

نحوه استناد به این مقاله: دهقانی، کاظم؛ حمزهای، مهدی (۱۳۹۵). مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیال آب – آلومینا. تبدیل انرژی، ۱(۴)، ۴۱–۵۴.

مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیال آب – آلومینا

کاظم دهقانی^{ار*}، مهدی حمزهای ^۲

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه تبدیل انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران ۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی ، اهواز، ایران

دریافت: اسفند ۹۴، بازنگری: فروردین ۹۵، پذیرش: اردیبهشت ۹۵

چکیدہ

هدف این مقاله بررسی دقت مدلهای مختلف در شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیالها میباشد. در این پژوهش روشهای تک فازی و دو فازی در رویکرد اولری – اولری، مقایسه میشوند. در این راستا جابجایی طبیعی نانوسیال با سه روش تک فازی، دوفازی مخلوط، دو فازی اولری، مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازیها برای یک حفره مربعی که سطوح بالا و پایین حفره کاملا ایزوله بوده و دیواره سمت چپ بـه عنـوان دیواره گرم و دیواره سمت راست به عنوان دیواره سرد میباشد، انجام شده است. در این شبیه سازی از نانوسیال آب – آلومینا با نسبتههای حجمی دیواره گرم و دیواره سمت راست به عنوان دیواره سرد میباشد، انجام شده است. در این شبیه سازی از نانوسیال آب – آلومینا با نسبتهای حجمی ارائه میدهند و در اعداد رایلی و غلظت نانوذرات بیشتر، تفاوت مدلها قابل توجه میشود. از میان مدل های مختلف، مدل اولری بیانگر انتقال حرارت کمتری نسبت به سایر مدلها بوده و نتایج حاصل از این مدلسازی به نتایج تجربی نزدیکتر است. همچناین در مدلسازی اولری با فرایی سنبت حمری نانوذرات، عدد ناسلت کاهش می یابد که با نتایج تجربی همخوانی دارد.

* عهدهدار مکاتبات: s_kdehghani@yahoo.com

کلمات کلیدی: نانوسیال، جابجایی طبیعی، مدل دو فازی، ترموفورسیس

۱– مقدمه

سیالها نقش بسیار حیاتی در سیستمهای سرمایشی و گرمایشی در صنعت امروز بازی می کنند. سیالهای متداول از جمله آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور، ضریب هدایت محدودی دارند لذا استفاده از آنها به تنهایی در سیستمهای صنعتی امروزی که حرارت تولیدی در واحد سطح تجهیزات بسیار افزایش یافته، انتقال حرارت را با مشکل مواجه می کند. نانوسیالها متشکل از ذرات بسیار ریزی (معمولاً کمتر از ۱۰۰ نانومتر) هستند که در سیال پایه پراکنده شدهاند. اولین مشاهدات از افزایش هدایت حرارتی سیالات حاوی ذرات جامد با اندازه کوچکتر از میکرون، در سال ۱۹۹۳ توسط ماسودا و همکاران گزارش شد [۱]. عنوان نانوسیال نخستین بار توسط چوی^۱ جهت مشخص کردن مخلوطی متشکل از نانو ذرات که

درون سیال پایه پخش شده اند، پیشنهاد گردید [۲]. پایداری نانوسیالات به همراه افت فشار نسبتا اندک در عبور از درون میکرو کانالها، از جمله مشخصات و ویژگی نانوسیالها میباشد. پژوهشهای انجام شده نشان می دهد که به دلیل بالاتر بودن هدایت حرارتی نانوسیالها نسبت به سیالهای متداول (آب، اتيلن گوليكول و روغن)، امكان استفاده از اين سيالها در کاربردهای حرارتی وجود دارد [۳]. انتقال حرارت جابجایی با نانوسیالها را می توان به کمک روشهای تک فازی و دو فازی مدلسازی کرد. در مدل تک فازی فرض بر این است که نانو ذرات و فاز سیال در تعادل حرارتی و هیدرودینامیکی هستند. این مدلسازی نسبت به مدلسازی دوفازی سادهتر و زمان محاسبات در آن کمتر است. بنابراین در بسیاری از تحقیقات تئوری انتقال حرارت جابجایی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدلسازی نانوسیال همانند یک سیال معمولی در نظر گرفته شده و معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در مورد آنها به کار گرفته می شود. تنها اثر نانو ذرات در ضریب هدایت حرارتی و لزجت میباشد که به کمک مدل های تئوری یا اندازه گیری های تجربی در نظر گرفته می شوند [۴]. مدل تک فازی نتایج قابل

¹ Choi

قبولی در حالت جابجایی اجباری ارائه داده است. اما در مورد انتقال حرارت جابجایی طبیعی بین نتایج حاصل از تحقیقات عددی و تجربی ناهمخوانی وجود دارد. خنافر و همکاران [۵] انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال ها را در یک حفره مستطیلی دو بعدی به صورت عددی و با استفاده از روش تک فازی، مورد بررسی قرار دادهاند. آنها نشان دادهاند که با افزایش درصد حجمى نانو ذرات ضريب انتقال حرارت افزايش مىيابد. برخلاف نتایج حاصل از مدلسازیهای تک فازی، پوترا^۲ و همکاران [۶] ، نانا^۳ [۷] و هو^۴ و همکاران [۸] به تجربه یافتهاند که استفاده از نانوسیالها باعث بهبود انتقال حرارت جابجایی طبيعى نمى شود و با افزايش غلظت ذرات عدد ناسلت كاهش می یابد. مدل سازی دوفازی امکان درک نحوه عملکرد هر دو فاز مايع و ذرات جامد در فرايند انتقال حرارت را فراهم ميكند. فرض رایجی که در مطالعات انتقال حرارتی نانوسیالها در نظر گرفته میشد، عدم وجود سرعت لغزشی بین نانوذرات و سیال پایه بود. بونجیورنو [۲] اذعان داشته که فرض رفتار یکسان برای نانوسیالها و سیالهای معمولی چندان صحیح نیست و بین نانوذرات و مولکولهای سیال پایه سرعت لغزشی وجود دارد. او هفت مکانیزم برای سرعت لغزشی در نانوسیالها را معرفی کرده كه عبارتند از: اينرسى، نفوذ برونى⁶ ، ترموفورسيس⁶ ، دیفیوزیوفورسیس^۷، اثر مگنس، تخلیه سیال و گرانش. سپس نتیجه گرفته است که نفوذ برونی و ترموفورسیس مکانیزمهای مهم سرعت لغزشی در نانوسیالها هستند. کورسیونه^ [۹] و همکاران با استفاده از مدلسازی دو فازی مخلوط^۹ به بررسی Al_2O_3 - انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیال آب درون یک حفره مربعی که دیوارههای کناری به عنوان دیواره-های سرد و گرم در نظر گرفته شده است، پرداختند. در تحقیق انجام شده، پدیده ترموفورسیس ۲۰ و نفوذ براونی ۱۱ به عنوان مکانیزمهای اصلی سرعت لغزشی بین نانوذرات و سیال پایه در نظر گرفته شد. آنها از نانوذرات تا نسبت حجمی ۶٪ و با قطر ۲۵ تا ۱۰۰ نانومتر استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت حجمی نانوذرات تا یک مقدار بهینه، انتقال حرارت ابتدا افزایش می یابد و پس از آن با افزایش نسبت حجمي نانوذرات، انتقال حرارت كاهش مي يابد. پاكروان و يعقوبي [۴] انتقال حرارت جابجايي طبيعي نانوسيال آب-AL₂O₃ را در یک حفره مربعی بررسی کردند. آنها در این

1 Khanafer

² Putra

³ Nanna ⁴ Ho

بررسی از نانوذرات با قطر ۱۵۰ نانومتر و مدل دوفازی مخلوط استفاده کردند و نشان دادند که با این مدلسازی نتایج حاصل سازگاری بهتری با نتایج تجربی دارند. در این تحقیق سرعت لغزشی بین نانو ذرات و سیال پایه که در نتیجه پدیده ترموفورسیس و حرکت بروانی ایجاد شده، در نظر گرفته و نتایج حاصل کاهش عدد ناسلت با افزایش نسبت حجمی نانو ذرات را نشان داده است.

همانگونه که مشاهده گردید در مطالعات دوفازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام عمدتاً از روش مخلوط در مدلسازی استفاده شده است. در زمینه جابجایی ترکیبی و اجباری، تحقیقاتی به منظور مقایسه روشهای مختلف تکفازی و دوفازی انجام گرفته است. اکبری و همکاران [۱۰] به بررسی روشهای مختلف تک فازی و دوفازی (مخلوط، اولری و حجم سیال^{۱۲}) در انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیالها در یک تيوپ افقى با شار حرارتى ثابت پرداختند. آنها از نانوذرات آلومینا در آب با نسبتهای حجمی زیر ۲٪ و در دو رایلی ۱۰۵۰ و ۱۶۰۰ استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از مدلسازی دوفازی به نتایج تجربی نزدیکتر بوده و هر سه مدلسازی دو فازی نتایج تقریباً یکسانی را ارائه میدهند. حنفی زاده و همکاران [۱۱] به مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی تک فازی و دو فازی مختلف (مخلوط، اویلری و حجم سیال) در انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آب - Fe_3O_4 در یک تیوپ با قطر ۰/۰۰۹۸ متر و طول ۲/۳۷۵ متر برای رینولدز^{۱۳} ۳۰۰ تا ۵۰۰ و در دو ناحیه در حال توسعه و کاملاً توسعه یافته پرداختند. آنها از نانوذرات با نسبت حجمی ۱٪ و ۲٪ استفاده نمودند. در مدلسازی تک فازی از چهار رابطه مختلف جهت تخمين هدايت حرارتى نانوسيال استفاده نمودند كه نتايج حاصل از رابطه ارائه شده توسط ماکسول نزدیکترین نتایج را به نتایج تجربی نشان میداد. در مورد مدلسازی دو فازی نیز نتایج نشان دادند که ضریب انتقال حرارت پیش گویی شده روند مشابهی با نتایج تجربی دارند. اگرچه نتایج حاصل در ناحیه کاملاً توسعه یافته مطابقت بیشتری با نتایج تجربی داشته اما در ناحیه در حال توسعه هیچ یک از مدلهای دو فازی نمی توانند ضریب انتقال حرارت را به خوبی پیشگویی کنند. به طور کلی در رینولدزهای پایین و متوسط مدلسازی اویلری و در رینولدزهای بالا مدلسازی مخلوط، نتایج نزدیکتری را به نتایج تجربی نشان

بر خلاف جابجایی ترکیبی و اجباری، با توجه به اینکه تاکنون بررسی جامعی انجام نشده است تا معین کند که شبیه سازی جابجایی طبیعی آرام نانوسیالها با چه مدلی مناسبتر است، در این پژوهش جابجایی طبیعی نانوسیالها با مدلهای

⁵ Brownian motion

⁶ Thermophoresis

⁷ Diffusiophoresis ⁸ Corcione

⁹Mixture

¹⁰ Thermophoresis

¹¹ Brownian

¹² Volume of fluid

¹³ Reynolds

مختلف تک فازی و دوفازی مخلوط و اولری انجام گرفته و نتایج به منظور تعیین دقت، هر مدل با نتایج تجربی مقایسه می گردد.

۲- مدلسازی

جریان های دوفازی را به دو روش کلی اولری – لاگرانژی و اولری – اولری^۲ میتوان مطالعه نمود. در مدلسازی اولری – لاگرانژی حرکت هر ذره در سیال مورد توجه قرار میگیرد و معادله حرکت برای هر ذره به صورت جداگانه نوشته می-شود [۴]. در مورد نانوسیالها، با توجه به اینکه تعداد ذرات بسیار زیاد میباشد، استفاده از مدل اولری - لاگرانژی بسیار پرهزینه و با امکانات محاسباتی فعلی تقریبا غیر ممکن است. در دیدگاه اولری - اولری، هر دو فاز به عنوان محیط پیوسته در هم نفوذ کننده در نظر گرفته میشوند. چون حجم یک فاز نمیتواند توسط فاز دیگر اشغال شود، مفهوم کسر حجمی فازی وارد معادلات می شود. کسر حجمی فازها به صورت توابعی پیوسته از فضا و مکان تعریف می شوند و مجموع آنها در هر مکان و زمان مشخص برابر ۱ است. معادلات بقا به منظور به دست آوردن مجموع معادلات حاكم كه داراى ساختار يكسان براى تمامى فازها هستند، به کار برده می شوند [۱۲]. سه مدل کلی چندفازی اولری – اولری توسعه داده شده اند: مدل حجم سيال"، مدل مخلوط و مدل اولرى أ. با توجه به اينكه كاربرد مدل حجم سیال بیشتر برای جریانهای سطح آزاد و جریانهای لایهای میباشد[۱۲]، لذا در این مقاله از دو روش دیگر جهت بررسی جابجایی طبیعی نانوسیال استفاده شده است.

۲-۱- مدل تک فازی

مقاله این حالت فرض بر این است که ذرات به طور یکنواخت در کل سیال مخلوط شدهاند[۱۳]. بنابراین معادلات حاکم با فرض رفتار نیوتنی برای آنها عبارتند از [۱۴]:

$$\begin{split} & \frac{D\rho_{nf}}{Dt} + \rho_{nf} \nabla \cdot \vec{\nu} = 0 \qquad (1) \\ & \rho_{nf} \frac{D\vec{\nu}}{Dt} = -\nabla P + \mu_{nf} \nabla^2 \vec{\nu} + \vec{F} \qquad (1) \end{split}$$

$$(\rho C_P)_{nf} \frac{DT}{Dt} = k_{nf} \nabla^2 T + \mu_{nf} \phi \tag{(7)}$$

۲-۲- مدل مخلوط

این مدل یک مدل چندفازی ساده شده است که می تواند برای مدل کردن جریانهای چندفازی که فازها با سرعتهای مختلف حرکت میکنند، مورد استفاده قرار می گیرد. در این مدل فرض میشود که فازها دارای تعادل موضعی در مقیاس-های طولی فضایی کوتاه هستند. این مدل توانایی مدل کردن

تعداد نامحدودی فاز (سیال یا دانهای) را با حل معادلات مومنتوم، پیوستگی و انرژی برای مخلوط، کسر حجمی برای فازهای ثانویه و روابط جبری برای سرعتهای نسبی (اگر فازها با سرعتهای نسبی مختلف حرکت کنند)، دارد[۱۲].

۲-۲-۱- معادله پیوستگی

این معادله پیوستگی برای مخلوط عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{nf} \right) + \nabla \cdot \left(\rho_{nf} \vec{v}_{nf} \right) = 0 \tag{(f)}$$

در رابطه فوق $ec{
u}_m$ سرعت جرمی متوسط، ho_m دانسیته مخلوط و کسر حجمی فاز (k) می باشد. α_k

$$\vec{v}_{nf} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_{nf}} \tag{(b)}$$
$$\rho_{nf} = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \rho_k \tag{(c)}$$

 $\rho_{nf} = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \rho_k$

۲-۲-۲ معادله بقای مومنتوم

معادله مومنتوم مخلوط از مجموع معادلات مومنتوم منفرد همهی فازها به دست میآید و به صورت زیر میتواند بیان شود :[17]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{nf} \vec{v}_{nf}) + \nabla \cdot (\rho_{nf} \vec{v}_{nf} \vec{v}_{nf}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{nf} (\nabla \vec{v}_{nf} \nabla \vec{v}_{nf}^T)] + \rho_{nf} \vec{g} + (\nabla \cdot \vec{r}_{k-1} \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k})$$

که در آن n تعداد فازها، $ec{F}$ نیروی حجمی و μ_{nf} لزجت مخلوط (k) نانوسیال است. همچنین $ec{
u}_{dr,k}$ سرعت رانش a فاز ثانویه نسبت به مخلوط نانوسیال (nf) است [۱۲]. $\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_{nf}$ (λ)

۲-۲-۳ معادله بقای انرژی

معادله انرژی مخلوط شکل زیر را به خود می گیرد [۱۲]: $\frac{\partial}{\partial t}\sum_{n=1}^{n}(\alpha_{k}\rho_{k}E_{k}) +$

Σ

$$\sum_{k=1}^{n} \left(\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p) \right) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T \right)$$
(9)

در این رابطه k_{eff} ضریب هدایت مؤثر است. همچنین در رابطه انتالپی h' به صورت زیر تعریف می شود که در آن h' انتالپی E_k مشهود ً فاز k است [۱۲]:

$$E_k = h'_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \tag{(1)}$$

۲-۲-۴ سرعت نسبی (لغزش) و سرعت رانش

سرعت نسبی (سرعت لغزش) به عنوان سرعت فاز ثانویه (مرعت نسبی (سرعت فاز اولیه (
$$q$$
) نسبت به سرعت فاز اولیه (q) تعریف میشود:
 $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q$ (۱۱)

¹ Euler - Lagrange approach

² Euler - Euler approach 3 Volume of Fluid

⁴ Eulerian Model

⁵ Drift Velocity

⁶ Sensible enthalpy

بونجیورنو [۲] پدیده ترموفورسیس و نفوذ براونی را به عنوان مکانیزمهای اصلی سرعت لغزشی بیان کرد. سرعت

ترموفورسیس
$$v_T$$
 به کمک رابطه زیر بیان می شود [۲]:
 $\vec{v}_T = -\beta' \frac{\mu_{bf}}{\rho_{bf}} \times \frac{\overline{v_T}}{T}$ (۱۲)
در رابطه فوق '*β* به صورت زیر بیان می گردد [۲]:

$$eta' = 0.26 imes rac{2k_{bf} + k_p}{2k_{bf} + k_p}$$
 (۱۳)
در رابطه (۱۳)، k_{bf} و k_p به ترتیب، ضریب هدایت حرارتی

سیال پایه و نانو ذرات میباشد. همچنین شار جرمی نانوذرات در اثر وجود پدیده ترموفورسیس با $ec{J}_{p,T}$ بیان میشود [۴]:

$$\vec{J}_{p,T} = \rho_p \alpha \vec{v}_T = -\rho_p \alpha \beta' \frac{\mu_{bf}}{\rho_{bf}} \times \frac{\nabla T}{T}$$
(14)

او همچنین شار جرمی نانوذرات در نتیجه پدیده نفوذ بروانی را به صورت زیر بیان کرد [۲]: 1. 77

$$\vec{J}_{p,B} = \frac{-\rho_p k_B T}{3\pi\mu_{bf} d_p} \nabla \alpha \tag{10}$$

در این رابطه k_B ثابت بولتزمن است. بونجورنو [۲] شار انحرافی نانوذرات را مجموع اثرات این دو دانست و به صورت زیر بیان کرد:

$$\vec{J}_p = \frac{-\rho_p k_B T}{3\pi\mu_{bf} d_p} \nabla \alpha - \alpha \beta' \frac{\rho_p}{\rho_{bf}} \frac{\mu_{bf}}{T} \nabla T$$
(19)

سرعت رانش و سرعت نسبی با رابطه زیر به هم مربوط میشوند :[17]:

$$\vec{\mathbf{v}}_{dr,p} = \vec{\mathbf{v}}_{pq} - \sum_{k=1}^{n} C_k \vec{\mathbf{v}}_{qk} \tag{1V}$$

کسر جرمی هر فاز (
$$k$$
) به صورت زیر تعریف می شود:
 $C_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_{nf}}$
(۱۸)

رابطه سرعت نسبی به شکل زیر تعریف میشود[۱۲]:
$$ec{
u}_{na} = rac{ au_p}{ au} rac{(
ho_p -
ho_{nf})}{ au} ec{a}$$
 (۱۹)

در رابطه (۱۹)،
$$au_p$$
 زمان آسایش ذره^۲ و \hat{a} شتاب ذرات فاز \hat{a} نانویه است و به صورت زیر تعریف می شوند [۱۲]:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_p} \tag{(Y \cdot)}$$

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_{nf} \cdot \nabla) \vec{v}_{nf} - \frac{\partial v_{nf}}{\partial t}$$
(Y1)

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{drag} &= \begin{cases} 1 + 0.15 \mathrm{Re}^{0.687} & \mathrm{Re} \leq 1000 \\ 0.0183 \mathrm{Re} & \mathrm{Re} > 1000 \end{cases} \tag{YY} \\ \mathrm{Re} &= \frac{\rho_q |\vec{\mathbf{v}}_p - \vec{\mathbf{v}}_q | d_p}{\mu_q} \end{aligned} \tag{YY}$$

۲-۲-۵- کسر حجمی برای فاز ثانویه

با استفاده از معادله پیوستگی، معادله کسر حجمی برای فاز ثانویه به صورت زیر به دست می آید [۱۲]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{nf}) = -\nabla \cdot \\ \left(\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p} \right)$$
(Yf)

۲-۳- مدل اویلری

مدل چندفازی اویلری اجازه مدلسازی فازهای چندگانه مجزا با برهمکنش فازها را میدهد. فازها میتوانند مایع، گاز یا جامد و یا ترکیبی از اینها باشند.

۲-۳-۱ معادله پیوستگی

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_q \rho_q \right) + \nabla \cdot \left(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \right) = 0 \tag{7}$$

۲-۳-۲ معادله بقای مومنتوم

موازنه مومنتوم برای فاز (q) منجر به معادله زیر می-شود[۱۲]:

а

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n k'_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + (\vec{F'}_q + \vec{F}_{l,q} + \vec{F}_{\nu m.q})$$
(YP)

در رابطه (۲۶)، $\overline{F'}_q$ تانسور تنش – کرنش هر فاز، $\overline{\overline{t}}_q$ نیروی حجمی خارجی، \vec{F}_{uma} یک نیروی جرم مجازی، \vec{F}_{uma} نیروی برا^۴، برا k'_{pq} ضریب تبادل سیال – سیال و p فشار مشترک بین تمامی فازها میباشد [۱۲].

$$\bar{\bar{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \bar{\nu}_q + \nabla \bar{\nu}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3}\mu_q\right) \nabla \cdot \bar{\nu}_q \bar{\bar{I}}$$

$$(\Upsilon Y)$$

-در رابطه (۲۷)، μ_q لزجت برشی و λ_q لزجت توده فاز (q) می باشد. برای جریانهای چند فازی، اثر نیروی جرم مجازی⁶ وقتی به وجود مى آيد كه فاز ثانويه (p) نسبت به فاز اوليه (q) شتاب داشته باشد[۱۲].

$$\vec{F}_{\nu m} = 0.5 \alpha_p \rho_q \left(\frac{d_q \vec{v}_q}{dt} - \frac{d_p \vec{v}_p}{dt} \right) \tag{YA}$$

در این رابطه ترم $\frac{d_q}{dt}$ بیانگر مشتق زمانی فاز و به شکل زیر بیان می گردد [۱۲]:

$$\frac{d_q(\emptyset)}{dt} = \frac{\partial(\emptyset)}{\partial t} + \left(\vec{\nu}_q \cdot \nabla\right) \phi \tag{(19)}$$

$$\vec{F}_{l} = -0.5\rho_{q}\alpha_{q} (\vec{v}_{q} - \vec{v}_{q}) \times (\nabla \times \vec{v}_{q})$$
(\vec{r})
$$\alpha_{q}\alpha_{n}\rho_{P}f$$

$$K'_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_{P^1}}{\tau_P} \tag{(1)}$$

در رابطه (۳۱)، au_P زمان آسایش ذره است. همچنین تابع (f) تابع درگ بوده که معمولاً از رابطه نومن – شیلر، استفاده می گردد [۱۲].

¹ Boltzman constant ² Particle Relaxation Time

³ Naumann - Schiller

⁴ Lift Force 5 Virtual Mass

$$\begin{split} \mathbf{f}_{drag} &= \frac{C_D R e}{24} & (\texttt{TT}) \\ C_{drag} &= & \\ \begin{cases} \frac{24(1+0.15 R e^{0.687})}{R e} & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \\ \end{split}$$

همچنین Re از رابطه (۲۳) محاسبه می گردد.

۲-۳-۳- معادله بقای انرژی

جهت تشریح بقای انرژی از معادله زیر استفاده می-گردد[۱۲]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q H_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{\nu}_q H_q) &= \\ -\alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\bar{\tau}}_q : \nabla \bar{\nu}_q - \nabla \cdot \vec{q}^{\prime\prime}_q \\ + \sum_{p=1}^n Q_{pq} \end{aligned} \tag{(7f)}$$

در رابطه (۳۴)، H انتالپی ویژه فاز (q) و q_{pq} شدت تبادل حرارتی میان فازهای (p) و (p) میباشد. همچنین \vec{q}''_{q} شار حرارتی است.

$$Q_{pq} = h_{pq} \left(T_p - T_q \right) \tag{7}$$

در رابطه فوق h_{pq} ضریب انتقال حرارت میان فاز $\, p \,$ و فاز $\, p \,$ ام است

۲-۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای معادلات اشاره شده در بالا به صورت زیر بیان می گردند: سرعت: هم در جهت عمود بر دیوارهها و هم در جهت موازی با آنها سرعت صفر است. $v_n = v_t = 0$ (۳۶) در رابطه (۳۶) زیر نویسهای t و n به ترتیب مؤلفههای مماس و عمود بر دیواره را مشخص می کنند. دما: بر روی دیوارههای سرد و گرم دما عبارت است از: $T = T_w$ $(\mathcal{T}\mathcal{V})$ همچنین شرایط مرزی آدیاباتیک ابرای دیوارههای آدیاباتیک: $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ (٣٨) نسبت حجمی: شار نسبت حجمی صفر در تمامی دیوارهها. با استفاده از رابطه (۱۶) برای این شرط مرزی خواهیم داشت:

$$\begin{cases} at x = 0.L. \quad 0 \le y \le H: \\ \frac{\partial \alpha}{\partial x} = -\frac{3\pi\beta'\alpha d_p}{k_B\rho_{bf}} \left(\frac{\mu_{bf}}{T}\right)^2 \frac{\partial T}{\partial x} \\ at y = 0.H. \quad 0 \le x \le L: \\ \frac{\partial \alpha}{\partial y} = -\frac{3\pi\beta'\alpha d_p}{k_B\rho_{bf}} \left(\frac{\mu_{bf}}{T}\right)^2 \frac{\partial T}{\partial y} \end{cases}$$
((*9)

۲-۵- خصوصیات ترموفیزیکی

باتوجه به اینکه نانوسیال به عنوال سیال کاری در نظر
گرفته شده است، برخی از خواص معادل نانوسیال مورد نیاز
میباشد. این خصوصیات شامل چگالی، لزجت، ضریب هدایت
حرارتی و همچنین گرمای ویژه نانوسیال میباشد.
حرارتی و همچنین گرمای ویژه نانوسیال میبان می گردد:

$$(+7)$$
 می گردد:
 $(+7)$ $(+1-\alpha)\rho_{bf}$ $(+1)$ بیان می شود:
 $(+7)$ می ویژه نانوسیال با استفاده از رابطه (+1) بیان می شود:
 (-2) $($

سیال پایه است و همچنین به دلیل پایین بودن درصد حجمی نانوذرات، استفاده از هر دو رابطه نتایج تقریباً یکسانی را می-دهند. در این پژوهش از رابطه (۴۳) استفاده شده است.

جهت محاسبه لزجت و همچنین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از روابط ارائه شده توسط هو و همکاران [۸] استفاده شده است که به صورت زیر بیان می گردد:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 4.93\alpha + 222.4\alpha^2) \tag{(ff)}$$

 $k_{nf} = k_{bf} (1 + 2.944 + 19.672 a^2)$ (۴۵) جدول شماره ۱ خصوصیات ترموفیکی نانوذرات جهت محاسبه روابط ارائه شده را بیان میکنند.

روبت را سعد را بین ای عصر با استفاده از خصوصیات ترموفیزیکی تعریف شده برای نانوسیالها، اعداد بدون بعدی از جمله عدد رایلی و عدد ناسلت برای آنها به صورت زیر محاسبه گردید.

$$\operatorname{Ra}_{nf} = \frac{g\beta_{nf}\Delta TL^{3}}{\alpha_{nf}\gamma_{nf}} \tag{(ff)}$$

$$Nu_{y} = \frac{\frac{h_{yx}}{k_{nf}}}{k_{nf}} Nu_{ave} = \frac{h_{ave}L}{k_{nf}}$$
(FV)

$$h_{y} = \frac{-\kappa_{nf} \frac{1}{\partial x}|_{x=0}}{\Delta T}, \quad h_{ave} = \frac{1}{L} \int_{0}^{L} h_{y} \, dy \tag{(fA)}$$
c, h_{xv} (f) is used of h_{xv} is the set of h_{xv} is the set of h_{xv} is the set of h_{xv} is the set of h_{xv} is the set of h_{xv} is the set of h_{xv} is the set of h_{xv} is

۲-۶- مدل فیزیکی

با توجه به اینکه انتقال حرارت در جابجایی طبیعی آرام نانوسیال مدنظر است، مدل فیزیکی انتخاب شده، کوچکترین حفرهای است که هو و همکاران [۸] در تحقیق تجربی خود استفاده کردهاند. زیرا اعداد رایلی مربوط به این حفره در محدوده جریان آرام میباشند [1۵]. یک حفره مربعی با ابعاد

² Rayleigh Number ³ Ho

¹ Adiabatic

۲۵ میلیمتر که در شکل ۱ نشان داده شده است. دیواره سمت چپ و سمت راست به ترتیب به عنوان دیوارههای گرم و سرد با دمای ثابت درنظر گرفته شدهاند و دیوارههای افقی بالا و پایین آدیاباتیک هستند. حفره با نانوسیال آب – Al₂O₃ پر شده است. برای اینکه مشخص شود آیا یک مطالعه عددی نانوسیال، قابلیت مقایسه با نتایج تجربی را دارد، ابتدا نتایج برای سیال پایه با هم مقایسه میشود. بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی عددی و نتایج تجربی برای سیال پایه نشان از این دارد که برای سیال پایه نتایج حاصل از مدلسازی عددی در محدوده قابل تجربی جهت مقایسه با نتایج حاصل از مدلسازیهای عددی قبولی از نتایج تجربی قرار دارند. لذا در این پژوهش از این کار سیال سیال پایه نتایج معلی ان این محدوده قابل معدوی و همکاران [۸]، میانگین قطر نانو ذرات مورد استفاده با افزایش درصد حجمی افزایش مییابد که در جدول شماره ۲ آورده شده است.

۲-۷- فرایند حل

شبیه سازیها به کمک نرمافزار فلوئنت انجام شده است. این نرمافزار به صورت احجام محدود^۱ گسسته سازی را انجام می دهد. ضرایب زیر تخفیف برای معادله انرژی ۲۰۹، معادله فشار ۲/۵ استفاده شده است. مطالعه استقلال از شبکه برای نانوسیال برای بزرگترین نسبت حجمی (۲۰٪) و بزرگترین عدد رایلی (۲۳۲۱۰۰۰) در مدلسازی اولری انجام شد. شبکههایی متشکل از ۲۶۳×۲۶۳ و ۳۷۳×۳۷۳ مطالعه شدند و همانگونه که در جدول شماره ۳ مشاهده می گردد، شبکه ۲۶۳×۲۶۳ برای حل این مسئله جوابگو است و با زیاد کردن تعداد شبکه، تغییری در جواب حاصل نمی گردد. البته واضح است که در حالات سادهتر (نسبت حجمی و رایلی کمتر) شبکه مورد نیاز کمتر از این مقدار می باشد اما برای همه حالات (همچنین مدل تک فازی)، از همین شبکه ۲۶۳×۲۶۳ استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

محاسبات برای نانوسیال در نسبتهای حجمی ۰/۰٪، ۳/۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ و در رایلیهای مختلف انجام گرفت. برای هر کسرحجمی و در تمامی رایلیها، محاسبات علاوه بر روش تک فازی، برای روشهای دو فازی شامل روشهای مخلوط و اویلری انجام گرفت.

شکل ۲ مقایسه انجام شده مدلسازی تک فازی و مدلسازیهای مختلف دوفازی را برای نسبتهای حجمی ۱٪، ۳٫۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ و در رایلیهای مختلف نشان میدهد.

جدول ۱: خصوصیات ترموفیزیکی نانوذرات آلومینا [۴]	
مقدار	خصوصيت
397.	چگالی (<u>kg</u>)
٢۶۵	گرمای ویژه (<u>J</u>)
×	ضرب انساط ح ارت (K ⁻¹)
->	صريب البساط محرارتي (١١)

ا. ۲: قطر نانوذرات مورد استفاده برجسب درصد ججم الا	e.12
ن ١٠ ص <u>ر</u> مورد مرد مرد منه ما در مسبق مر منه مرد من	· · · ·

۸/۴۶۱۰^{-۶}

قطر (nm)	درصد حجمی(٪)	
١٢٩	• / \	
۱۳۰/۹۵	۰ /٣	
177/77	١	
۱۴۷/۵۱	۲	
107/78	٣	
187	۴	

جدول۳: تغییرات عدد رایلی برای شبکههای مختلف برای نانوسیال با
نسبت حجمی ۴٪ در مدلسازی اولری و عدد رایلی ۲۳۲۱۰۰۰

عدد ناسلت	اندازه شبكه
11/44	797×797
11/4.	$rvr_{ imes}rvr$

همانگونه که مشاهده میگردد در نسبتهای حجمی پایین نتایج حاصل بر هم منطبق هستند و با افزایش نسبت حجمی اختلاف نتایج حاصل از مدلسازیهای مختلف، نمایان میگردد. در تمامی نسبتهای حجمی نتایج حاصل از مدلسازیهای مخلوط و تک فازی تقریباً بر هم منطبق هستند.



شکل ۱: نمای شماتیکی از هندسه مسئله

¹ Finite Volume



شکل ۲: نمودار ناسلت بر حسب عدد رایلی برای روشهای مختلف مدلسازی و نسبتهای حجمی (الف)۱/۰٪، (ب) ۲/۰٪، (ج)۱٪، (د)۲٪، (ه)۳٪، (ی)۴٪،

اما برخلاف مدلسازی مخلوط، در مدلسازی اولری با افزایش نسبت حجمی، نتایج حاصل، از نتایج مدلسازیتک فازی فاصله گرفته و به نتایج تجربی نزدیکتر میشود. برای نسبت حجمی ۴٪ که نتایج حاصل از مدلسازیهای مختلف بیشترین اختلاف را باهم دارند، درصد اختلاف نتایج در جدول شماره ۴ آورده شده است. لذا مدل اویلری، مدل مناسبتری در مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیال میباشد. علت این مهم در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۳-۱- بررسی مدلسازی تک فازی و دوفازی مخلوط

همانگونه که گفته شد، در تمامی نسبتهای حجمی نتایج حاصل از مدلسازیهای مخلوط و تک فازی تقریباً بر هم منطبق هستند. به منظور بررسی علت کانتورهای دما و خطوط جریان در مدلسازی تک فازی و دو فازی مخلوط برای نانوسیال با نسبت حجمی ۴٪ و در رایلی ۲۹۰۰۰۰ رسم گردید. همانگونه که در دو شکل ۳ و ۴ مشاهده می گردد کانتورهای دما و خطوط جریان در مدلسازی تک فازی و دوفازی مخلوط تفاوت چندانیبا هم ندارند. در مورد نسبت حجمی نیز، در مدل تک فازی اساساً فرض بر همگن بودن نانوسیال و بنابراین به این دلیل که نسبت کانتور نسبت حجمی نیست. در مدلسازی دوفازی مخلوط نیز ممانند روش تک فازی نسبت حجمی مخلوط در همه جا یکسان و برابر با نسبت حجمی نانوسیال بدست آمده است. در واقع به دلیل همین تشابهات است که نتایچ حاصل از مدلسازی تکفازی و دوفازی مخلوط مشابه یکدیگر بدست آمدهاند.

۳–۲– مدلسازی اولری و تأثیر مکانیزمهای سرعت لغزشی

برخلاف مدلسازی مخلوط، در مدلسازی اولری با افزایش نسبت حجمی، نتایج حاصل، از نتایج مدلسازی تک فازی فاصله گرفته و به نتایج تجربی نزدیکتر میشود. در مدلسازی اولری توزیع نسبت حجمی رسم شده نشان میدهد که برخلاف مدلسازی مخلوط و تک فازی، نسبت حجمی نانودرات در همه جا یکسان نیست. شکل ۵ توزیع نسبت حجمی برای مدلسازی اویلری با نسبت حجمی ۴ درصد و در رایلی ۲۹۰۰۰۰ را نشان میدهد. همان گونه که مشاهده میگردد، بیشترین مقدار و میدهد. همان گونه که مشاهده میگردد، بیشترین مقدار و این عدم یکنواختی در توزیع ذرات را میتوان به کمک جریان این عدم یکنواختی در توزیع ذرات را میتوان به کمک جریان حجمی سیال و سرعت لغزشی توضیح داد. بونجورنو [۲] هفت مکانیزم را به عنوان مکانیزمهای سرعت لغزشی بیان کرد و از میان آنها دو مکانیزم ترموفورسیس(نفوذ ذرات به واسطه وجود مرادیان دما) و حرکت براونی را به عنوان مکانیزمهای غالب و



شکل ۳: کانتور خطوط جریان برای نانوسیال با نسبت حجمی ۴٪ و رایلی ۲۹۰۰۰۰۰ در مدلسازی (الف) تکفازی و (ب) دوفازی مخلوط

جدول ۴: درصد اختلاف عدد ناسلت بدست آمده در مدلسازیهای مختلف با

	فجمی ۰۴٪	ىربى در نسبت <	نتايج نج	
 دوفازى	دوفازى	تک	ناسلت	
اولری (٪)	مخلوط (٪)	فازی (٪)	تجربى	عدد رایلی
47/4	۴۷/۸	49	۴/۹۱	۶×۱۰ ^۵
۳۷/۱	۴۳	44/1	۶/۱۸	۶ ١/١٨ × ١٠
۲۵/۴	۲٩/۶	٣•/۵	۷/۷۴	۱/۷۸ × ۱۰ ^۶
۲۸/۳	31/91	۳۲/۸۳	٨/٢	۲/۳۶×۱۰
٣•/•	٣٢	34/22	λ/λ	۲/٩ × ۱۰ ^۶



حجمی و رایلی ۲۹۰۰۰۰

به سمت دیواره با دمای کمتر دارد. نزدیکتر بودن خطوط دما ثابت و در نتیجه بیشتر بودن تغییرات دما در جهت افقی و در فضای نزدیک به دیواره افقی پایینی نسبت به دیواره افقی بالایی باعث شده مقدار شار ذرات در نتیجه پدیده ترموفورسیس در نزدیکی دیواره پایینی بیشتر شود. همچنین همانگونه که در شکل شماره ۶ - ب مشاهده می گردد در لایهای عمودی نزدیک به دیواره سمت راست، یعنی دیواره سرد نیز مشابه این پدیده اتفاق میافتد. مقادیر مثبت شار ذرات نشان از حرکت ذرات در جهت مثبت محور افقی، یعنی از سمت لایههای با دمای بیشتر به سمت لایههای با دمای کمتر دارند. در این شکل بر خلاف شکل ۶ – الف، نزدیکتر بودن خطوط دما ثابت و در نتیجه بیشتر بودن تغییرات دما در جهت افقی و در لایههای نزدیک به هم در فضای نزدیک به دیواره افقی بالایی نسبت به دیواره افقی پایینی باعث شده مقدار شار ذرات در نتیجه پدیده ترموفورسیس در نزدیکی دیواره بالایی بیشتر شود. علاوه بر این همانگونه که در هر دو شکل مشاهده می گردد، با افزایش نسبت حجمی نانوذرات شار ذرات در نتیجه پدیده ترموفورسیس نیز افزایش مییابد.

این درحالی است که شار محاسبه شده ذرات در نتیجه نفوذ براونی در مقایسه با شار ذرات درنتیجه ترموفورسیس تقریباً ناچیز است. به همین دلیل همواره در نزدیکی دیواره سرد لایه ناز کی از نانوسیال با نسبت حجمی پایین قرار می گیرد که در کانتور رسم شده به دلیل کوچک بودن قابل مشاهده نمی باشند. چرخش کلی نانوسیال در حفره در جهت عقربههای ساعت می باشد. یعنی در نزدیکی دیواره گرم نانوسیال به سمت بالا و در نزدیکی دیواره سرد، نانوسیال به سمت پایین حرکت می کند. این حرکت کلی نانوسیال باعث می شود که لایهای با نسبت حجمی پایین که در نزدیکی دیواره گرم تشکیل شده بود





اساسی معرفی کرد. بنابراین ذرات جامد در سیال سه مکانیزم برای انتقال دارند: ۱- جابجایی به وسیله حجم کلی ۲- نفوذ به دلیل حرکت بروانی و ۳- نفوذ به دلیل گرادیان دما (ترموفورسیس) [۱۶]. نانو ذرات به دلیل ترموفورسیس مثبت از سمت دیواره گرم (دیواره سمت چپ) به سمت دیواره سرد (دیواره سمت راست) حرکت میکنند [۱۷]. این مهم را به کمک رسم بردار شار ذرات میتوان نشان داد. شکل ۶ – الف، بردار شار ذرات در نتیجه پدیده ترموفورسیس در جهت افقی و نسبتهای مختلف حجمی را نشان میدهد. همان گونه که مشاهده می گردد مقادیر مثبت نشان از حرکت ذرات در جهت مثبت محور افقی، یعنی حرکت از سمت دیواره با دمای بیشتر

مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام ...





به سمت بالا حرکت کند و در بالای حفره لایه ناز کی از نانوسیال با نسبت حجمی کم قرار گیرد. همین اتفاق در نزدیکی دیواره سرد نیز میافتد. حرکت رو به پایین نانوسیال در نزدیکی دیواره سرد، لایه انباشته شده نانو ذرات را به سمت پایین حرکت می-دهد و در پایین حفره لایهای از نانوسیال با نسبت حجمی بالا ایجاد میشود. قسمت اعظم حفره که در بین این دو لایه قرار دارد، همان نسبت حجمی نانوسیال (به عنوان مثال ۴٪) را دارد. به این دلیل که نانوذرات سنگین تر از سیال پایه هستند، بنابراین در دمای یکسان بالا بودن نسبت حجمی نانو ذرات به معنی چگالی بالاتر نانوسیال و بلعکس نسبت حجمی پایین تر به معنی حجمی کم در بالای حفره، و لایه با نسبت حجمی زیاد در پایین حفره، پس چگالی نانوسیال در بالای حفره کمتر از چگالی

نانوسیال در پایین حفره است. بنابراین لایه بالایی توانایی حرکت به سمت پایین را نداشته و میتوان گفت به همان صورت از کل مخلوط نانوسیال جدا می گردد. در لایه پایینی حفره هم که نسبت حجمی بالا داشته به دلیل چگالی بیشتر نسبت به مرکز حفره، لایه پایینی توانایی بالا رفتن را ندارد و به همان صورت از کل مخلوط جدا گشته و در پایین باقی میماند. تشکیل و جدا شدن این دو لایه در بالا و پایین حفره باعث می شود که فضایی را به خود اختصاص دهند و به همین دلیل فضای مفیدی که نانو سیال میانی برای چرخش در اختیار دارد کمتر میشود و منجر به کوچکتر شدن فضای انتقال حرارت می شوند. لذا همانگونه که در دو شکل ۶-الف و ۶-ب مشاهده می گردد، به نظر میرسد در صورتی که با افزایش نسبت حجمی نانوذرات نقش پدیده ترموفورسیس پر رنگ تر شود، لایه های جدا شده در بالا و پایین حفره بزرگتر شده و حجم کلی نانوسیال در حال چرخش کوچکتر و میزان انتقال حرارت صورت گرفته کاهش می یابد و نتایج در مدلسازی اولری در مقایسه با مدلسازی تک فازی و مخلوط، به نتایج تجربی نزدیکتر می شوند.

۳-۳- توزیع چگالی در مدلسازی اولری

شکل ۷ کانتور چگالی نانوسیال با نسبت حجمی ۴٪ ودر رایلی ۲۹۰۰۰۰ را نشان میدهد. همانگونه که مشاهده می-گردد شکل کلی خطوط چگالی ثابت مشابه خطوط نسبت حجمی ثابت است. یعنی چگالی نانوسیال به مقدار بسیار زیادی از نسبت حجمی تأثیر میپذیرد. در لایه پایینی که نسبت حجمی نانوذرات بیشتر است چگالی بیشتر و در لایه پایینی به دلیل کمتر بودن نسبت حجمی نانوذرات، چگالی کمتر است که تایید کننده مطالب گفته شده در قسمت قبل میباشد.



شکل ۷: توزیع چگالی نانوسیال به دست آمده از مدلسازی اویلری برای ۴٪ حجمی و رایلی ۲۹۰۰۰۰۰

۳-۴- تأثیر نسبت حجمی نانوذرات در مدلسازی اویلری

همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شد، در مقایسه با مدلسازی تک فازی و مخلوط، مدلسازی اویلری نتایج نزدیک-تری به نتایج تجربی ارائه میکند و همانگونه که در قسمتهای ۲-۳ و ۳-۳ بیان گردید، علت این مهم توانایی مدلسازی اویلری در لحاظ کردن مکانیزمهای مختلف سرعت لغزشی میباشد. لذا مدلسازی اویلری، مدل مناسب تری در مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال میباشد. علاوه براین همانگونه که در مقدمه بیان شد، در مورد انتقال حرارت جابجایی طبیعی بین نتایج حاصل از تحقیقات عددی تک فازی که در گذشته انجام شدهاند، ازجمه پژوهشهای انجام شده توسط خنافر و همکاران [۵] و تحقیقات تجربی ناهمخوانی وجود دارد. به گونهای که برخلاف نتایج حاصل از مدلسازیهای تک فازی، نتایج حاصل از تحقيقات تجربي نشان ميدهند كه استفاده از نانوسيالها باعث بهبود انتقال حرارت جابجایی طبیعی نمیشود و با افزایش غلظت ذرات عدد ناسلت کاهش می یابد. در مرحله بعد و به منظور بررسی این مهم در مدلسازی اولری و همچنین بررسی دقیق تر رفتار نانوسیال در این مدلسازی ، نمودار عدد ناسلت برحسب عدد رایلی برای درصدهای مختلف حجمی در مدلسازی اویلری رسم شد. همانگونه که در شکل ۸ مشاهده میگردد، در مدلسازی اولری با افزایش نسبت حجمی نانوذرات، عدد ناسلت کاهش می یابد که این مهم با نتایج تجربی هم خوانی دارد. به منظور بررسی علت، لزجت مخلوط نانوسیال در مدلسازی اولری به همراه تأثير آن بر جريان نانوسيال مورد بررسی قرار گرفت. لزجت نانوسیال ها نقش بسیار پر رنگی در میزان انتقال حرارت انجام شده توسط نانوسیالها دارد.همانگونه که در جدول شماره ۵ مشاهده می گردد، مقایسه لزجت نانوسیال در یک رایلی مشخص و برای درصدهای مختلف حجمی نشان میدهد که



دوفازى اويلرى

برای مدلسازی اولری، با افزایش نسبت حجمی نانوذرات، لزجت مخلوط نانوسیال افزایش مییابد. افزایش لزجت نانوسیال با افزایش نسب حجمی، همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می-گردد، باعث کاهش سرعت مخلوط نانوسیال به خصوص در میزان انتقال حرارت می گردد. جدارههای سمت راست و چپ به میزان انتقال حرارت می گردد. جدارههای سمت راست و چپ به منظور تأیید مطالب گفته شده، کانتور دما را برای درصدهای منظور تأیید مطالب گفته شده، کانتور دما را برای درصدهای خط کامل برای ۴٪ در شکل ۱۰ رسم گردید. در این شکل خط چین نقطهای برای ۲٪ حجمی می باشد و همانگونه که مشاهده می گردد، با کاهش درصد حجمی نانوذرات و افزایش سرعت در دیوارههای گرم و سرد، خطوط دما ثابت به هم نزدیکتر شده و تراکم آنها در نزدیکی دیوارهها بیشتر می شود که

جدول۵: لزجت مخلوط نانوسیال برای درصدهای مختلف حجمی در
مدلسازی اویلری و در عدد رایلی ۲۹۰۰۰۰

(kg/(m - s))لزجت	نوع مدلسازی	درصد حجمی(٪)
$\lambda/\Delta 9 \times 1 \cdot {}^{-F} - \lambda/F \times 1 \cdot {}^{-F}$	اويلرى	•/1
$\lambda/\beta\lambda \times 1 \cdot {}^{-\epsilon} - \lambda/\gamma1 \times 1 \cdot {}^{-\epsilon}$	اويلرى	٠/٣
$9/\cdot Y \times 1 \cdot {}^{-F} - 9/YF \times 1 \cdot {}^{-F}$	اويلرى	۱
$4/\lambda\lambda \times 1 \cdot e^{-r} - 1/\cdot r \times 1 \cdot e^{-r}$	اويلرى	۲
$1/1 \cdot \times 1 \cdot \overline{}^{-r} - 1/r1 \times 1 \cdot \overline{}^{-r}$	اويلرى	٣
$1/TY \times 1 \cdot {-r \choose -} - 1/TQ \times 1 \cdot {-r \choose -}$	اويلرى	۴



شکل ۹: نمودار سرعت مخلوط نانوسیال برای مدلسازی اویلری در میانه حفره (y=25 mm) برای درصدهای حجمی ۴٪، ۳٪ و ۲٪ در رایلی ۲۹۰۰۰۰۰

تحلیل اثر زاویه قرارگیری محفظه بر انتقال حرارت ...



شکل۱۰: کانتور دما در مدلسازی اویلری برای درصدهای حجمی ۲٪، ۳٪ و ۴٪ و در رایلی ۲۹۰۰۰۰

نشان دهنده افزایش تغییرات دما در جهت عمود بر دیوارههای سرد و گرم می باشد. بنابراین از مطالب گفته شده مشخص می-شود در مدلسازی دوفازی اولری، با کاهش درصد حجمی، میزان انتقال حرارت صورت گرفته افزایش می یابد.

۴– نتیجه گیری

با توجه به مباحث مطرح شده ، برخی از مهمترین نتایج بدست آمده به شرح زیر میباشد:

- ۱- انتقال نانوذرات تأثیر زیادی بر روی رفتار انتقال
 حرارتی نانوسیالها در انتقال حرارت جابجایی
 طبیعی دارند. بنابراین مدلسازی دوفازی نتایج
 دقیق تری را نسبت به تک فازی ارائه می کنند.
- ۲- برای حفره مورد نظر و تحت شرایط درنظر گرفته شده، از بین مدلهای تک فازی و دوفازی در رویکرد اویلری – اویلری، عدد ناسلت محاسبه شده در مدلسازی اویلری نسبت به سایر مدلسازیها به نتایج تجربی نزدیکتر است.
- ۳- با توجه به نتایج این پژوهش، تحت شرایط درنظر گرفته شده و با توجه به قطر نانوذرات مورد استفاده، پارامتر ترموفورسیس نسبت به نفوذ براونی تأثیر گذارتر است.
- ۴- با افزایش نسبت حجمی و کاهش عدد رایلی، تأثیر پارامتر ترموفورسیس پر رنگ تر میشود.
- ۵- تغییرات چگالی نانوسیال به عنوان نیروی رانش برای جابجایی طبیعی در نانوسیالها همزمان تحت تأثیر دما و نسبت حجمی قرار دارد.
- ۶- در مدلسازی اویلری با افزایش نسبت حجمی نانوذرات، عدد ناسلت کاهش مییابد که با نتایج تجربی همخوانی دارد.

در پایان لازم به ذکر است، از آنجا که تحقیقات تجربی انجام شده در زمینه انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیالها بسیار اندک است، پیشنهاد میگردد جهت صحت سنجی نتایج حاصل، آزمایشات تجربی بیشتری انجام و نتایج با نتایج بدست آمده از این تحقیق مقایسه گردند.

فهرست علائم

	علائم انگلیسی
ā	(m s ⁻²) شتاب ذره (m s ⁻²)
C_D	ضریب درگ
C_k	کسر جرمی هر فاز
C_p	$({ m kj}(kg.k)^{-1})$ گرمای ویژه (
d	قطر ذره (m)
f	تابع درگ
$ec{F}$	نیروی حجمی (N)
$\overrightarrow{F'}$	نیروی حجمی خارجی (N)
$\overrightarrow{F_l}$	نیروی برا (N)
\vec{F}_{vm}	نیروی جرم مجازی (N)
$ec{g}$	شتاب گرانشی زمین (m s ⁻²)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی (w m ⁻² k)
\vec{J}_p	شار جرمی نانوذرات (kg m ⁻² s ⁻¹)
$\vec{1}$	شار جرمی نانوذرات ناشی از نفوذ بروانی
) <i>р.</i> В	$(\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1})$
\vec{i}	شار جرمی نانوذرات ناشی از ترموفورسیس
$J_{p,T}$	$(\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1})$
k	ضریب هدایت حرارتی (w m ⁻¹ k ⁻¹)
K'	ضریب تبادل سیال – سیال (kg m ⁻³ s ⁻¹)
N	عدد ناسلت
NU	

International Communication in Heat and Mass Transfer, 33 (2006) 727-736.

- [4] H. A., Pakravan, M., Yaghoubi, Analysis of nanoparticles migration on natural convection heat transfer of nanofluids International journal of Thermal Science, 68 (2013) 79-93.
- [5] K., Khanafer, M., Vafaei, Light stone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids International journal of Heat and Mass Transfer, 46 (2003) 3639-3653.
- [6] N., Putra, W., Roetzel, S. K., Das, Natural convection of nanofluids Heat and Mass Transfer, 39 (2003) 775-784.
- [7] A. J., Nana, Experimental model of temperaturedriven nanofluid ASME Transaction Journal of Heat Transfer, 129 (2007) 697-704.
- [8] C. J., Ho, W. K., Hiu, Y. S., Chang, C. C., Lin, Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in a vertical square enclosure: an experimental study International journal of Thermal Science, 49 (2010) 1345-1353.
- [9] M., Corcione, M., Cianfrini, A., Quintino, Twophase mixture modeling of natural convection of nanofluids with temperature-dependent properties International journal of Thermal Science, 71 (2013) 182-195.
- [10] M., Akbari, N., Galanis, A., Behzadmehr, Comparative analysis of single and two – Phase models for CFD studies of nanofluid heat transfer International journal of Thermal Science, 50 (2011) 1343-1354.
- [11] P., Hanafizadeh, M., Ashjaee, M., Goharkhan, K., Montazeri, M., Akraam, The comparative study of single and two – phase models for magnetite nanofluid force convection in a tube International Communications in Heat and Mass Transfer, 65(2015) 58-70.
- [12] Ansys, Ansys Fluent 14.0 theory guide, Ansys, Inc., 2011.
- [13] G., Polidori, S., Fohanno, T., Nguyen C. A note on heat transfer modeling of Newtonian nanofluids in laminar free convection International journal of Thermal Science, 46 (2007) 739 – 744.
- [14] A., Bejan, Convection Heat Transfer, 3 rd. ed., John Wiley & Sons, Hoboken (2003).
- [15] H., Ozoe, A., Mouri, M., Ohmuro, S. W., Churchill, N., Lior, Numerical calculation of laminar and turbulent natural convection in water in rectangular channels heated and cooled isothermally on the opposing vertical walls International Journal heat mass transfer, 28- 1 (1985) 125-138.
- [16] A. F., Mills, A. T., Wassel, Aerosol transport in a thermally driven natural convection Letters heat and mass transfer, 2 (1975) 159-168.

شار (kg m ⁻¹ s ⁻²)	p
ىار حرارتى (j m ⁻²)	$q^{\prime\prime}$
مدت تبادل حرارتی بین فازها (j)	Q
دد رایلی	Ra
دد رينولدز	Re
ما (K)	Т
(m s ⁻¹) دار سرعت $({ m ms}^{-1})$	$\vec{\nu}$
ىلائم يونانى	
سر حجمی	α
\mathbf{k}^{-1}) سریب انبساط حرارتی (\mathbf{k}^{-1})	β
ىريب ترموفورسيس	β′
(kg m ⁻¹ s ⁻¹) جت توده	λ
زجت دینامیکی (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	μ
بگالی (kg m ⁻³)	ρ
انسور تنش - کرنش	$ar{ar{ au}}$
مان آسایش ذره (s)	$ au_p$
يرنويسها	
ىيال پايە	bf
راونی	В
انش	dr
رگ g	drag
ۇثر.	eff
بر فاز در مخلوط	k
l	l
خلوط	т
<i>ع</i> هت عمودی 	n
نوسيال	nf
از ثانویه (ذره) 	p
از اوليه	q
یهت مماسی	t T
رموفورسیس	T
ئرم مجازی ۱	vm
نمار ف	14/

مراجع

- [1] H., Masuda, A., Ebada, K., Teramae, N., Hishinuma, Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersion Ultra-Fine particles Netsu Bussei, 7- 4, (1993) 227-233.
- [2] J., Buongiorno, Convective transport in nanofluids ASME Transactions Journal of Heat Transfer, 128 (2006) 240-250.
- [3] R., Jou, S., Tzeng, Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular in enclosure

مدلسازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام ...

[17] S., Duhr, D., Braun, Why molecules move along a temperature gradient Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America, 103 (2006) 19678-19682.