

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- مروری بر کارهای گذشته
۸	۳-۱- هدف و موضوع تحقیق
۹	۴-۱- روش انجام تحقیق
۱۱	فصل دوم بررسی نانو سیال و خواص آن
۱۲	۱-۲- مقدمه
۱۲	۲-۲- نانو سیال
۱۴	۱-۲-۲- مزیت نانوسیالات نسبت به سایر سیالات
۱۵	۳-۲- مکانیزم های افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات
۱۶	۱-۳-۲- حرکت براونی
۱۷	۲-۳-۲- پوشش مولکولی در سطح مشترک جامد-سیال
۱۷	۳-۳-۲- ماهیت انتقال حرارت در نانوذرات
۱۸	۴-۳-۲- اثر خوشه‌ای نانوذرات
۱۹	۴-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال
۱۹	۱-۴-۲- ضریب هدایت حرارتی
۲۲	۱-۴-۲-۱- ضریب هدایت حرارتی با تئوری حرکت براونی ذرات
۲۳	۲-۴-۲- ضریب هدایت حرارتی با تئوری نانو لایه
۲۶	۳-۴-۲- ضریب هدایت حرارتی با تئوری اثر خوشه ای نانوذرات
۲۶	۲-۴-۲- ویسکوزیته
۲۸	۳-۴-۲- چگالی
۲۹	۴-۴-۲- گرمای ویژه
۳۰	۵-۲- مدلسازی نانوسیال
۳۰	۱-۵-۲- مدل تک فاز
۳۰	۱-۵-۲-۱- نمونه‌ای از مدل تک‌فازی
۳۱	۲-۵-۲- مدل دو فاز

۳۱	۲-۵-۲-۱. نمونه‌ای از مدل دو فازی
۳۳	۲-۶- جمع‌بندی
۳۴	فصل سوم معادلات حاکم
۳۵	۳-۱- مقدمه
۳۶	۳-۲- معادلات حاکم بر جریان سیال و شرایط مرزی
۳۷	۳-۲-۱- شرایط مرزی
۳۸	۳-۲-۱-۱- دیواره جامد
۳۸	۳-۲-۱-۲- محور تقارن
۳۸	۳-۳- شکل بدون بعد معادلات حاکم و شرایط مرزی
۴۰	۳-۴- خصوصیات نانوسیال
۴۱	۳-۵- محاسبه عدد ناسلت و تابع جریان
۴۲	۳-۶- دامنه محاسبات
۴۴	فصل چهارم محاسبات عددی
۴۵	۴-۱- مقدمه
۴۶	۴-۲- شکل کلی معادله انفصال
۴۶	۴-۳- روش بدست آوردن معادله انفصال
۴۷	۴-۳-۱- معادله دیفرانسیل کلی
۴۸	۴-۳-۲- شکل تفاضل محدود معادله کلی ϕ
۴۹	۴-۳-۳- بدست آوردن معادله انفصال با استفاده از طرح‌های مختلف
۵۰	۴-۳-۳-۱- طرح تفاضل مرکزی
۵۱	۴-۳-۳-۲- طرح بالادست
۵۲	۴-۳-۳-۳- طرح پیوندی
۵۳	۴-۳-۴- تکمیل معادله انفصال
۵۳	۴-۴- حل معادلات حاکم بر جریان
۵۴	۴-۴-۱- شبکه‌ها به جا شده
۵۸	۴-۴-۲- الگوریتم سیمپلر
۵۸	۴-۴-۳- نحوه اعمال شرایط مرزی
۵۹	۴-۴-۳-۱- شرایط مرزی معادله u
۶۰	۴-۴-۳-۲- شرایط مرزی معادله v
۶۱	۴-۴-۳-۳- شرایط مرزی معادله T

- ۴-۳-۵- نحوه حل دستگاه معادلات جبری ۶۱
- ۴-۳-۵-۱. الگوریتم ماتریس سه قطری ۶۲
- ۴-۵- برنامه کامپیوتری ۶۳

۶۷ فصل پنجم بررسی نتایج

- ۵-۱- مقدمه ۶۸
- ۵-۲- بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری ۶۸
- ۵-۲-۱- مدلسازی و مقایسه جریان جابجایی آزاد هوا درون حلقه ۶۹
- ۵-۲-۲- مدلسازی و مقایسه جریان جابجایی آزاد نانوسیال درون حلقه ۷۱
- ۵-۳- تعیین شبکه مناسب ۷۲
- ۵-۴- تعیین خواص ترموفیزیکی ۷۴
- ۵-۵- بررسی نتایج ۷۵
- ۵-۵-۱- جریان جابجایی آزاد نانوسیال درون حلقه ۷۵
- ۵-۵-۱-۱. بررسی جابجایی آزاد نانوسیال آب- مس ۷۵
- ۵-۵-۱-۲. بررسی جابجایی آزاد نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم و آب- اکسید تیتانیم ۸۱
- ۵-۵-۱-۳. تاثیر نانوذرات مختلف بر میدان جریان و انتقال حرارت ۸۳
- ۵-۵-۱-۴. جمع بندی و نتیجه گیری ۸۵
- ۵-۵-۲- جریان جابجایی آزاد نانوسیال درون حلقه به همراه پره ۸۵
- ۵-۵-۲-۱. تاثیر تعداد پره ها بر میدان جریان و میدان دما ۸۶
- ۵-۵-۲-۲. تاثیر طول پره ها بر میدان جریان و میدان دما ۹۲
- ۵-۵-۲-۳. تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر میدان جریان و میدان دما ۹۷
- ۵-۵-۲-۴. جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۳

۱۰۴ فصل ششم جمع بندی و پیشنهادات

- ۶-۱- جمع بندی ۱۰۵
- ۶-۲- پیشنهادات ۱۰۶

۱۰۷ منابع و مراجع

فهرست شکلهای

صفحه	عنوان
۹	شکل ۱-۱: هندسه و محور مختصات مسئله
۱۶	شکل ۱-۲: طرحی از مسیر حرکت براونی یک ذره
۱۸	شکل ۲-۲: انواع مکانیزمهای انتقال حرارت در نانوذرات
۳۶	شکل ۱-۳: هندسه و میدان حل مسئله
۳۶	شکل ۲-۳: حالت‌های مختلف مورد بررسی
۴۹	شکل ۱-۴: حجم کنترل اصلی برای بدست آوردن معادله انفصال کلی
۵۴	شکل ۲-۴: مکانهای جابجا شده برای u و v
۵۵	شکل ۳-۴: حجم کنترل u و v
۵۹	شکل ۴-۴: حجم کنترل سرعت u در مجاورت دیوار پایینی حلقه
۵۹	شکل ۵-۴: توزیع سرعت نزدیک دیواره پایینی حلقه
۶۲	شکل ۶-۴: نمایش روش خط به خط
۶۶	شکل ۷-۴: نمودارگردشی برنامه کامپیوتری
۶۹	شکل ۱-۵: هندسه حل کنجرس و هانجلیک [۲۵]
۷۰	شکل ۲-۵: تغییرات عدد ناسلت موضعی نرمالایز شده برحسب زاویه: مقایسه کار حاضر با مراجع [۲۵ و ۲۲]
۷۰	شکل ۳-۵: تغییرات دما در راستای شعاع در زوایای $۹۰,۰$ و ۱۸۰ درجه: مقایسه کار حاضر با مراجع [۲۵ و ۲۲]
۷۱	شکل ۴-۵: مقایسه تغییرات سرعت مماسی در راستای شعاع با نتایج مرجع [۲۳] (خطوط: نتایج مرجع [۲۳]، نمادها: نتایج کار حاضر)
۷۲	شکل ۵-۵: تغییرات عدد ناسلت متوسط برحسب کسر حجمی نانوذرات: مقایسه کار حاضر با نتایج ابونادا (a) $Ra=۱۰^۳$ (b) $Ra=۱۰^۴$ (c) $Ra=۱۰^۵$

شکل ۵-۶: تغییرات دمای نانوسیال در زاویه ۹۰ درجه درون حلقه با وجود دو پره با شبکه های مختلف (a) دو پره در حالت عمودی (b) دو پره در حالت افقی

۷۳

شکل ۵-۷: تغییرات سرعت نانوسیال در زاویه ۹۰ درجه درون حلقه با وجود دو پره با شبکه های مختلف (a) دو پره در حالت عمودی (b) دو پره در حالت افقی

۷۴

شکل ۵-۸: هندسه حل حلقه بدون پره

۷۵

شکل ۵-۹: هندسه های مختلف حل حلقه پره دار

۷۵

شکل ۵-۱۰: خطوط همدمای در حلقه با نانوذرات مس برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات و اعداد رایلی مختلف

۷۷

شکل ۵-۱۱: خطوط جریان در حلقه با نانوذرات مس برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات و اعداد رایلی مختلف

۷۹

شکل ۵-۱۲: تغییرات عدد ناسلت موضعی بر روی استوانه داخلی برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات مس (a) $Ra=10^3$ (b) $Ra=10^4$ (c) $Ra=10^5$

۷۹

شکل ۵-۱۳: تغییرات عدد ناسلت موضعی و کاهش عدد ناسلت روی استوانه داخلی در $Ra=10^4$

۸۰

شکل ۵-۱۴: تغییرات گرادیان دما روی استوانه داخلی برای مقادیر مختلف کسر حجمی مختلف نانوذرات در $Ra=10^5$

۸۰

شکل ۵-۱۵: تغییرات نسبت ضریب هدایت حرارتی بر حسب کسر حجمی نانوذرات برای نانوسیال آب - مس

۸۱

شکل ۵-۱۶: تغییرات عدد ناسلت موضعی روی استوانه داخلی برای کسر حجمی مختلف نانوذرات اکسید آلومینیوم (a) $Ra=10^3$ (b) $Ra=10^4$ (c) $Ra=10^5$

۸۲

شکل ۵-۱۷: تغییرات عدد ناسلت موضعی روی استوانه داخلی برای کسر حجمی مختلف نانوذرات اکسید تیتانیوم (a) $Ra=10^3$ (b) $Ra=10^4$ (c) $Ra=10^5$

۸۳

شکل ۵-۱۸: تغییرات عدد ناسلت موضعی روی استوانه داخلی برای نانوذرات مختلف (a) $Ra=10^3$ (b) $Ra=10^4$ (c) $Ra=10^5$

۸۵

شکل ۵-۱۹: خطوط جریان برای نانوسیال آب- مس برای حالات مختلف مورد بررسی ($Ra=10^5, \phi=0.05, L_{fin}=0.2$)

۸۷

شکل ۵-۲۰: خطوط جریان برای نانوسیال آب- مس برای حالات مختلف مورد بررسی

۸۹

($Ra=10^5, \varphi = 0/0.5, L_{fin}=0/2$)

شکل ۵-۲۱: تغییرات عدد ناسلت موضعی روی استوانه داخلی و پره‌ها برای اعداد رایلی مختلف و

۹۱

حالات مختلف مورد بررسی ($\varphi = 0/0.5, L_{fin}=0/2$)

شکل ۵-۲۲: تغییرات گرادیان دما در راستای مماسی تا زاویه ۹۰ درجه ($\varphi = 0/0.5, L_{fin}=0/2$)

۹۱

($Ra=10^5$)

شکل ۵-۲۳: خطوط هم‌دما برای کسر حجمی ۰/۰۵ و دو طول مختلف پره‌ها در اعداد رایلی

۹۳

مختلف

شکل ۵-۲۴: خطوط جریان برای کسر حجمی ۰/۰۵ و دو طول مختلف پره‌ها در اعداد رایلی

۹۴

مختلف

شکل ۵-۲۵: تغییرات عدد ناسلت متوسط، نرخ انتقال حرارت نرمالایز شده، ماکزیمم مقدار

۹۶

قدر مطلق تابع جریان نسبت به طول پره‌ها برای تعداد مختلف پره‌ها در اعداد رایلی مختلف

شکل ۵-۲۶: تغییرات دما در جهت شعاعی در زاویه ۴۵ درجه با طول مختلف پره‌ها در حالت a و

۹۶

c

شکل ۵-۲۷: تغییرات عدد ناسلت موضعی روی سطح استوانه داخلی و پره‌ها برای کسر حجمی

۹۸

مختلف نانوذرات

شکل ۵-۲۸: شکل خطوط ایزوترم و خطوط جریان برای اعداد رایلی مختلف و کسر حجمی مختلف

۹۹

نانوذرات در $L_{fin}=0/4$ --- ($\varphi = 0$) --- ($\varphi = 0/1$)

شکل ۵-۲۹: (a) تغییرات عدد ناسلت متوسط (b) ماکزیمم قدر مطلق تابع جریان با کسر حجمی

۱۰۰

نانوذرات برای اعداد رایلی مختلف

شکل ۵-۳۰: تغییرات عدد ناسلت متوسط با کسر حجمی نانوذرات برای دو طول مختلف پره در

۱۰۱

اعداد رایلی متفاوت

شکل ۵-۳۱: تغییرات عدد ناسلت متوسط با کسر حجمی نانوذرات برای حالات مختلف مورد بررسی

۱۰۲

در اعداد رایلی متفاوت

فهرست جدولها

صفحه	عنوان
۱۳	جدول ۱-۲- مقایسه ضریب رسانایی فلزات و مایعات
۴۳	جدول ۱-۳- اعداد رایلی بحرانی برحسب نسبت قطرها
۵۵	جدول ۱-۴- مقادیر و Γ برای معادله دیفرانسیلی کلی حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت
۷۳	جدول ۱-۵- شرایط مسئله برای انتخاب شبکه
۷۳	جدول ۲-۵- تعداد نقاط در نظر گرفته شده برای یافتن شبکه مناسب
۷۴	جدول ۳-۵- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات در دمای 300 K
۸۱	جدول ۴-۵- عدد ناسلت متوسط برای مقادیر مختلف عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات
۸۴	جدول ۵-۵- عدد ناسلت متوسط برای سیال پایه و نانوسیالات مختلف در اعداد رایلی متفاوت
	جدول ۶-۵- درصد افزایش نسبی عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ به ۰/۱
۱۰۲	برای حالات مختلف مورد بررسی در اعداد رایلی متفاوت

فهرست علائم و اختصارات (Abbreviations)

ظرفیت حرارتی ویژه ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	c_p
قطر استوانه (m) / کندانانس پخش	D
قدرت جابجایی ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	F
شتاب جاذبه (m s^{-2})	g
ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	h
ضریب هدایت حرارتی ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	k
نسبت ضریب هدایت حرارتی پره به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه	kr
فاصله بین دو استوانه داخلی و خارجی ($l = r_o - r_i$)	l
طول پره (m)	l_{fin}
طول بدون بعد پره	L_{fin}
ضریب شکل	n
عدد ناسلت	Nu
فشار (Nm^{-2})	p
فشار بدون بعد	P
عدد پرانتل	Pr
مختصات شعاعی از مرکز استوانه داخلی	r
مختصات شعاعی بدون بعد	R
متغیر بدون بعد	R^*
عدد رایلی	Ra
عدد رینولدز	Re
جمله چشمه	S

دمای (K)	T
دمای بدون بعد	\bar{T}
سرعت مماسی و شعاعی (ms^{-1})	u, v
سرعت مماسی و شعاعی بدون بعد	U, V

حروف یونانی

ضریب زیر تخفیف/ نفوذ حرارتی ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	α
ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})	β
فاصله	δ_i
دلتای کرونگر	δ_{ij}
کسر حجمی نانوذره	φ
متغییر عمومی	ϕ
ضریب نفوذ	λ
ویسکوزیته دینامیکی (N s m^{-2})	μ
ویسکوزیته سینماتیکی ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	ν
متغییر موضعی	θ
جرم مخصوص (kg m^{-3})	ρ
تابع جریان ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	ψ
تابع جریان بدون بعد	Ψ
تنش برشی (Nm^{-2})	τ
فاصله	Δ
ضریب نفوذ	Γ

زیر نویس

متوسط	avg
وجه شرقی حجم کنترل	e

گره شرقی	E
مقادیر معادل	eff
سیال پایه	f
داخلی	i
عنصر جمع‌بندی در شکل تانسوری معادلات	i,j
وجه شمالی حجم کنترل	n
گره شمالی	N
همسایه	nb
نانوسیال	nf
خارجی	o
نانوذره	p
گره وسطی	P
وجه جنوبی حجم کنترل	s
گره جنوبی	S
وجه غربی حجم کنترل	w
مربوط به دیواره	w
گره غربی	W

بالا نویس

تصحیح	'
مقدار نرمالایز شده	*

فصل اول

مقدمه

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

در دهه های اخیر پیشرفت زیادی در علوم مختلف روی داده است، که پیامد مستقیم آن رشد تکنولوژی و راحتی و آسایش هر چه بیشتر انسانهاست. علوم مربوط به انتقال حرارت نیز از این قضیه مستثنی نبوده اند و در سالهای اخیر دستخوش تغییرات فراوانی شده است. با توجه به مصرف قابل توجه انرژی در زمینه انتقال حرارت در صنعت و لزوم بهینه سازی مصرف انرژی در عصر جدید، بررسی این بخش از مکانیک سیالات بیشتر مورد توجه قرار می گیرد. از آنجا که انتقال حرارت سیالات از اهمیت فراوانی در کاربردهای مهندسی برخوردار است، به همین منظور محققان علوم گرمایی و مهندسان، روشهای متعددی را برای افزایش انتقال حرارت پیشنهاد نموده اند. انتقال گرما توسط عوامل گوناگونی مانند تغییر هندسه و خواص سیال، شرایط مرزی یا افزایش ضریب رسانایی سیال قابل بهبود و افزایش است. سیالات عادی مانند آب، روغن و اتیلن گلیکول به طور گسترده به عنوان سیالات خنک کننده در صنعت استفاده می شوند و برای اغلب واحدهای صنعتی از اهمیت ویژه ای برخوردارند. با وجود تحقیقات گسترده ای که در زمینه انتقال حرارت صورت گرفته است، پیشرفت های قابل ملاحظه ای در قابلیت انتقال حرارت سیالات عامل حاصل نگردیده است. تکنولوژی جدید برای افزایش انتقال

حرارت استفاده از ذرات در مقیاس نانو معلق در سیال اصلی که نانوسیال شناخته می شود، است. مطالعات زیادی روی مخلوط‌هایی شامل ذرات جامد صورت گرفته است. از آنجا که این تحقیقات به مخلوط‌های شامل ذرات جامد در ابعاد میلی‌متر یا بعضاً میکرومتر محدود شده‌اند، ته نشین شدن ذرات جامد در مخلوط غیر قابل اجتناب بوده است و این دلیل اصلی عدم استفاده فراگیر از سیالات حاوی ذرات جامد در مقیاس میکرومتر شده است. در حالیکه ذرات نانو (در ابعاد ۱۵ تا ۴۰ نانومتر) کاملاً پایدارند و در شرایط استاتیک پدیده ته نشینی در مورد آنها مشاهده نمی‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که ضریب انتقال حرارت سیالات شامل ذرات نانو بیشتر از مخلوط‌های شامل ذرات با ابعاد میکرومتر است.

نانوسیالات به علت افزایش قابل توجه خواص حرارتی، نظر بسیاری از دانشمندان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند. به عنوان مثال مقدار کمی (حدود یک درصد حجمی) از نانوذرات مس یا نانولوله های 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 افزایش هدایت حرارتی در سوسپانسیون های معمولی، به غلظتهای بالاتر از ده درصد از ذرات احتیاج است. این در حالی است که مشکلات پایداری این سوسپانسیون ها در غلظتهای بالا مانع از استفاده گسترده آنها در انتقال حرارت می‌شود.

نانوسیالات در صنایع نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. ایجاد ماشینهای جدید MEMS^۱ منجر به بررسی این گونه وسایل در مقیاس میکرو و کوچکتر شد. پردازشگرها در ابعاد میکرو سریعتر بوده و بار حرارتی بزرگتری هم دارند. همچنین ساختن میکروتوربین‌ها و میکروموتورها باعث شد تا برای سرد کردن این وسایل نیاز جدی احساس شود. میکرو مبدل‌های حرارتی در این میان، قابلیت مناسبی برای خنک کاری آنها دارند. اما کمبود سطح تماس مناسب و ویژگی های

¹ Micro Elector Mechanical Systems

ساخت این مبدل‌ها و نیز پائین بودن ضریب رسانایی سیالات عادی از مشکلات خنک‌کاری در MEMS است. در این میان، نانوسیالات با قابلیت‌های حرارتی بهتر می‌توانند موثر باشند. با اینحال هنوز عملکرد اینگونه سیالات در شرایط و هندسه‌های مختلف بطور دقیق مشخص نشده است و تحقیقات ادامه دارد.

انتقال حرارت در بین دو استوانه هم محور افقی دارای کاربردهای متنوع مهندسی در مبدل‌های حرارتی، کلکتورهای خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمایش و سرمایش اجزای الکترونیکی می‌باشد و در بسیاری از تحقیقات بعنوان یک هندسه مدل از آن استفاده می‌شود. لذا افزایش انتقال حرارت نیز در این هندسه از اهمیت زیادی برخوردار است. در بسیاری از موارد انتقال حرارت جابجایی آزاد، مکانیزم اصلی انتقال حرارت در این هندسه می‌باشد. استفاده از نانوسیال در هندسه مزبور جهت افزایش انتقال حرارت مقرون به صرفه به نظر می‌رسد. البته بحث‌هایی در مورد تاثیر نانوذرات در افزایش انتقال حرارت به روش جابجایی آزاد وجود دارد.

۲-۱- مروری بر کارهای گذشته

افزایش انتقال حرارت همواره در صنعت مورد توجه بوده است. از آنجا که سیالات متداول در صنایع نظیر آب، روغن و اتیلن گلیکول، نسبت به اغلب جامدات دارای خواص حرارتی پایینتری می‌باشند، لذا از زمان‌های قدیم افزایش کارایی حرارتی سیالات مورد توجه بوده است. در این راستا ماکسول^۲ در سال ۱۹۷۳ تحقیقاتی انجام داده است [۱]. وی نشان داد که افزودن ذرات در مقیاس میلی و میکرومتر موجب افزایش هدایت حرارتی مخلوط می‌شود. اما از آنجا که این نوع ذرات سریع ته نشین می‌شوند و موجب مسدود شدن مجاری و فرسایش خطوط لوله می‌گردند، بنابراین نسل جدیدی از مخلوط‌های جامد-مایع به نام نانوسیال توسط چوی^۳ در سال

² Maxwell

³Choi

۱۹۹۵ پیشنهاد شد [۲]. برای تحلیل بهتر در زمینه انتقال حرارت در نانوسیالات، نیاز به بررسی خواص فیزیکی نانوسیال می‌باشد. در اکثر تحقیقات منتشر شده، خواص فیزیکی نانوسیال نظیر ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته بصورت تابعی از کسر حجمی نانوذرات گزارش شده است [۱۰-۳].

کبلینسکی^۴ و همکاران [۱۱] به بررسی مدلی جهت افزایش انتقال گرما در نانوسیال پرداختند. با توجه به مدل آنها، روابط مختلفی برای خواص نانوسیال ارائه شد [۱۴-۱۲]. در زمینه انتقال حرارت جابجایی اجباری، محققین افزایش نرخ انتقال حرارت را در اثر افزودن نانوذرات گزارش نموده‌اند [۱۷-۱۵].

بررسی تاثیر افزودن نانوذرات به سیال پایه در افزایش انتقال حرارت به روش جابجایی آزاد در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به بررسی جریان جابجایی آزاد نانوسیال آب-مس در یک محفظه‌ی دوبعدی توسط خانافر^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۳ اشاره نمود [۱۸]. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانوذرات به سیال پایه موجب افزایش انتقال حرارت برای هر عدد گراشفی می‌شود. نتایج مشابهی توسط ازتپ^۶ و ابونادا^۷ در سال ۲۰۰۸ ارائه شد، که در آن افزایش انتقال حرارت از طریق افزودن نانوذرات مشاهده شده است [۱۹]. اگر چه در سال ۲۰۰۳ نتایج آزمایشگاهی متناقضی توسط پوترا^۸ و همکاران [۲۰] گزارش شده بود. بررسی آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی برای نانوسیال کمتر از مقدار آن برای سیال خالص می‌باشد. تحقیقات تجربی دیگری نیز در سال ۲۰۰۴ توسط ون^۹ و دینگ^{۱۰} انجام شده است که نشانگر کاهش محسوسی در

⁴ Keblineski

⁵ Khanafer

⁶ Oztop

⁷ Abu-Nada

⁸ Putra

⁹ Van

¹⁰ Ding

انتقال حرارت از طریق افزودن نانوسیال می‌باشد [۲۱]. بطور کلی انتقال حرارت جابجایی طبیعی از خواص نانوسیال از قبیل ویسکوزیته و هدایت حرارتی تاثیر می‌پذیرد.

در زمینه انتقال حرارت جابجایی آزاد در حلقه هم محور افقی نیز بررسی‌های عددی و تجربی زیادی انجام شده است، که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌گردد. اولین مطالعات تجربی در مورد انتقال حرارت دائمی و آرام در لوله‌های هم مرکز افقی توسط کوهن^{۱۱} و گلداشتین^{۱۲} در سال ۱۹۷۶ انجام شده است [۲۲]. آنها نتایج تجربی و عددی خود را برای عدد رایلی مشخصی در استوانه هم مرکز افقی با دمای ثابت ارائه کرده‌اند. در این بررسی توزیع دما و ضریب انتقال حرارت موضعی به صورت تجربی بدست آمده است و با نتایج عددی مقایسه گردیده است که مطابقت خوبی بین آنها مشاهده شده است. جابجایی آزاد در حلقه افقی، با شرایط مرزی شار ثابت بر روی استوانه داخلی و دما ثابت در استوانه خارجی به طور عددی توسط کومار^{۱۳} در سال ۱۹۸۸ بررسی شده است [۲۳]. نتایج عددی میدان جریان و دما و انتقال حرارت برای محدوده وسیعی از اعداد رایلی و نسبت قطر مختلف ارائه گردیده است. نتایج او نشان داد که دمای دیواره داخلی به شدت وابسته به نسبت قطر است و نسبت دمای ماکزیمم به دمای متوسط با افزایش عدد رایلی افزایش می‌یابد ولی با نسبت قطر رابطه معکوس دارد. همچنین نرخ انتقال حرارت در حالت شار ثابت نسبت به دما ثابت به ازای اختلاف دمای یکسان، بیشتر است و با افزایش عدد رایلی نیز افزایش می‌یابد. انتقال حرارت جابجایی طبیعی در بین دو استوانه افقی هم محور و غیر هم محور با شرایط مرزی مختلط به صورت عددی با روش تفاضل محدود توسط هو^{۱۴} و همکاران در سال ۱۹۸۹ بررسی شده است [۲۴]. نتایج عددی بدست آمده نشان می‌دهد که جریان سیال و نرخ انتقال حرارت در حلقه وابسته به عدد

¹¹ kuehn

¹² Goldstein

¹³ Kumar

¹⁴ Ho

رایلی و مرکزیت حلقه است و نسبت به عدد پرانتل محسوس نمی‌باشد. همچنین مشخص شد که شرط مرزی حرارتی بر روی نرخ انتقال حرارت در حلقه موثر است. انتقال حرارت جابجایی آزاد مغشوش در حلقه افقی هم محور و غیر هم محور توسط هانجلیک^{۱۵} و کنجرس^{۱۶} در سال ۱۹۹۵ بررسی شد [۲۵]. تحقیقات آنها نشان داد که به طور کلی الگوی جریان محاسبه شده به خصوص در عدد رایلی بالا، با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد. همچنین با جابجایی استوانه داخلی به طرف بالا سطح اغتشاش کاهش می‌یابد، اما با جابجایی به طرف پایین سطح اغتشاش و انتقال حرارت کلی افزایش می‌یابد. انتقال حرارت جابجایی آزاد مختلط در حلقه افقی برای دو آرایش مختلف با سطح داخلی به صورت مربعی و لوزی شکل با شرایط مرزی شار ثابت بر روی سطح داخلی و دمای ثابت بر روی سطح خارجی توسط شایجا^{۱۷} و همکاران در سال ۲۰۰۸ بررسی شد [۲۶]. نتایج آنها نشان داد که جریان در حلقه با دو و چهار گردابه در عدد گراشف متفاوت مشخص می‌گردد. همچنین عدد ناسلت موضعی بر روی مرز داخلی به شدت وابسته به نسبت هدایت حرارتی سیال به سطح داخلی است. نوباری و مهربانی در سال ۲۰۱۰ به مطالعه عددی جریان سیال در حلقه غیر هم محور خمیده پرداختند [۲۷]. در مطالعه آنها اثر انحنا، عدد پرانتل بر روی میدان جریان و خواص حرارتی در شرایط مرزی مختلف بررسی شده است.

اثر وجود پره روی استوانه داخلی بر الگوی جریان، توزیع دما و عدد ناسلت در بین استوانه-های هم مرکز افقی توسط پاتنکار^{۱۸} و چایی^{۱۹} در سال ۱۹۹۳ بررسی شده است [۲۸]. بر اساس نتایج آنها، آرایش پره‌ها تاثیر کمی بر عدد ناسلت دارد. اما به طور کلی پره‌ها جابجایی آزاد را کاهش می‌دهند، لذا با افزایش طول پره‌ها عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین اثر وجود پره-های شعاعی روی استوانه داخلی در جریان جابجایی آزاد مغشوش توسط رهنما و فرهادی در

¹⁷ Hanjalic

¹⁸ Kenjeres

¹⁹ Shija

¹⁵ Patankar

¹⁶Chai

سال ۲۰۰۴ بررسی شده است [۲۹]. نتایج آنها مشخص می‌کند که طول بیشتر پره‌ها باعث بلوکه شدن جریان می‌شود و نرخ انتقال حرارت با افزودن پره کاهش می‌یابد.

در زمینه انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در حلقه هم محور نیز بررسی‌های عددی محدودی انجام شده است. ابونادا و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی افزایش انتقال حرارت جابجایی آرام آزاد در حلقه‌های هم محور افقی با نانوسیال آب و اکسید آلومینیوم پرداختند [۳۰]. بررسیهای آنها نشان داد که در اعداد رایلی بالا، افزودن نانوذرات موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد. همچنین ابونادا در سال ۲۰۰۹ به بررسی تاثیر ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال آب و اکسید آلومینیوم با استفاده از مدل‌های مختلف، بر افزایش انتقال حرارت در جابجایی آزاد در حلقه هم محور پرداخته است [۳۱]. نتایج او نشان می‌دهد با استفاده از مدل ویسکوزیته و هدایت حرارتی متغییر در $Ra \geq 10^4$ عدد ناسلت با افزودن نانوذرات کاهش می‌یابد هرچند در $Ra = 10^3$ عدد ناسلت با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد.

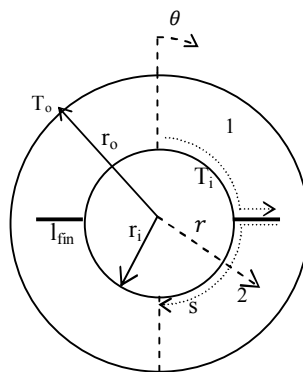
۱-۳- هدف و موضوع تحقیق

با توجه بر مرور انجام گرفته در متون علمی قابل دسترس، بررسی عددی جریان نانوسیال داخل حلقه هم محور با پره‌های شعاعی مشاهده نگردیده است. لذا هدف از این پروژه مطالعه عددی میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال در حلقه هم محور با پره‌های شعاعی در جریان جابجایی آزاد آرام می‌باشد.

در این پژوهش ابتدا نحوه مدلسازی خواص فیزیکی نانوسیال مرور می‌شود. سپس معادلات دیفرانسیل و شرایط مرزی حاکم بر جریان نانوسیال و انتقال حرارت به صورت مدل تک فاز، در حلقه هم محور با پره‌های شعاعی تعیین می‌شوند. در ادامه با توجه به هندسه حل و شرایط مرزی، برنامه کامپیوتری موجود اصلاح و آماده می‌گردد. برای اطمینان از صحت برنامه اصلاح

شده، نتایج مدل‌سازی برای جریان هوا و نانوسیال بین دو استوانه بدون پره با نتایج کارهای مشابه قبلی مقایسه می‌گردد. سپس به حل معادلات توسط کد کامپیوتری توسعه داده شده برای جریان داخل حلقه هم محور با پره‌های شعاعی پرداخته می‌شود. با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی نانوسیال، میدان جریان و انتقال حرارت در شرایط مختلف بررسی می‌شود. تاثیر تغییر تعداد پره‌ها، ابعاد پره‌ها، نوع نانوذرات و درصد حجمی نانو ذرات بر میدان جریان و انتقال حرارت مطالعه می‌شود.

در شکل (۱-۱) هندسه یکی از حالات مورد بررسی نشان داده شده است. در این شکل استوانه داخلی با شعاع r_i و دمای T_i و استوانه خارجی با شعاع r_o و دمای T_o نشان داده شده است. همچنین دو پره نازک با طول l_{fin} بر روی استوانه داخلی قرار دارد.



شکل ۱-۱: هندسه و محور مختصات مسئله

۴-۱- روش انجام تحقیق

روش حل در این تحقیق، روش عددی می‌باشد. حل معادلات حاکم بر جریان در هندسه مورد نظر با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن انجام می‌گیرد. ابتدا یک شبکه غیریکنواخت از نقاطی که در نزدیکی دیواره‌ها دارای تمرکز بیشتری است بر میدان حل منطبق

گردیده و سپس معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود^{۲۰} (با انتگرال‌گیری بر روی شبکه منطبق شده) منفصل می‌شود. برای انفصال جملات جابجایی از طرح پیوندی^{۲۱} (ترکیب طرح‌های تفاضل مرکزی^{۲۲} و بالادست^{۲۳}) استفاده می‌شود. جمله مجهول فشار در معادلات مومنتوم نیز به کمک الگوریتم سیمپلر^{۲۴} طوری محاسبه می‌شود که معادله پیوستگی ارضا شود [۳۲]. برای حل دستگاه معادلات جبری بدست آمده، از روش ضمنی خط به خط و الگوریتم توماس استفاده می‌شود. معیار همگرایی طوری انتخاب می‌شود که مجموع باقیمانده‌های مومنتوم در راستای محور x ، مومنتوم در راستای محور θ و جرم کمتر از مقدار مورد نظر شود. برای جلوگیری از واگرایی از ضرایب زیر تخفیف مناسب استفاده می‌شود.

به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از کد کامپیوتری، برنامه برای حالت‌های مختلفی که نتایج آن در متون قبلی موجود می‌باشد، اجرا شده و نتایج مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

¹⁹Finite volume

²⁰ Hybrid scheme

²¹ Central difference

²² Upwind

²³ SIMPLER algorithm