسد) که ناشی از قدرت بیشتر و یا ابعاد کوچک محصولات می‌باشد، خنک‌کاری به یکی از تخصصی‌ترین زمینه‌های رقابتی مرتبط با صنایع فناوری‌های برتر تبدیل شده است [۱].

افزایش انتقال حرارت اصلی‌ترین و مهم‌ترین زمینهٔ فعالیت‌ها را در این خصوص به خود اختصاص داده است. لذا اکثر مقالات و مطالعات ارائه شده سعی دارند که به‌نحوی راندمان انتقال حرارت را افزایش دهند.

بسیاری از سیالاتی که برای انتقال حرارت استفاده می‌شوند، مثل آب، اتیلن گلیکول[1] و روغن موتور[2]، ظرفیت‌های کمی در زمینهٔ خصوصیات حرارتی دارند که در بسیاری از کاربردهای حرارتی محدودیت‌های شدیدی ایجاد می‌کنند [۲]. به‌منظور رفع این محدودیت‌ها، انتقال حرارت جابجایی با تغییر هندسهٔ جریان، شرایط مرزی، اضافه کردن سطوح ثانویه (مثل پره‌ها)، تغییر رفتار جریان و تغییر خصوصیات سیال بهبود می‌یابد [۳]. از بین راه‌های یاد شده ایده مناسب تغییر خواص سیال به‌منظور بهبود ویژگی‌های حرارتی سیال است. در بهبود ویژگی‌های حرارتی اولین گزینه افزایش هدایت حرارتی سیال است. از آن جمله افزودن ذرات جامد فلزی و غیرفلزی به سیال پایه می‌باشد و این به‌دلیل بالاتر بودن هدایت حرارتی بسیاری از جامدات و به‌ویژه فلزات نسبت به سیالات است. به‌عنوان مثال هدایت حرارتی مس حدود ۷۰۰ برابر هدایت حرارتی‌آب است و در حدود ۳۰۰۰ برابر هدایت حرارتی روغن موتور می‌باشد [۴].

ایده‌ی اولیهٔ اضافه نمودن ذرات جامد به سیال پایه در یک کار تئوری توسط ماکسول[3] در سال ۱۸۷۳ ارائه شد. ماکسول در مقالهٔ خود نشان داد افزایش کسر حجمی نانوذرات معلق در سیال باعث

[1] Ethylene-Glycol
[2] Engine oil
[3] Maxwell

افزایش انتقال حرارت هدایتی مخلوط می‌شود که دلیل آن ضریب هدایت حرارتی بالای ذرات فلزی و غیر فلزی اضافه شده به سیال نسبت به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه می‌باشد. از آن زمان تاکنون مطالعات زیادی به‌جهت شناخت و توصیف مشخصات فیزیکی و گرمایی و هیدرولیکی این گونه مخلوط‌ها و بهبود راندمان حرارتی آنها صورت پذیرفته است. اشاره به این موضوع ضروری به‌نظر می‌رسد که در ابتدا مطالعات معطوف به استفاده از ذرات جامدِ فلزی و غیرفلزی در ابعاد میلی‌متر و ماکرومتر که به‌صورت معلق با سیال پایه مخلوط می‌شده‌اند، بوده است. البته به‌دلیل حجم و جرم بالای این ذرات سرعت ته نشینی در این مخلوط‌ها بسیار بالا بوده و باعث انسداد مسیرهای جریان می‌شدند. از طرفی در اثر برخورد این ذرات با دیواره‌ی لوله و اصطکاک بالای آن افت فشار شدیدی را به‌همراه داشتند و علاوه بر این باعث خوردگی دیواره‌ی کانال می‌شدند [۳ و۲]. با عنایت به دلایل ذکر شده، استفاده از این مخلوط‌ها کاربرد عملی پیدا نکرد و جهت مطالعات بعدی را به‌سمت استفاده از ذرات در ابعاد نانومتر هدایت کرد.

۲.۱ نانوسیالات

پیشرفت‌ها در فناوری نانو، زمینهٔ ایجاد شاخهٔ جدیدی از سیال‌ها به‌نام نانوسیال[1] را فراهم کرد که اولین بار توسط چوی[2] در سال ۱۹۹۵ تعریف شد. او نانوسیال را به‌صورت مخلوط مایعی حاوی ذراتِ جامد با هدایت حرارتی بسیار بالاتر نسبت به سیال پایه و با اندازه‌ی کمتر از ۱۰۰ نانومتر تعریف کرد [۵].

این مخلوط‌ها به‌دلیل ابعاد بسیار کوچک ذرات معلق اضافه شده به آنها نانوسیال نام گرفتند. در صورتی که نانوذرات به‌طور کامل در سیال پخش شده باشند از قابلیت‌های فراوانی برای افزایش انتقال حرارت برخوردار خواهند بود. اولین مزیت نانوسیالات مرتفع نمودن مشکلات ذکر شده برای استفاده از ذرات معلق در ابعاد میلی‌متر و ماکرومتر می‌باشد. به‌عبارت دیگر به‌دلیل هم‌مرتبه بودن اندازه‌ی ذرات اضافه شده با اندازه‌ی مولکول‌های سیال، مخلوط رفتار همگنی را از خود نشان داده و نه‌تنها ذرات ته نشین نمی‌شوند، بلکه، افت فشار و فرسایش زیادی را نیز ایجاد نمی‌کنند.

لازم به‌ذکر است که در اکثر کارهای عددی، تئوری و آزمایشگاهی موجود از نانوذرات مس(Cu)، اکسید مس(CuO)، اکسید آلومینیم(Al_2O_3)، اکسید تیتانیم(TiO_2) و نقره (Ag) استفاده شده است که علت انتخاب این نانوذرات بالا بودن هدایت حرارتی این نانوذرات و هم‌چنین ایجاد یک مخلوط پایدار در برابر ته‌نشینی می‌باشد.

[1] Nanofluid
[2] Choi

۱.۲.۱ فواید نانوسیالات

فواید عمده‌ی نانوسیالات را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

۱. افزایش هدایت حرارتی:

افزودن نانوذرات به سیال پایه موجب افزایش سطح تماس سیال و نانوذرات می‌گردد. ذرات کوچکتر از ۲۰ نانومتر، ۲۰٪ از اتم‌های خود را در سطح ذره حمل می‌کنند و آنها را برای انتقال حرارت در دسترس قرار می‌دهند. هم‌چنین حرکت ذرات نانو امکان ایجاد میکرو جریان‌هایی را فراهم می‌آورد که مجموع این عوامل در نهایت منجر به افزایش هدایت حرارتی نانوسیال می‌شود [۶].

۲. ایجاد سیال پایدار:

کوچک بودن ذرات،کاهش چگالی و کاهش احتمال ته‌نشنی را دربر دارد و بنابراین یک سیال پایدار در برابر رسوب را به‌وجود خواهد آورد [۶].

۳. استفاده در میکروکانال‌ها :

در میکروکانال‌ها به‌علت کوچک بودن مجاری جریان امکان استفاده از ذرات در اندازه‌های میلی‌متر و میکرومتر که موجب انسداد مسیرهای جریان نشود، امکان پذیر نبوده و ترکیب استفاده از نانوسیالات و میکروکانال‌ها می‌تواند نرخ انتقال حرارت را در حد چشم‌گیری افزایش دهد [۸ و۷].

۴. کاهش سایش و توان پمپاژ:

نانوذرات فوق العاده کوچک هستند و مومنتومی که می‌توانند به دیوارهٔ جامد واردکنند بسیارکمتر از مومنتم بوجودآمده توسط ذرات با ابعاد میکرومتر یا میلی‌متر است. این مومنتوم‌کاهش یافته احتمال سایش در اجزاء، مبدل‌های حرارتی، لوله‌ها و پمپ‌ها را کم می‌کند بعلاوه افتِ فشار کمی ایجاد می‌کنند و توان لازم برای پمپاژ را چندان افزایش نمی‌دهند و یا در بعضی مشاهدات نسبت به سیال پایه توان پمپاژ را تغییر نمی‌دهند [۶].

۵. افزایش شار حرارتی در انتقال حرارت جوشش:

مشاهدات اخیر بر روی نانوسیالات نشان می‌دهد که این مواد هدایت حرارتی را در مقایسه با مایعات بدون ذرات نانو یا ذرات بزرگتر بسیار افزایش می‌دهند و هم‌چنین باعث افزایش قابل توجه شار حرارت بحرانی در انتقال حرارت جوشش[1] می‌شوند [۹].

مزایای یاد شده برای نانوسیالات به‌همراه قابلیت بالای آنها در افزایش انتقال حرارت باعث شده در سال‌های اخیر عده‌ی‌کثیری از محققین تلاش فراوانی را به‌جهت شناخت هرچه بهتر رفتار

[1] Critical heat flux in boiling heat transfer

نانوسیالات و بهبود خواص حرارتی آنها به‌کار برده و مقالات فراوانی نیز در نتیجهٔ این تلاش‌ها به چاپ رسیده‌اند.

۲.۲.۱ مشکلات نانوسیالات

هرچند که نانوسیالات فرصت‌های خوبی را ارائه می‌دهند ولی هنوز تعدادی از موانعِ تخصصی در مسیر تجاری و صنعتی شدن آنها قرار دارد [۱]:

۱. هنوز درک واضحی از مکانیزم‌های اساسی بهبود هدایت حرارتی در نانوسیالات وجود ندارد. هر چند مکانیزم‌هایی ارائه شده است ولی هنوز اتفاق نظری برای این مکانیزم‌ها وجود ندارد و در حال بررسی بیشتر می‌باشند [۱۰ و۵ و۱].

۲. عدم هم‌خوانی بین نتایجی که توسط آزمایشگاه‌های مختلف گزارش شده، ملاحظه گردیده است [۹].

۳. عدم هم‌خوانی نتایج تجربی و مدل سازی‌های عددی در بعضی حالات به‌خصوص انتقال حرارت جابجایی طبیعی وجود دارد [۳].

۳.۲.۱ نانوسیالات در مقالات :

عمده‌ی مقالات ارائه شده در زمینهٔ نانوسیالات را می‌توان در چند رده قرار داد [۱] :

۱. بررسی مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت نانوسیالات

۲. ارائه و تصحیح مدل‌هایی برای خواص جریان و انتقال حرارت نانوسیالات

۳. ارائه و تصحیح مدل‌هایی برای ویسکوزیته نانوسیالات

۴. ارائه و تصحیح مدل‌هایی برای هدایت حرارتی نانوسیالات

۵. تاثیر نانوذرات بر نانوسیالات (تاثیر شکل، نوع و کسر حجمی نانوذرات موجود در نانوسیال و ...)

۳.۱ تاریخچهٔ تحقیقات قبلی

در این قسمت به مرور خلاصه‌ای از کارهای انجام شدهٔ گذشته در زمینهٔ انتقال حرارت جابجایی می‌پردازیم و خلاصه‌ای از هر یک در ادامه ذکر می‌گردد.

در مدل‌سازی انتقال حرارت جابجایی سیال حاوی ذرات کوچک جامد (در اندازه‌های میکرومتر و میلی‌متر) دو روش کلی وجود دارد. روش اول، مدل تک فازی است که در آن فاز سیال و جامد در تعادل حرارتی هستند و هر دو فاز در هر نقطه یک سرعت دارند این روش از لحاظ محاسباتی

زودتر جواب می‌دهد و نسبت به روش دوم ساده‌تراست و در اکثر مقالات موجود از این روش استفاده شده است [۴]. روش دوم مدل دو فازی است که درک بهتری از نقش سیال و فاز جامد ارائه می‌دهد [۱۱].

هر دو روش برای بررسی رفتار انتقال حرارتی نانوسیالات مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۴و۱۳و۱۲و۱۱و۴و۳] .

در هر دو روش بالا برای محاسبات عددی لازم برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت از روش‌های مرسوم دینامیک سیالات محاسباتی(CFD) استفاده شده است . روش دیگری هم که در تعداد کمی ازاین مسائل و در مسائل مشابه استفاده شده است، نظریهٔ بولتزمن[1] و مدل شبکهٔ بولتزمن است [۱۶و۱۵].

در زیر به مرور خلاصه‌ای از کارهایی که با مدل تک فازی، دو فازی و استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات انجام شده می‌پردازیم.

پک[2] و چو[3] [۱۷] و لی[4] و ژان[5] [۱۸] انتقال حرارت جریان آرام و مغشوش یک نانوسیال درون یک لوله را بررسی‌کردند و اولین بار روابطی تجربی برای عدد ناسلت یک نانوسیال حاوی نانوذرات مس (Cu)، اکسید آلومینیم(Al_2O_3) و اکسید تیتانیم(TiO_2) را ارائه دادند و نشان دادند که با حضور نانوذرات در سیال پایه (آب) میزان انتقال حرارات به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

بهزادمهر و همکاران [۱۱] برای اولین بار مدل دو فازی را برای جریان جابجایی اجباری مغشوش نانوسیال استفاده نمودند. آنها بررسی خود را برای یک نانوسیال شامل نانوذرات مس در لوله تحت شار حرارتی یکنواخت انجام دادند. آنها هم‌چنین مدل تک فازی که قبلاً برای نانوسیالات مورد استفاده قرار می‌گرفت را نیز استفاده کردند تا دومدل تک فازی و دو فازی را مقایسه کنند. در نهایت مقایسه دو مدل تک فازی و دو فازی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مدل دو فازی از دقت بهتری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است.

اکبری نیا و بهزاد مهر [۱۹] جابجایی ترکیبی آرام در یک لوله‌ی افقی خمیده با شار حرارتی ثابت بر روی دیواره را بررسی کرده‌اند. آنها از معادلات معمول سیال استفاده کرده و کانتورهای سرعت، جریان ثانویه و دما را به‌عنوان نتیجه ارائه‌کردند. آنها با محاسبهٔ عددی نشان دادند که با

[1] Boltzmann
[2] Pak
[3] Cho
[4] Li
[5] Xuan

افزایش کسر حجمی نانوذرات Al_2O_3 در آب عدد ناسلت متوسط افزایش یافته ولی ضریب اصطکاک سطح تغییری نداشته است.

مایگا[1] و همکاران [۲] جریان جابجایی اجباری آرام نانوسیال را برای دو هندسهٔ مختلف مطالعه کردند. معادلات حاکم بر مساله ابتدا برای یک لوله با شار حرارتی یکنواخت بر روی دیواره و سپس برای یک کانال شعاعی که جریان از مرکز دیسک وارد و از محیط شعاعی آن خارج می‌شد حل شد. در این مطالعهٔ عددی از دو نوع نانوسیال استفاده شد، یک بار برای مخلوط آب و نانوذرات اکسید آلومینیم (Al_2O_3) و باردیگر برای مخلوط اتیلن گلیکول(EG) و نانوذرات اکسید آلومینیم (Al_2O_3) با کسرهای حجمی (۱۰- ۰) محاسبات انجام شد. در انتها نشان داده شد که با افزایش غلظت ذرات (نسبت حجمی نانوذرات به کل مخلوط) ضریب انتقال حرارت و تنش روی دیواره افزایش می‌یابد.

ابوندا [2][۲۰] جریان آرام نانوسیال در یک پلهٔ پسرو[3] (مشابه انبساط ناگهانی[4]) را بررسی‌کرد. او از سیال پایهٔ آب و پنج نوع از نانوذرات مختلف Cu، Ag، Al_2O_3، CuO و TiO_2 به‌طور جداگانه استفاده کرد. شرط مرزی در مسئلهٔ او دمای مشخص بر روی دیواره‌ها بود و نشان داد که با افزایش غلظت ذرات عدد ناسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند.

اکثر کارهای انجام شده بر روی جابجایی ترکیبی و اجباری افزایش عدد ناسلت را در نتیجهٔ افزایش غلظت نانوذرات گزارش کرده‌اند هرچند تعدادی از کارها نیز کاهش عدد ناسلت را نتیجه گرفته‌اند [۳].

تعداد کارهایی که بر روی جابجایی آزاد نانوسیالات صورت گرفته نسبت به جابجایی اجباری اندک است که در زیر خلاصه‌ای از کارهایی که بر روی جابجایی آزاد نانوسیالات به‌صورت عددی، تئوری و آزمایشگاهی انجام شده‌اند، آورده شده است.

خانافر[5] و همکاران [۲۱] در کار خود به‌صورت عددی افزایش انتقال حرارت را برای مسئلهٔ جابجایی آزاد در یک محفظهٔ دو بعدی و برای اعداد گراشف[6] (10^5 -10^3) و نسبت حجمی متفاوت برای نانوذرات مس مورد مطالعه قرار دادند و اثرات نیروی شناوری[7] را بر روی پارامترهای پارامترهای جریان تجزیه و تحلیل نمودند. آنها در کار خود نانوسیال را به‌صورت همگن فرض

[1] Maïga
[2] Abu-Nada
[3] Backward facing step
[4] Sudden expansion
[5] Sudden expansion
[6] Grashof
[7] Buoyancy force