بسم الله الرحمن الرحيم

شماره پایان نامه:.....

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی توام نانوسیال در یک محفظه **T** شکل

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر بهزاد قاسمی

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر افراسیاب رئیسی

پژوهشگر:

عباس کسایی‌پور

شهریور ۱۳۹۳

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مکانیک

پایان نامه آقای عباس کسایی‌پور جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی با عنوان:

اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی توام نانوسیال در یک محفظه **T** شکل

در تاریخ ۱۳۹۳/۰۷/۱۵ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره ۲۰ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. **استاد راهنمای پایان نامه دکتر بهزاد قاسمی با مرتبه علمی استاد** **امضاء**

۲. **استاد مشاور پایان نامه دکتر افراسیاب رئیسی با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

۳. **استاد داور پایان نامه دکتر علیرضا شاطری با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

۴. **استاد داور پایان نامه دکتر افشین احمدی ندوشن با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

دکتر یعقوب طادی بنی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی

دانشکده فنی و مهندسی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

چکیده

در این پایان‌نامه، انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه T شکل مورب پر شده از نانوسیال آب- مس تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت به روش عددی بررسی شده است. یک منبع حرارتی با دمای ثابت در کف محفظه تعبیه شده است. دیوار بالائی محفظه در دمای سرد و سایر دیواره‌ها عایق می‌باشند. همچنین در ادامه انتقال حرارت جابجایی توام در یک محفظه T شکل با ورود نانوسیال آب-مس از کف محفظه و خروج آن از بالای محفظه، که تحت میدان مغناطیسی ثابت قرار دارد، به روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. دیواره‌های داخلی محفظه در دمای ثابت T_h گرم قرار دارند و ورودی نانوسیال به محفظه دمای سرد T_c را دارد. همچنین سایر دیواره‌ها عایق می‌باشند.

معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی، به‌روش حجم محدود برروی یک شبکه یکنواخت جابجا شده توسط الگوریتم سیمپل حل شده‌اند. به‌کمک نتایج عددی، تاثیر پارامترهای وابسته مانند عدد ریچاردسون ($0.01 \leq Ri \leq 10$)، عدد رینولدز ($10 \leq Re \leq 400$)، عدد هارتمن ($0 \leq Ha \leq 80$)، نسبت منظری محفظه ($0.1 \leq H \leq 0.4$) و درصد حجمی نانوذرات ($0 \leq \varphi \leq 0.06$) در محفظه T شکل باز و عدد هارتمن، درصد حجمی نانوذرات، زاویه چرخش محفظه ($0° \leq \alpha \leq 90°$) و عدد ریلی ($10^3 \leq Ra \leq 10^6$) در محفظه T شکل بسته مورب بر روی میدان جریان و دما و میزان انتقال حرارت محفظه مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج نشان می‌دهد، در رینولدزهای پایین اضافه شدن عدد هارتمن به میزان اندکی نوسلت متوسط را افزایش می‌دهد ولی در رینولدزهای بالا، افزایش هارتمن اثر خود را بیشتر نشان می‌دهد. در رینولدز ۴۰۰، انتقال حرارت سیال خالص بیشتر از نانوسیال می باشد. با افزایش عدد هارتمن، این تاثیر معکوس نانوسیال بر انتقال حرارت، کاهش می یابد و در هارتمن ۸۰، نوسلت نانوسیال بیشتر از سیال خالص می شود. با افزایش طول منابع گرم، تاثیر نانوسیال بر انتقال حرارت افزایش می یابد. در ریچاردسون ۰/۰۱ و ۱، بیشترین انتقال حرارت در نسبت منظری ۰/۴، رخ می دهد ولی در ریچاردسون ۱۰، بیشترین انتقال حرارت در نسبت منظری ۰/۱ رخ می دهد. با افزایش عدد ریچاردسون، نوسلت متوسط افزایش می‌یابد. این افزایش انتقال حرارت با افزایش نسبت منظری محفظه، کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: حل عددی، محفظه T شکل، میدان مغناطیسی، نانوسیال آب-مس، جابجایی آزاد، جابجایی توام

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحه**

فصل اول- مقدمه ۸
۱-۱ انتقال حرارت جابجایی ۸
۱-۱-۱ عدد ریچاردسون ۹
۱-۱-۲ نیروی غوطه‌وری ۱۰
۱-۲ نانوسیالات ۱۰
۱-۲-۱ روش‌های افزایش انتقال حرارت ۱۱
۱-۲-۲ معرفی نانوسیال و کاربردهای آن ۱۰
۱-۳ میدان مغناطیسی ۱۳
۱-۳-۱ معرفی نیروی لورنتس ۱۳
۱-۳-۲ تعریف چند پارامتر مهم در مسائل هیدرودینامیک مغناطیسی ۱۴
۱-۳-۳ تقریب‌های جریان هیدرودینامیک مغناطیسی ۱۵
۱-۴ بررسی کارهای انجام شده ۱۵
۱-۵ جایگاه پروژه حاضر ۱۷
فصل دوم- معرفی مسئله، معادلات وشرایط مرزی ۱۹
۲-۱ بیان مسئله ۱۹
۲-۱-۱ جابجایی آزاد در محفظه T شکل ۱۹
۲-۱-۲ جابجایی توام در محفظه T شکل ۲۰
۲-۲ معادلات حاکم بر جریان سیال ۲۰
۲-۲-۱ محاسبه نیروی بویانسی ۲۱
۲-۲-۲ محاسبه نیروی لورنتس ۲۱
۲-۲-۳ خواص نانوسیال ۲۲
۲-۳ معادلات حاکم بر جریان نانو سیال تحت میدان مغناطیسی ۲۳
۲-۴ بی بعدسازی معادلات ۲۴
۲-۴-۱ بی‌بعدسازی معادلات حاکم بر جریان جابجایی آزاد ۲۴
۲-۴-۲ بی‌بعدسازی معادلات حاکم بر جریان جابجایی توام ۲۶
فصل سوم- روش عددی ۲۸
۳-۱ استاندارد سازی معادلات مطابق فرم کلی معادله دیفرانسیل بقاء ۲۸
۳-۲ گسسته سازی معادلات ۳۰
۳-۲-۱ جبری کردن جملات جابجایی و پخش ۳۱
۳-۲-۲ جبری کردن جمله های چشمه و گرادیان فشار ۳۲
۳-۲-۳ جبری کردن معادلات حاکم بر جریان ۳۳
۳-۳ شرط مرزی در محفظه باز ۳۷

۳-۳-۱ شرط مرزی هیدرودینامیکی ۳۷
۳-۳-۲ شرط مرزی حرارتی ۳۸
۳-۴ غیرفعال کردن شبکه ۳۸
۳-۵ الگوریتم حل معادلات ۳۹
۳-۶ معیار همگرایی ۴۰
فصل چهارم- نتایج ۴۲
۴-۱ بررسی اعتبار کد کامپیوتری ۴۱
۴-۱-۱جابجایی آزاد هوا در یک محفظه مربعی ۴۱
۴-۱-۲جابجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه C شکل ۴۲
۴-۱-۳ جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی تحت میدان مغناطیسی ۴۲
۴-۱-۴ جابجایی توام در یک محفظه مربعی شکل با ورود و خروج نانوسیال ۴۳
۴-۱-۵ جابجایی آزاد در یک محفظه T شکل پر شده از نانوسیال ۴۴
۴-۲ استقلال حل از شبکه ۴۴
۴-۳ بررسی عوامل موثر بر نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه T شکل ۴۵
۴-۳-۱ بررسی اثر عدد ریلی و میدان مغناطیسی در محفظه افقی $(\alpha = 0)$ ۴۵
۴-۳-۲ بررسی اثر چرخش محفظه $(\mathrm{Ha} = 0)$ ۵۰
۴-۴ بررسی عوامل موثر بر نرخ انتقال حرارت جابجایی توام در محفظه T شکل ۵۳
۴-۴-۱ بررسی اثر عدد رینولدز و میدان مغناطیسی ۵۴
۴-۴-۲ بررسی اثر عدد ریچاردسون و نسبت منظری محفظه ۵۹
۴-۵ نتیجه گیری ۶۳
۴-۶ پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ۶۴
منابع ۶۶

فهرست اشکال

عنوان **شماره صفحه**

شکل ۲-۱- محفظه T شکل بسته ۱۹
شکل ۲-۲- محفظه T شکل باز ۲۰
شکل ۲-۳- محفظه T شکل مورب بسته ۲۶
شکل ۳-۱- نقاط اصلی و فرعی در شبکه اصلی ۳۱
شکل ۳-۲- شبکه جابجا شده در راستای X (محاسبهU) ۳۳
شکل ۳-۳- شبکه جابجا شده در راستای Y(محاسبه V) ۳۵
شکل ۳-۴- شبکه اصلی (محاسبه P) ۳۶
شکل ۳-۵- غیرفعال کردن شبکه حل ۳۸
شکل ۴-۱- مقایسه نوسلت متوسط برنامه حاضر با مرجع [۴۹] ۴۲
شکل ۴-۲- اعتبار سنجی برنامه حاضر با محفظه مربعی تحت میدان مغناطیسی با زاویه چرخش متفاوت[۳۰] ۴۳
شکل ۴-۳- اعتبار سنجی برنامه حاضر با محفظه مربعی با ورود و خروج نانوسیال[۲۸] ۴۳
شکل ۴-۴- خطوط جریان در ریلی‌ها وهارتمن‌های مختلف ۴۶
شکل ۴-۵- خطوط همدما در ریلی‌ها و هارتمن‌های مختلف ۴۶
شکل ۴-۶- اثر تغییر کسر حجمی نانوذرات مختلف بر نوسلت موضعی ۴۷
شکل ۴-۷- تاثیر تغییر عدد هارتمن بر نوسلت موضعی ۴۷
شکل ۴-۸- اثر عدد هارتمن و درصد حجمی نانوذرات بر نوسلت متوسط دراعداد ریلی مختلف ۴۸
شکل۴-۹- خطوط جریان در زاویه چرخش محفظه و ریلی‌های مختلف ۵۱
شکل۴-۱۰- خطوط همدما در زاویه چرخش و ریلی‌های مختلف ۵۱
شکل ۴-۱۱- اثر کسرحجمی نانوذرات بر نوسلت متوسط در زوایای چرخش و ریلی‌های مختلف ۵۲
شکل ۴-۱۲- خطوط جریان به ازای Y1های مختلف محفظه ۵۳
شکل ۴-۱۳ سرعت عمودی (Y=0.5) به ازای Y1های مختلف محفظه ۵۴
شکل ۴-۱۴- خطوط جریان در اعداد رینولدز و هارتمن مختلف ۵۵
شکل ۴-۱۵- سرعت عمودی (Y=0.5) به ازای اعداد رینولدز مختلف ۵۵
شکل ۴-۱۶- سرعت عمودی (Y=0.5) به ازای اعداد هارتمن مختلف ۵۵
شکل ۴-۱۷- خطوط همدما در اعداد رینولدز و هارتمن مختلف ۵۵
شکل ۴-۱۸- عدد نوسلت‌موضعی به‌ازای اعداد رینولدز مختلف ۵۵
شکل ۴-۱۹- عدد نوسلت موضعی به‌ازای اعداد هارتمن مختلف ۵۶
شکل ۴-۲۰- نوسلت متوسط در اعداد رینولدز و هارتمن مختلف ۵۷
شکل ۴-۲۱- مقدار $Nu_{m,nf}$ / $Nu_{m,f}$ برای اعداد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات مختلف ۵۷
شکل ۴-۲۲- مقدار $Nu_{m,nf}$ / $Nu_{m,f}$ برای اعداد هارتمن و کسر حجمی نانوذرات مختلف ۵۹
شکل ۴-۲۳- خطوط جریان در اعداد ریچاردسون و Hهای مختلف ۵۸
شکل ۴-۲۴- سرعت عمودی (Y=0.5) به ازای طول منابع مختلف ۶۰
شکل ۴-۲۵- سرعت عمودی (Y=0.5) به‌ازای اعداد ریچاردسون مختلف ۶۱

شکل ۴-۲۵- خطوط همدما در اعداد ریچاردسون و Hهای مختلف ۶۱
شکل ۴-۲۶- عدد نوسلت موضعی به ازای طول منابع مختلف ۶۲
شکل ۴-۲۷- عدد نوسلت موضعی به‌ازای اعداد ریچاردسون مختلف ۶۲
شکل ۴-۲۸- نوسلت متوسط به‌ازای نسبت منظری محفظه و ریچاردسون‌های مختلف ۶۳

فهرست جداول

عنوان **شماره صفحه**

جدول۲-۱- خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانوذرات مس..... ۲۴
جدول۳-۱- مقادیر S ، φ و Γ برای معادله پیوستگی، معادلات مومنتم و انرژی در محفظه مورب بسته..... ۳۰
جدول۳-۲- مقادیر S ، φ و Γ برای معادله پیوستگی، معادلات مومنتم و انرژی در محفظه باز..... ۳۰
جدول ۴-۱- اعتبارسنجی برنامه حاضر با محفظه مربعی شکل..... ۴۲
جدول ۴-۲- اعتبارسنجی برنامه حاضر با محفظه T شکل..... ۴۵
جدول ۴-۳- تاثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد نوسلت متوسط در محفظه T شکل بسته..... ۴۵
جدول ۴-۴- تاثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد نوسلت متوسط در محفظه T شکل باز..... ۴۶
جدول ۴-۵- نوسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف عدد ریلی و عدد هارتمن برای درصد نانوذرات متفاوت..... ۵۰
جدول ۴-۶- نوسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف زاویه چرخش و عدد ریلی برای درصد نانوذرات متفاوت..... ۵۴
جدول ۴-۷- نوسلت متوسط به ازای Y1های مختلف..... ۵۴
جدول ۴-۸- مقدار نوسلت متوسط و $Nu_{m,nf} / Nu_{m,f}$ برای اعداد ریچاردسون و کسر حجمی نانوذرات مختلف..... ۶۳

فهرست علائم

علایم لاتین

B_0	میدان مغناطیسی ثابت، T
C	ثابت تجربی
c_p	گرمای ویژه، $Jkg^{-1}k^{-1}$
d_f	اندازه مولکولی سیال مبنا, $d_f = 2\text{Å}$
d_s	قطر نانوذرات جامد، nm
g	شتاب جاذبه زمین, ms^{-2}
h	طول منابع گرم , m
H	نسبت منظری, h/L
Ha	عدد هارتمن, $Ha = B_0 L\sqrt{\sigma_f/\rho_f \nu_f}$
K	ضریب هدایت گرمایی , $Wm^{-1}k^{-1}$
L	طول محفظه, m
l_0	طول ورودی محفظه, m
L_0	طول بی بعد ورودی محفظه, $L_0 = l_0/L$
Nu	عدد نوسلت موضعی , $Nu=hL/k$
Nu_m	عدد نوسلت متوسط
P	فشار سیال , Pa
P	فشار بی‌بعد سیال , $P = p/\rho_{nf} v_0^2$
Pe	عدد پکلت, $Pe = u_s d_s/\alpha_f$
Pr	عدد پرانتل , $Pr = \upsilon_f/\alpha_f$
Ra	عدد ریلی , $Ra = g\beta L^3(T_h - T_C)/\nu_f\,\alpha_f$
Re	عدد رینولدز , $Re = \rho\, v_0 L/\mu_f$
Ri	عدد ریچاردسون , $Ri = Gr/Re^2$
T	دما , K
u_s	سرعت حرکت براونی , $m.s^{-1}$
v_0	سرعت ورودی , $m.s^{-1}$

u, v	مولفه بردار سرعت در راستای x وy , $m.s^{-1}$
U, V	مولفه بدون بعد سرعت
x و y	مختصات کارتزین , m
X و Y	مختصات بدون بعد

علایم یونانی

α	ضریب پخش حرارتی , m^2s^{-1}
β	ضریب انبساط گرمایی , K^{-1}
θ	دمای بدون بعد , $\theta =(T-T_c)/(T_h-T_c)$
ρ	دانسیته , kgm^{-3}
μ	لزجت دینامیکی , Pa.s
ϕ	درصد حجمی نانوذرات جامد
σ	ضریب هدایت الکتریکی , $\mu s/cm$

زیرنویس ها

c	سرد
f	سیال
h	گرم
m	متوسط
s	نانوذرات
nf	نانوسیال

فصل اول

مقدمه

۱ - ۱ انتقال حرارت جابجایی

به طور کلی حرارت یا گرما در اثر اختلاف دما می‌تواند منتقل شود و همواره از سمت گرم‌تر به سمت سردتر حرکت می‌کند. این انتقال حرارت به سه روش هدایت، جابجایی و تشعشع انجام می‌گیرد. انتقال حرارت هدایتی وقتی خواهیم داشت که در یک محیط ساکن گرادیان دما وجود داشته باشد. جابجایی هنگام حرکت یک سیال از مجاور یک سطح با دمای متفاوت مطرح می‌شود. کلیه سطوح با توجه به دمایی که دارند از خود انرژی صادر می‌کنند. بنابراین در غیاب یک ماده واسطه بین دو سطح با دماهای متفاوت انتقال گرمای خالص تابشی رخ می-دهد.

انتقال حرارت جابجایی در واقع شامل دو مکانیزم است. به عبارتی علاوه بر پخش انرژی در اثر حرکت راندم مولکول‌ها، در اینجا حرارت از طریق حرکت کلی سیال نیز منتقل می‌شود. می‌توان گفت که حرکت کل سیال با دمای متفاوت با دمای سطح باعث انتقال حرارت می‌شود، که این انتقال حرارت شامل هر دو مکانیزم فوق است.

بر اساس طبیعت جریان سیال می‌توان انتقال حرارت جابجایی را به جابجایی اجباری و جابجایی آزاد تقسیم‌بندی کرد. در جابجایی اجباری حرکت سیال یک عامل خارجی، مانند پمپ، فن و یا وزش باد است. ولی در جابجایی آزاد (طبیعی) حرکت سیال در اثر نیروهای غوطه‌وری است که در نتیجه تغییرات جرم حجمی در اثر

گرادیان دما در سیال به وجود می‌آید. مواقعی که جریان جابجایی اجباری در اثر جریان سیال با سرعت کم داشته باشیم، جابجایی آزاد نیز می‌تواند در رفتار سیال اثر بگذارد و به عبارتی جابجایی توأم آزاد و اجباری داشته باشیم. همانطور که بیان شد، در جابجایی آزاد، حرکت سیال ناشی از نیروی غوطه‌وری در سیال است. نیروی غوطه‌وری در اثر حضور توأم گرادیان چگالی سیال و نیروی جسمی متناسب با آن به وجود می‌آید. نیروی جسمی، در عمل گرانش است هر چند که نیروی کریولیس در حرکت‌های چرخشی اقیانوس یا جو نیز می‌تواند به عنوان نیروی جسمی عمل کند. گرادیان چگالی جرمی در یک سیال به دلایل مختلف می‌تواند ایجاد شود که متداولترین آنها حضور گرادیان دماست.

چگالی گازها و مایعات به دما بستگی دارد و معمولاً با افزایش دما (به دلیل انبساط سیال) کاهش می‌یابد. البته باید توجه داشت که حضور گرادیان چگالی لزوماً موجب جریان جابجایی در سیال نمی‌شود. باید گرادیان چگالی به نحوی باشد که چگالی سیال در جهت گرانش کاهش یابد و اختلاف دما از یک حد بحرانی تجاوز کند تا با غلبه نیروهای غوطه‌وری بر اثرات نیروهای اصطکاکی شرایط ناپایدار ایجاد شود. اگر سیالی بین دو صفحه افقی در دماهای متفاوت قرار گرفته باشد دو حالت اتفاق می‌افتد. در یک حالت دمای صفحه پایینی بیشتر از دمای صفحه بالایی است و در حالت دیگر دمای صفحه پایینی کمتر از دمای صفحه بالایی است. در حالت بیشتر بودن دمای صفحه پایینی چون چگالی در جهت گرانش کاهش می‌یابد، اگر اختلاف دما از حد بحرانی بیشتر شود شرایط ناپایدار ایجاد می‌شود. در حالت کمتر بودن دمای صفحه پایینی چون چگالی در جهت نیروی گرانش کم نمی‌شود، امکان ایجاد جریان چرخشی و شرایط ناپایدار وجود نداشته و حرکت توده سیال به وجود نمی‌آید. نهایتاً در حالت اول انتقال حرارت از سطح گرم به سطح سرد در اثر جابجایی آزاد صورت می‌گیرد و در حالت دیگر انتقال حرارت از سطح گرم به سطح سرد در اثر هدایت روی می‌دهد[۱].

۱ - ۱- ۱ عدد ریچاردسون

عدد ریچاردسون عبارت است از نسبت مجذور سرعت طبیعی جریان سیال به مجذور سرعت اجباری سیال، سرعت طبیعی سیال را با v_c و سرعت اجباری آن را با v_0 نمایش می‌دهیم[۲].

بنابراین عدد ریچاردسون به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ri = \frac{v_c^2}{v_0^2} \qquad (۱-۱)$$

که در آن:

$$v_c = \sqrt{gL\beta(T_h - T_c)} \qquad (۱-۲)$$

همچنین عدد رینولدز و عدد گراشف را به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$Re = \frac{v_0 L}{\vartheta} \qquad (۱-۳)$$

$$Gr = \frac{g\beta L^3(T_h - T_c)}{\vartheta^2} \qquad (۱-۴)$$

با جایگذاری عبارات (۱-۲) و (۱-۳) در عبارات (۱-۱) و با به‌کارگیری عبارت (۱-۴)، عدد ریچاردسون به شکل زیر خواهد بود:

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \qquad (۱-۵)$$

معرف جریان جابه‌جایی اجباری عدد رینولدز و معرف جریان جابه‌جایی طبیعی عدد گراشف است. چون هدف از پروژه حاضر بررسی و مطالعه جریان جابه‌جایی توام اجباری و طبیعی می‌باشد، بنابراین از عدد ریچاردسون که تلفیقی از هر دو عدد بی‌بعد گراشف و رینولدز است استفاده می‌کنیم. این عدد بیان کننده تاثیرپذیری جریان‌های جابه‌جایی طبیعی و جابه‌جایی اجباری از یکدیگر است. در $Gr/Re^2 \ll 1$ می‌توان از جابه‌جایی آزاد و در $Gr/Re^2 \gg 1$ از جابه‌جایی اجباری چشم پوشید. جابجایی توام وقتی اتفاق می‌افتد که $Gr/Re^2 \approx 1$ باشد. به بیان دیگر هنگامی که اثرات توام جابجایی اجباری و آزاد وجود دارد که عدد ریچاردسون از مرتبه یک باشد. درحالی‌که عدد ریچاردسون خیلی کوچکتر از یک باشد اثرات جابجایی اجباری غالب است و اگر عدد ریچاردسون خیلی بزرگتر از یک باشد، جریان طبیعی است و اثرات جریان جابجایی اجباری قابل ملاحظه نیست.

۱ - ۱- ۲ نیروی غوطه‌وری

دانسیته سیال به دما و فشار استاتیکی آن بستگی دارد $\rho = \rho(T,P)$. اکنون رفتار سیالی را که در یک محیط ساکن قرار دارد مورد بررسی قرار می‌دهیم. در اثر تغییرات دمای موضعی سیال، دانسیته سیال در یک ناحیه خاص کاهش می‌یابد. بنابراین با تغییر دانسیته سیال، وزن سیال در این ناحیه کمتر از ناحیه‌های اطراف می‌شود و باعث به‌وجود آمدن اختلاف وزن و ایجاد نیروی غوطه‌وری می‌شود.

بنابراین حرکت سیال به‌واسطه تغییر گرادیان فشار در این دو ناحیه می‌باشد. در محیط ساکن که سیال دارای دانسیته ρ_c می‌باشد، گرادیان فشار برابر $dP_0/dx = -\rho_c g$ (گرادیان فشار هیدرواستاتیک) است. ولی در ناحیه‌ای که دانسیته تغییر کرده گرادیان فشار برابر $dP/dx = -\rho g$ می‌باشد که این دو مقدار با هم برابر نیستند. بنابراین اختلاف در گرادیان فشار باعث ایجاد نیروی غوطه‌وری برابر تفاوت این دو نیرو است $B(x,y) = g(\rho_c - \rho)$ و همچنین واضح است که مقدار نیروی غوطه‌وری به اختلاف دمای موضعی سیال بستگی دارد. اثر نیروی غوطه‌وری بر انتقال گرما در جابجایی اجباری شدیدا به جهت نیروی غوطه‌وری در مقایسه با جهت جریان اصلی بستگی دارد. جریان‌های اجباری رو به بالا و رو به پایین روی یک سطح عمودی گرم‌تر از محیط به‌ترتیب مثال‌هایی از جریان‌های همسو و مخالف می‌باشند که دو نوع اصلی حرکات در جابحایی آزاد و اجباری محسوب می‌شوند.

۱-۲ نانوسیالات

۱-۲-۱ روش های افزایش انتقال حرارت

امروزه به خاطر افزایش سریع تقاضاهای جهانی انرژی و کاربردهای وسیع انتقال حرارت، تقویت فرآیندهای انتقال حرارت قابل اطمینان و اقتصادی در صنایع امری مهم تلقی می شود و به سرعت رو به افزایش است. اگر اصول مربوط به روش های افزایش انتقال حرارت و طراحی دستگاههای انتقال حرارت به خوبی شناخته شوند، امکان صرفه جویی در انرژی و از طرفی کاهش آلودگی محیط زیست میسر خواهد شد. روش های متعددی به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت پیش روی مهندسان قرار دارد که اساس آنها بر سه عامل موثر در انتقال حرارت جابجایی استوار است:

۱- افزایش سطح تماس سیال با سطح مورد نظر مانند ایجاد پره و فین بر روی سطح

۲- افزایش اختلاف دما

۳- افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال و افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی سطح، که راه‌های متفاوتی برای این مورد وجود دارد از قبیل استفاده از سیال با ضریب انتقال حرارت جابجایی بالا، پرداخت سطح انتقال حرارت، ایجاد گردابه در سیال عامل، مکش و تزریق و راههای بسیار دیگر.

۱-۲-۲ معرفی نانوسیال و کاربردهای آن

سیستم‌های خنک کننده، یکی از مهمترین دغدغه‌های کارخانه‌ها و صنایعی مانند میکروالکترونیک و هر جایی است که به نوعی با انتقال گرما روبه‌رو باشد. استفاده از سیالات به منظور انتقال حرارت از سال‌ها پیش مورد توجه بوده است. سیالاتی همچون آب، روغن‌های معدنی، اتیلن گلیکول سیالاتی بودند که در گذشته نقش مهمی را در انتقال حرارت ایفا می‌کردند. این نوع سیالات دارای ضریب هدایت نسبتا پایینی می‌باشند و پاسخگوی انتظارات تکنولوژی مدرن نیستند. با پیشرفت فناوری در صنایعی مانند میکروالکترونیک که در مقیاس‌های زیر صد نانومتر عملیات‌های سریع و حجیم با سرعت‌های بسیار بالا اتفاق می‌افتد و استفاده از موتورهایی با توان و بار حرارتی بالا اهمیت به‌سزایی پیدا می‌کند، استفاده از سیستم‌های خنک کننده پیشرفته و بهینه، کاری اجتناب-ناپذیر است. بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال حرارت موجود، در اکثر مواقع به‌وسیله افزایش سطح آن‌ها صورت می-گیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه این دستگاه‌ها می‌شود؛ لذا برای غلبه بر این مشکل، به خنک‌کننده-های جدید و موثر نیاز است. سال‌ها پیش مشخص شده بود که با اضافه نمودن ذرات جامد به صورت معلق به سیال پایه، انتقال حرارت افزایش خواهد یافت. ذرات جامدی که به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند، در اندازه‌های نانو متری مورد استفاده قرار گرفته (1-100 nm) و از انواع مختلفی نظیر ذرات فلزی، غیر فلزی و یا پلیمری می‌باشند. این مساله یعنی افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال با افزودن ذرات ریز به سیال موضوع جدیدی نبوده و از حدود صد سال پیش در رابطه با ذرات میلی‌متری و میکرومتری مورد توجه قرار گرفته است.

نانوسیالات به عنوان راهکاری جدید در این زمینه مطرح شده است. نانوسیالات را می‌توان با تعریفی این چنین معرفی کرد که، سیالات حاوی ذرات معلق جامد که سبب ایجاد جهشی در پدیده‌ی انتقال حرارت می‌شوند. این نانو ذرات می‌توانند خواص انتقالی و حرارتی سیال پایه را تغییر دهند.

نانوسیالات به‌وسیله‌ی پخش و منتشر کردن ذرات در اندازه‌های نانومتری در سیالات متداول منتقل کننده‌ی گرما، به‌منظور افزایش هدایت گرمایی و بهبود عملکرد انتقال حرارت، ساخته می‌شوند.

بهبود خواص حرارتی نانوسیال احتیاج به انتخاب روش تهیه مناسب این سوسپانسیون‌ها دارد تا از ته‌نشینی و ناپایداری آن‌ها جلوگیری شود. مطالعات زیادی روی چگونگی تهیه نانو ذرات و روش‌های پراکنده‌سازی آن‌ها در سیال پایه انجام شده است که در اینجا به‌طور مختصر، دو روش متداول را که برای تهیه نانوسیال وجود دارد ذکر می‌کنیم. روش دو مرحله‌ای و روش یک مرحله‌ای این دو نوع روش می‌باشند. در روش دو مرحله‌ای، در مرحله نخست تولید نانوذرات به صورت یک پودر خشک بوده که اغلب توسط کندانس نمودن با یک گاز بی‌اثر انجام می-شود. در مرحله بعد نانوذرات تولید شده در سیال پخش می‌گردند. نکته‌ی اساسی در این روش تجمع نانوذرات بر اثر چسبندگی آن‌ها به همدیگر است که از معایب این روش به شمار می‌آید.

روش یک مرحله‌ای نیز به موازات روش دو مرحله‌ای پیشرفت کرده است؛ به طور مثال نانوسیالاتی شامل نانوذرات فلزی با استفاده از روش تبخیر مستقیم تهیه شده‌اند، در این روش از یک مرحله که تبخیر مستقیم است استفاده

می‌گردد. مزیت استفاده از این روش آن است که تجمع ذرات بر اثر چسبندگی آن‌ها به یکدیگر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و به حداقل می‌رسد.
نتایج در رابطه با نحوه‌ی انتقال حرارت بر روی چندین نمونه نانوسیال انجام شده، نشان می‌دهد که عملکرد نانوسیالات در انتقال حرارت معمولا بیشتر از آن چیزی است که به صورت نظری پیش‌بینی شده است. این واقعیت یک کشف اساسی در مسئله‌ی انتقال حرارت می‌باشد.
مکانیزم هدایت در سیالات در مقیاس ماکرو مولکولی بسیار پایین است، چرا که ضریب انتقال حرارت هدایتی سیالات نسبت به جامدات بسیار پایین است. از طرف دیگر ذرات و جامدات ریز کریستالی ضریب هدایتی در حدود ۳۱ برابر هدایت سیالات را دارند، به این ترتیب می‌توان ضریب هدایت سیالات را با استفاده از ذرات سوسپانس شده در آن‌ها تا حدود زیادی افزایش داد. این ذرات فلزی یا اکسیدهای فلزی از جنس مس، مس اکسید، اکسید آلومینیوم و ... می‌توانند باشند، یا می‌توان به جای آن‌ها از نانو لوله‌های کربنی معلق در سیال استفاده نمود.
نانوسیالات به علت افزایش قابل توجه خواص حرارتی، توجه بسیاری از دانشمندان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است، به عنوان مثال مقدار کمی (حدود یک درصد حجمی) از نانوذرات مس یا نانولوله‌های کربنی در اتیلن گلیکول یا روغن به ترتیب افزایش ۴۰ و ۱۵۰ درصدی در هدایت حرارتی این سیالات ایجاد می‌کند، در حالی که برای رسیدن به چنین افزایشی در سوسپانسیون‌های معمولی، به غلظت‌های بالاتر از ده درصد از ذرات احتیاج است. خواص استثنایی نانوسیالات شامل هدایت حرارتی بیشتر نسبت به سوسپانسیون‌های معمولی، رابطه‌ی غیرخطی بین هدایت و غلظت مواد جامد و بستگی شدید هدایت به دما است. این خواص استثنایی به همراه پایداری، روش تهیه نسبتا آسان و ویسکوزیته قابل قبول باعث شده تا این سیالات به عنوان یکی از مناسب‌ترین و قوی‌ترین انتخاب‌ها در زمینه سیالات خنک کننده مطرح شوند. بیشترین تحقیقات روی هدایت حرارتی نانوسیالات، در زمینه سیالات حاوی نانوذرات اکسید فلزی انجام شده است یکی از این پژوهش‌ها افزایش ۳۰ درصدی هدایت حرارتی را با اضافه کردن ۴/۳ درصد حجمی اکسید آلومینیوم به آب نشان می‌دهد. البته در یک پژوهش مشابه دیگر، محققان به افزایش ۱۵ درصدی هدایت گرمایی را برای همین نوع سیال با همین درصد حجمی دست یافتند که مشخص شد تفاوت این نتایج ناشی از تفاوت در اندازه نانوذرات به‌کار رفته در این دو تحقیق بوده است. قطر متوسط ذرات اکسید آلومینیوم به‌کار رفته در آزمایش اول ۱۳ نانومتر و در آزمایش دوم ۳۳ نانومتر بوده است.
با وجود افزایش انتقال حرارت توسط ذرات افزوده شده به سیال پایه، استفاده از ذرات جامدی این ابعاد، مشکلاتی نیز ایجاد می‌نماید که از آن جمله می‌توان به رسوب یا ته‌نشینی ذرات، ساییدگی، مسدود نمودن لوله‌ها، افزایش افت فشار در مجرای سیال اشاره کرد. پیشرفت‌های صورت گرفته در تکنولوژی مواد امکان غلبه بر مشکلات فوق را با استفاده از نانو ذرات جامد فراهم کرده است.
به علت نیاز به موتورهایی با نیروی بیشتر، تولید کنندگان کامیون دائما در جستجوی راه‌هایی برای گسترش طرح‌های آیرودینامیک در وسایل نقلیه‌شان هستند. از جمله تلاش‌های در این زمینه معطوف به کاهش مقدار انرژی مورد نیاز جهت مقابله با مقاومت‌های بالا می‌باشد. در یک کامیون سنگین معمولی، با سرعت ۱۱۰ کیلومتر در ساعت، در حدود ۶۵ درصد کل بازده موتور، صرف غلبه بر کشش‌های آیرودینامیک می‌شود که یکی از دلایل بزرگ این امر مقاومت هوا می‌باشد. در سیستم‌های خنک کننده، با توجه به نوع سیال مورد استفاده رادیاتورهای

متفاوتی مورد نیاز است. جهت انتقال حرارت از موتور به رادیاتور و در نهایت آزاد شدن این حرارت به محیط اطراف، به کارگیری سیالات با ظرفیت‌های گرمایی بالا ضروری می‌باشد. این سیالات قادرند بدون افزایش دمای خودشان حرارت را جذب و سپس آن را بسیار آهسته و بدون نیاز به مقدار سیال بیشتر به محیط اطراف منتقل نمایند که این انتقال آهسته‌ی گرما به محیط، موجب بزرگی اندازه‌ی رادیاتورهای وسایل نقلیه معمولی می‌شود. اگر سرعت انتقال حرارت توسط سیالات به‌گونه‌ای افزایش یابد، طراحی رادیاتورها آسان و موثرتر شده و می‌توان آن‌ها را کوچکتر ساخت. همچنین اندازه‌ی پمپ‌های خنک کننده‌ی وسایل نقلیه می‌تواند کاهش یابد. موتورهای کامیون‌ها نیز می‌توانند به علت کار کردن تحت دماهای بالاتر نیروی بیشتری تولید نمایند. افزایش هدایت گرمایی خنک‌کننده‌ها نیز می‌تواند ایده‌ای مناسب بر تولید پیل‌های سوختی پیشرفته و وسایل نقلیه‌ی دوگانه سوزالکتریکی باشد.

ویژگی‌های موتورهای دیزلی از نظر محدودیت در واکنش‌ها و راندمان کار به سرعت در حال دگرگون شدن است. سیستم‌های خنک‌کننده باید بتوانند تحت دماهای بالاتر کار کرده و مقادیر بیشتری گرما به محیط منتقل کنند. اندازه‌ی رادیاتورها نیز باید کاهش یابد تا تجهیزات اضافی کامیون‌ها حذف شده و رفت‌وآمد با آن‌ها ساده‌تر گردد. به‌طور واقع‌بینانه، محصور کردن نیروی خنک کننده‌ی بیشتر در فضای کمتر، تنها با به‌کاربرد فناوری‌های جدیدی مانند نانوسیالات ممکن خواهد بود. کاربرد دیگر این مدل‌سازی‌ها، پیش‌بینی میزان هدایت گرمایی یک نانوسیال بر مبنای غلظت، دمای عملیاتی و اندازه‌ی نانوذرات پخش شده در سیال می‌باشد. از این گذشته این امکان وجود دارد که خواص نانولایه‌هایی که روی سطح نانوذرات معلق تشکیل می‌شوند، عاملی برای افزایش بیشتر هدایت گرمایی نانوسیالات باشد. دو مکانیزم کلیدی حرکت براونی و نانولایه‌ها، تواما از مهم‌ترین عوامل افزایش هدایت گرمایی سیالات انتقال دهنده‌ی گرما می‌باشند. محققان در حال بررسی خطرات احتمالی نانوسیالات برای سیستم‌های رادیاتور می‌باشند. آن‌ها موفق به ساخت وسیله‌ای شدند که قادر به اندازه‌گیری و آزمایش تاثیر جریان‌های خنک‌کننده‌ی متفاوت بر عملکرد یک رادیاتور می‌باشد. تحقیقات آینده بر روی جنس نانوذرات به‌کار-رونده در ساخت نانوسیالات متمرکز خواهد بود.

۱-۳ میدان مغناطیسی

۱-۳-۱ معرفی نیروی لورنتس

اگر بار الکتریکی چشمه‌ای حرکت کند، علاوه بر اینکه در فضای پیرامونش میدان الکترواستاتیک E ایجاد می‌کند، میدان دیگری هم تولید می‌کند که میدان مغناطیسی B نام دارد[۳].

نیروی ناشی از میدان الکتریکی بر بار الکتریکی q به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_e = Eq \qquad (۶-۱)$$

نیروی ناشی از میدان مغناطیسی بر بار الکتریکی که با سرعت V در حال حرکت است به صورت زیر است:

$$F_B = q(V \times B) \qquad (۷-۱)$$

اگر روابط ۱-۶ و ۱-۷ را با هم ترکیب می‌کنیم نیروی لورنتس به‌دست می‌آید:

$$F = q[E + (V \times B)] \qquad (۸-۱)$$

نیروی لورنتس، کل نیروی الکترومغناطیسی است که بر بار q وارد می‌شود. این رابطه می‌گوید که اگر بار الکتریکی q در فضایی که شامل نیروی الکتریکی و مغناطیسی است حرکت کند، هم نیروی الکتریکی و هم نیروی مغناطیسی بر آن وارد می‌شود. توجه شود که اگر سرعت بار الکتریکی صفر باشد، اگرچه در میدان مغناطیسی قرار دارد اما از طرف میدان مغناطیسی به آن نیرویی وارد نمی‌شود. یا به عبارت دیگر بار الکتریکی ساکن وجود میدان مغناطیسی را حس نمی‌کند.

لازم به ذکر است که نیروی لورنتس یک فرضیه است و درستی آن توسط آزمایش اثبات می‌شود.

در یک رسانای ساکن چگالی جریان الکتریکی، J، مناسب است با نیروی وارده بر بارهای آزاد، که قانون اهم نمایانگر این واقعیت است:

$$J = \sigma E \qquad (۹-۱)$$

که در این رابطه σ نماد رسانایی الکتریکی می‌باشد.

در سیال رسانا همین قانون حکم‌فرماست، با این شرط که میدان الکتریکی در دستگاه مختصاتی اندازه‌گیری می‌شود که با سرعت موضعی سیال در حرکت است:

$$J = \sigma E_r = \sigma[E + (V \times B)] \qquad (۱۰-۱)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه ۱-۸ بر روی حجم سیال می‌توان نیروی حجمی الکترومغناطیسی وارد بر آن را به‌دست آورد. در این صورت باید $\sum q$ را با چگالی بار، ρ_e، و $\sum qV$ را با چگالی جریان، J، عوض کنیم. بنابراین نیروی لورنتس حجمی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید[۴]:

$$F = \rho_e E + (J \times B) \qquad (۱۱-۱)$$

در سرعت‌های معمولی حرکت سیال هادی الکتریسیته (بسیار کمتر از سرعت نور)، جمله اول رابطه ۱-۱۱ قابل اغماض است و می‌توان نوشت:

$$F = J \times B \qquad (۱۲-۱)$$

۱-۳-۲ تعریف چند پارامتر مهم در مسائل هیدرودینامیک مغناطیسی [۴]

سه پارامتر بی‌بعد مهم معمولا در معادلات هیدرودینامیک مغناطیسی ظاهر می‌شوند. پارامتر اول، عدد بی‌بعد به نام پارامتر اندرکنش می‌باشد:

$$N = \frac{\sigma B^2 l}{\rho V} \qquad (۱۳-۱)$$

که در آن σ رسانایی الکتریکی سیال، l طول مشخصه، ρ چگالی سیال، B میدان مغناطیسی اعمالی و V سرعت سیال می‌باشد. برای پی‌بردن به تعبیر فیزیکی این پارامتر قانون اهم را در حالتی که میدان الکتریکی نداشته باشیم در نظر بگیرید. در این صورت $|J| \propto \sigma VB$ و N را می‌توان به صورت نسبت نیروی لورنتس به نیروی اینرسی تعریف کرد.

پارامتر بی‌بعد دیگری که می‌توان تعریف کرد، عدد هارتمن است که ترکیبی از عدد رینولدز و پارامتر اندرکنش می‌باشد:

$$\mathrm{Ha} = (N\mathrm{Re}) = Bl\left[{}^{\sigma}/_{\mu}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۴-۱)$$

که در آن μ لزجت سیال می‌باشد و سایر پارامترها همانند قبل تعریف می‌شوند. واضح است که Ha^2 نسبت نیروی لورنتس به نیروی لزجت را بیان می‌کند.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در هیدرودینامیک مغناطیسی، عدد بی‌بعد به نام عدد رینولدز مغناطیسی می‌باشد که عبارت است از نسبت میدان مغناطیسی القایی به میدان مغناطیسی اعمالی:

$$Re_m = \mu_0 \sigma V I \qquad (۱۵-۱)$$

که در آن μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی محیط می‌باشد. هرگاه $\mathrm{Re_m}$ مقدار بزرگی اختیار کند، نفوذپذیری ضعیف است. در مقابل هرگاه $\mathrm{Re_m}$ کوچک باشد، V تاثیر کمی بر B دارد و میدان مغناطیسی القایی در مقایسه با میدان مغناطیسی اعمالی کوچک خواهد بود. در اکثر کاربردهای مهندسی $Re_m \ll 1$ است به‌طوری‌که می‌توان با تقریب بسیار خوبی میدان مغناطیسی را برابر میدان مغناطیسی اعمال شده و معلوم درنظر گرفت.

۱-۳-۳ تقریب‌های جریان هیدرودینامیک مغناطیسی

تقریب‌های جریان هیدرودینامیک مغناطیسی را برای سیال مایع هادی الکتریسیته به‌صورت زیر می‌توان به‌کار برد[۴]:

- میدان مغناطیسی القایی بسیار کوچک‌تر از میدان مغناطیسی اعمالی است ($Re_m \ll 1$).
- جریان الکتریکی ناشی از اثرات جابجایی بسیار کوچک‌تر از جریان الکتریکی ناشی از اثرات هدایتی (J) است.
- تاثیر میدان الکتریکی (E) در مقایسه با میدان مغناطیسی (B) در ایجاد تغییرات در جریان حرکت سیال قابل چشم‌پوشی است.
- در سیال مایع هادی الکتریسیته مورد بررسی بار الکتریکی فضا و مشتقات زمانی آن ناچیز می‌باشد.
- خواص سیال هادی الکتریسیته نظیر رسانایی الکتریکی (σ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ_0) ثابت است.

۱-۴ بررسی کارهای انجام شده

انتقال حرارت جابجایی توام همواره بدلیل کاربردهای گسترده آن در مناطق مختلف از جمله خنک‌کننده دستگاه‌های الکترونیکی، تجهیزات پردازش شیمیایی و جمع‌آموری انرژی خورشیدی [۵-۹] مورد علاقه زیادی قرار گرفته است.

سیدیک و همکاران [۱۰] اثر جابجایی توام روی یک محفظه پر از ذرات با استفاده از شبکه بولتزمن را بررسی کردند. آن‌ها اثرات عدد گراشوف(۱-۴۰۰) و اعداد رینولدز(۵۰-۱۰۰۰) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار عدد گراشف تاثیر قابل توجهی بر روی الگوی جریان و راندمان دارد.

نجم و همکاران [۱۱] انتقال حرارت جابجایی توام غیردائم در یک کانال افقی با بلوک‌های مستطیل شکل گرم که به صورت دوره‌ای در دیوار پایینی توزیع شده بودند، درحالی‌که دیوار بالایی را در یک درجه حرارت ثابت پایین