



مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه ها و شماره ها

تولید آنتروپی نانوسیالات در همرفت طبیعی در محفظه‌های متخلخل مستطیل شکل

ایمان زحمت‌کش*

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۶/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۲۴

چکیده

این مقاله به تحلیل تولید آنتروپی نانوسیالات در همرفت طبیعی در محفظه‌های متخلخل مستطیل شکل می‌پردازد. هدف، تعیین شرایط بهینه از نظر قوانین اول و دوم ترمودینامیک است. برای این منظور، معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی نانوسیال به شیوه عددی حل می‌شوند. سپس، نرخ تولید آنتروپی محاسبه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. محاسبات برای نانوذرات مس، اکسید آلومینیم و اکسید تیتانیوم در سیال پایه آب انجام شده، نتایج با هم مقایسه می‌شوند. علاوه بر این، تأثیر کسر حجمی نانو ذرات، عدد رایلی، نسبت منظری محفظه، تبادل تابش و اثرات غیرداریسی بر انتقال گرما و تولید آنتروپی در محفظه بررسی می‌شود. کنکاش در نتایج ارائه شده، نشان می‌دهد که حضور تبادل تابش و اثرات غیرداریسی، نقش مهمی در انتقال گرما و تولید آنتروپی در محفظه دارند. در میان نانوسیالات مطالعه شده، بیشترین انتقال گرما و تولید آنتروپی در نانوسیال آب-مس رخ می‌دهد.

کلمات کلیدی: نانوسیال؛ تولید آنتروپی؛ همرفت طبیعی؛ محیط متخلخل

Entropy generation of nanofluids during natural convection in rectangular porous enclosures

Iman Zahmatkesh*

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Abstract

Entropy generation of nanofluids during natural convection in rectangular porous enclosures is analyzed in this paper. The objective is to find optimum circumstances from the standpoints of the First Law and the Second Law of thermodynamics. For this purpose, the mass, momentum, and energy conservation equations are solved numerically. Thereafter, the generation of entropy is calculated and discussed. Computations are undertaken for Cu, Al₂O₃, and TiO₂ nanoparticles in a base fluid of water and the corresponding results are compared. Moreover, the influences of volume fraction of the nanoparticles, Rayleigh number, enclosure aspect ratio, radiation exchange, and non-Darcy effects on heat transfer and entropy generation in the enclosure are analyzed. Inspection of the presented results demonstrates that radiation exchange and non-Darcy effects possess prominent consequences on heat transfer and entropy generation inside the enclosure. Among the current nanofluids, the highest heat transfer and entropy generation appears in the Cu-water nanofluid.

Keywords: Nanofluid; Entropy generation; Natural convection; Porous medium

۱- مقدمه

مطرح‌شدن نانوسیالات به عنوان محیطی جدید برای انتقال گرما، مطالعه بسیاری از مسایل همرفت در این محیط را ضروری کرده است. بدین سبب، در سال‌های اخیر، مطالعات عددی و آزمایشگاهی فراوانی در زمینه انتقال گرمای همرفت نانوسیالات، چه در حالت طبیعی و چه در حالت واداشته گزارش شده است. به تازگی نیز همرفت طبیعی نانوسیالات در محفظه‌های پر شده از مواد متخلخل، مورد توجه محققان قرار گرفته است.

سان و پاپ [۱]، به تحلیل عددی همرفت طبیعی نانوسیالات در محفظه‌های متخلخل مثلثی پرداخته‌اند. محفظه مورد بررسی آن‌ها، مثلثی قائم‌الزاویه به همراه یک گرمکن با طول محدود روی دیوار عمودی آن بوده است. دیوار مورب، سردتر از گرمکن در نظر گرفته شده، سایر دیوارها عایق فرض شده‌اند. در این تحلیل، مدل داری برای توصیف جریان به کار رفته، نتایج برای سه نانوسیال مختلف (آب-مس، آب-اکسیدآلومینیم و آب-اکسیدتیتانیوم) در گستره وسیعی از عدد رایلی، اندازه و موقعیت گرمکن، نسبت منظری محفظه و کسر حجمی نانو ذرات ارائه شده است. کنکاش در نتایج نشان داد که بهبود انتقال گرما، می‌تواند با کاهش نسبت منظری محفظه، پایین آوردن یا بزرگ کردن گرمکن و بالابردن عدد رایلی تحقق یابد. همچنین، مشخص شد که اگرچه در رایلی‌های کوچک، افزایش کسر حجمی نانو ذرات، بهبود انتقال گرما را به دنبال دارد، اما با بالارفتن عدد رایلی، این روند وارونه می‌شود. نتایج، حاکی از این واقعیت است که در میان نانوسیالات مطالعه شده، انتقال گرمای نانوسیال آب-مس، بیشترین است.

به تازگی نیز مسأله انتقال گرمای ترکیبی (رسانش-همرفت) نانوسیالات در محفظه‌های متخلخل، توسط چمخا و اسماعیل [۲]، مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها یک محفظه مربع‌شکل را در نظر گرفتند که دیواری ضخیم مثلثی در سمت چپ آن نصب شده بود. محفظه از طریق دیوارهای افقی و عمودی این مثلث گرم شده، دیوار سمت راست محفظه، آن را سرد می‌کرد. همچنین، سایر دیوارها، عایق در نظر گرفته شده‌اند. در این تحلیل نیز، توصیف محیط متخلخل بر پایه مدل داری بوده و نانوسیالات گوناگون در گستره وسیعی از عدد رایلی، ابعاد مثلث، نسبت ضرایب

رسانش گرمایی دیوار به نانوسیال و کسر حجمی نانو ذرات، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل نتایج آن‌ها نشان داد که بسته به مقدار عدد رایلی و ابعاد مثلث نصب‌شده، افزایش کسر حجمی نانو ذرات، می‌تواند انتقال گرما را کمتر یا بیشتر کند. آن‌ها نیز مشابه سان و پاپ [۱] دریافتند که در میان نانوسیالات، آب-مس، آب-اکسیدآلومینیم و آب-اکسیدتیتانیوم، انتقال گرمای نانوسیال آب-مس، بیشترین مقدار را داراست.

در حال حاضر، استفاده از قانون دوم ترمودینامیک برای تحلیل تولید آنتروپی در مسایل گوناگون، مورد توجه است که می‌تواند معیاری کمی برای ایجاد برگشت‌ناپذیری‌های ناشی از اصطکاک، انتقال گرما و سایر فرآیندهای غیرایده‌آل موجود در مسأله ارائه کند. تحلیل قانون دوم ترمودینامیک، امکان بهینه‌سازی فرآیندها را با کمک کمینه‌کردن تولید آنتروپی^۱ فراهم می‌آورد. بدین منظور، ابتدا آنتروپی تولید شده به صورت تابعی از هندسه، مواد به کار می‌رود و سایر قیود مسأله تعیین می‌شود. در این راستا، لازم است که بر اساس اصول ترمودینامیک، مکانیک سیالات، انتقال گرما و انتقال جرم یک مدل از مسأله تهیه شود. در ادامه، مدل به دست آمده در شرایط مختلف، مورد استفاده قرار گرفته و حالت‌هایی با کمترین تولید آنتروپی جستجو می‌شوند. ایده چنین شیوه‌ای توسط بیژن [۳] ارائه شده، تاکنون در تحلیل طیف وسیعی از مسایل مهندسی مورد استفاده بوده است. مراجعه به مقالات موجود نشان می‌دهد که برای اولین بار بایتاس [۴]، به محاسبه تولید آنتروپی در همرفت طبیعی در محفظه‌های متخلخل پرداخته است. محمود و فریزر [۵]، تأثیر میدان مغناطیسی را بر همرفت طبیعی و تولید آنتروپی در محفظه‌های متخلخل بررسی کرده‌اند. زحمت‌کش [۶]، تأثیر شرایط مرزی محفظه را بر تولید آنتروپی در آن مدنظر قرار داده است. به تازگی نیز زحمت‌کش، تحلیل خود را به محفظه‌هایی با سه دیوار آدیاباتیک [۷] و محفظه‌های مورب [۸] توسعه داده است. شیوه کمینه‌کردن تولید آنتروپی برای بهینه‌سازی همرفت طبیعی در محفظه‌های متخلخل، بوسیله کالوری و بسک [۹] نیز به کار رفته است. همچنین، حیدری و

¹ Entropy generation minimization

گونه‌ای که دمای دیوار سمت چپ (T_H) از دمای دیوار سمت راست (T_C) بیشتر است. به منظور ساده‌سازی معادلات حاکم بر این مسأله، فرضیات زیر به خدمت گرفته می‌شوند.

(الف) نانوسیال تراکم‌ناپذیر و نیوتنی است.

(ب) جریان نانوسیال در محیط متخلخل، آرام و دوبعدی است.

(پ) تعادل محلی گرمایی^۲ بین نانوذرات و سیال پایه برقرار بوده، لغزشی بین آن‌ها رخ نمی‌دهد.

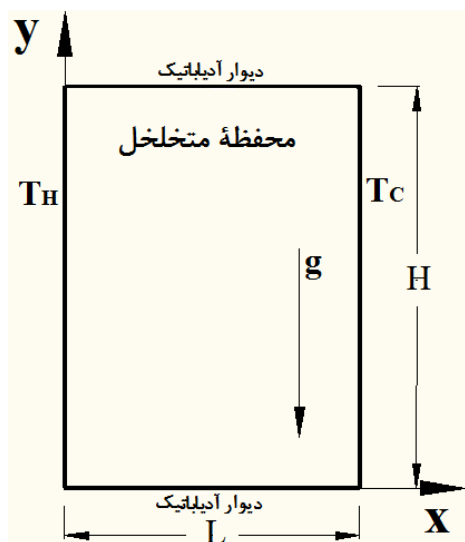
(ت) تعادل محلی گرمایی بین نانوسیال و ماتریس جامد برقرار است.

(ث) به جز چگالی در جمله شناوری که برای آن تقریب ابریک-بوزینسک^۳ به کار رفته، کلیه خواص ترموفیزیکی نانوسیال ثابتند.

(ج) شار تابشی در جهت y در مقایسه با شار تابشی در جهت x قابل چشم‌پوشی است.

(چ) محیط ضخیم نوری^۴ بوده، از این رو می‌توان از تقریب پخش رزوند^۵ [۱۲] برای محاسبه شار تابشی استفاده کرد.

(ح) مدل داری-فرچهمر، برای توصیف میدان جریان معتبر است.



شکل ۱- طرح شماتیک محفظه متخلخل مستطیل شکل

همکاران [۱۰]، به مطالعه تأثیر پره بر همرفت طبیعی و تولید آنتروپی در یک محفظه متخلخل مربع شکل پرداخته‌اند. از آنجایی که قانون دوم ترمودینامیک تاکنون به مسایل همرفت طبیعی نانوسیالات در محفظه‌های متخلخل اعمال نشده، این پژوهش به تحلیل عددی تولید آنتروپی نانوسیالات در همرفت طبیعی در محفظه‌های متخلخل مستطیل شکل می‌پردازد. هدف، تعیین حالت‌های بهینه از نظر قوانین اول و دوم ترمودینامیک است.

پژوهش‌های انجام شده در زمینه همرفت طبیعی نانوسیالات در محفظه‌های متخلخل، همگی بر پایه مدل داری بوده‌اند که سرعت سیال در محیط متخلخل را متناسب با گرادیان فشار موجود در آن در نظر می‌گیرد [۱ و ۲]. چنین فرضی در سرعت‌های زیاد یا محیط‌هایی با نفوذپذیری بالا، اعتبار خود را از دست می‌دهد که به جدایش جریان در محیط متخلخل نسبت داده می‌شود. یکی از روش‌های موجود برای غلبه بر این مشکل، اضافه کردن جمله مرتبه دوم سرعت، به رابطه بین سرعت و گرادیان فشار است که آن را جمله فرچهمر^۱ [۱۱] نامیده‌اند.

در پژوهش حاضر، معادلات حاکم مطرح توسط سان و پاپ [۱] و چمخا و اسماعیل [۲]، به یک مدل داری-فرچهمر در حضور تبادل تابش، توسعه داده می‌شود. سپس، با استفاده از آن، تأثیر جمله فرچهمر و حضور تبادل تابش و همچنین جنس نانو ذره و کسر حجمی آن، عدد رایلی و نسبت منظری محفظه بر همرفت طبیعی و تولید آنتروپی نانوسیالات در محفظه‌های متخلخل مستطیل شکل، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در ادامه، معادلات حاکم بر مسأله بیان می‌شوند. سپس، شیوه حل عددی و صحنه‌گذاری برنامه کامپیوتری تهیه شده ارائه می‌شوند. مقاله با تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی و جمع‌بندی آن‌ها به پایان می‌رسد.

۲- معادلات حاکم

شکل ۱، طرح شماتیک محفظه متخلخل مورد نظر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این محفظه دارای دو دیوار افقی آدیباتیک و دو دیوار عمودی دما ثابت است به

² Local thermal equilibrium

³ Oberbeck-Boussinesq approximation

⁴ Optically-Thick

⁵ Rosseland diffusion approximation

¹ Forchheimer term

در این‌جا، σ ثابت استفان-بولتزمن^۲ بوده و a ضریب جذب میانگین است.

بسط T^4 به صورت یک سری تیلور حول T_c^4 و سپس چشم‌پوشی از جملات مرتبه بالا نتیجه می‌دهد که:

$$T^4 \cong 4TT_c^3 - 3T_c^4 \quad (۶)$$

بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$q_r = -\frac{16\sigma}{3a} T_c^3 \frac{\partial T}{\partial x} \quad (۷)$$

پس، معادله بقای انرژی نانوسیال می‌شود:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{16\sigma}{3a\rho_{nf}c_{p,nf}} T_c^3 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (۸)$$

در این پژوهش، لزجت مؤثر نانوسیال با استفاده از رابطه برینکمن^۳ [۱۳] به صورت رابطه (۹) بر حسب لزجت سیال پایه (μ_f) محاسبه می‌شود.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (۹)$$

مدل ماکسول-گارتنتز^۴ [۱۴] نیز برای تعیین ضریب رسانش گرمایی مؤثر نانوسیال به کار می‌رود:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \quad (۱۰)$$

که در آن، k_p و k_f به ترتیب ضریب رسانش گرمایی نانوذرات و سیال پایه است.

ضریب پخش گرمایی مؤثر نانوسیال به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{\rho_{nf}c_{p,nf}} \quad (۱۱)$$

در این رابطه، $\rho_{nf}c_{p,nf}$ ظرفیت گرمایی نانوسیال بوده که از رابطه (۱۲) بر حسب ظرفیت گرمایی نانوذرات و سیال پایه به دست می‌آید:

$$\rho_{nf}c_{p,nf} = (1-\phi)\rho_f c_{p,f} + \phi\rho_p c_{p,p} \quad (۱۲)$$

شرایط مرزی مسئله نشان داده شده در شکل ۱ از این قرار است:

$$x = 0, 0 < y < H; \quad u = 0, v = 0, T = T_H \quad (۱۳)$$

بدین ترتیب، توسعه معادلات حاکم مطرح توسط سان و پاپ [۱] و چمخا و اسماعیل [۲]، به یک مدل داری-فرچهمر در حضور تبادل تابش معادلات حاکم بر مسأله را به صورت زیر بدست خواهد داد:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

معادله اندازه حرکت در جهت x :

$$u \left(1 + \frac{\tilde{K}}{\mu_{nf}} \rho_{nf} |\vec{V}| \right) = -\frac{K}{\mu_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (۲)$$

معادله اندازه حرکت در جهت y :

$$v \left(1 + \frac{\tilde{K}}{\mu_{nf}} \rho_{nf} |\vec{V}| \right) = -\frac{K}{\mu_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{Kg}{\mu_{nf}} [\phi\rho_p\beta_p + (1-\phi)\rho_f\beta_f](T - T_c) \quad (۳)$$

معادله بقای انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho_{nf}c_{p,nf}} \frac{\partial q_r}{\partial x} \quad (۴)$$

که در آن، u و v به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های x و y هستند. T معرف دما، p معرف فشار و ϕ معرف کسر حجمی نانوذرات است. همچنین، ρ_p و ρ_f به ترتیب چگالی نانوذرات و سیال پایه بوده، β_p و β_f ضرایب انبساط حجمی آن‌ها هستند. علاوه بر این، μ_{nf} لزجت مؤثر نانوسیال و ρ_{nf} چگالی، $c_{p,nf}$ گرمای ویژه فشار ثابت و α_{nf} ضریب پخش گرمایی مؤثر آن است. g نیز شتاب گرانش، K نفوذپذیری محیط متخلخل و \tilde{K} متغیر ماده^۱ است. بدیهی است با قراردادن $\tilde{K} = 0$ ، معادلات اندازه حرکت به مدل داری ساده می‌شوند.

عبارت q_r در سمت راست رابطه (۴)، معرف شار تابشی در جهت x است که با به کارگیری تقریب پخش رزلند [۱۲] به صورت رابطه (۵) قابل محاسبه خواهد بود.

$$q_r = -\frac{4\sigma}{3a} \frac{\partial T^4}{\partial x} \quad (۵)$$

^۲ Stefan-Boltzman constant

^۳ Brinkman

^۴ Maxwell-Garnetts

^۱ Material parameter

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{H}, AR = \frac{H}{L},$$

$$\Psi = \frac{\psi}{\alpha_f}, \theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}, G = \frac{\tilde{K}\rho_{nf}\alpha_f}{L\mu_{nf}} \quad (21)$$

$$Ra = \frac{Kg\rho_f\beta_f(T_H - T_c)H}{\mu_f\alpha_f}, Rd = \frac{4\sigma T_c^3}{ak_{nf}}$$

که در آن، AR نسبت منظری محفظه^۲، G متغیر لختی^۳، Ra عدد رایلی^۴ و Rd متغیر تابش^۵ است.

معادلات (۱۹) و (۲۰) پس از بی‌بعدسازی، شکل روابط (۲۲) و (۲۳) را به خود خواهند گرفت:

$$\left[1 + G \sqrt{\left(\frac{\partial\Psi}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial Y}\right)^2} \right] \left[\frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2} \right]$$

$$+ \frac{G}{\sqrt{\left(\frac{\partial\Psi}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial Y}\right)^2}} \left[\left(\frac{\partial\Psi}{\partial X}\right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2} + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial Y}\right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2} + 2 \frac{\partial\Psi}{\partial X} \frac{\partial\Psi}{\partial Y} \frac{\partial^2\Psi}{\partial X\partial Y} \right]$$

$$= -Ra(1 - \phi)^{2.5} (1 - \phi) + \phi \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right) \left(\frac{\beta_p}{\beta_f} \right) \frac{\partial\theta}{\partial X} \quad (22)$$

$$\frac{\partial\Psi}{\partial Y} \frac{\partial\theta}{\partial X} - \frac{\partial\Psi}{\partial X} \frac{\partial\theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left[AR \left(1 + \frac{4Rd}{3} \right) \frac{\partial^2\theta}{\partial X^2} + \frac{1}{AR} \frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2} \right] \quad (23)$$

برای شرایط مرزی نیز خواهیم داشت که

$$X = 0, 0 < Y < 1: \quad \Psi = 0, \theta = 1 \quad (24)$$

$$X = 1, 0 < Y < 1: \quad \Psi = 0, \theta = 0 \quad (25)$$

$$0 < X < 1, Y = 0: \quad \Psi = 0, \frac{\partial\theta}{\partial Y} = 0 \quad (26)$$

$$0 < X < 1, Y = 1: \quad \Psi = 0, \frac{\partial\theta}{\partial Y} = 0 \quad (27)$$

$$x = L, 0 < y < H: \quad u = 0, v = 0, T = T_c \quad (14)$$

$$0 < x < L, y = 0: \quad u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

$$0 < x < L, y = H: \quad u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

در معادلات اندازه‌حرکت، جملات دارای گرادیان‌های فشار را می‌توان با مشتق‌گیری ضربدری حذف کرده، به شکل رابطه (۷) رسید:

$$\left[1 + \frac{\tilde{K}\rho_{nf}}{\mu_{nf}} \sqrt{u^2 + v^2} \right] \left[\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\tilde{K}\rho_{nf}}{\mu_{nf} \sqrt{u^2 + v^2}} \left[u \left(u \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) - v \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$= -\frac{Kg}{\mu_{nf}} [\phi\rho_s\beta_s + (1 - \phi)\rho_f\beta_f] \frac{\partial T}{\partial x}$$

با تعریف تابع جریان^۱، ψ ، به صورت

$$u = \frac{\partial\psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (18)$$

معادله پیوستگی خود به خود ارضا می‌شود. همچنین، معادلات (۸) و (۱۷) به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) در می‌آیند.

$$\left[1 + \frac{\tilde{K}\rho_{nf}}{\mu_{nf}} \sqrt{\left(\frac{\partial\Psi}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial Y}\right)^2} \right] \left[\frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2} \right] + \frac{\tilde{K}\rho_{nf}}{\mu_{nf} \sqrt{\left(\frac{\partial\Psi}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial Y}\right)^2}} \left[\left(\frac{\partial\Psi}{\partial X}\right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2} + \left(\frac{\partial\Psi}{\partial Y}\right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2} + 2 \frac{\partial\Psi}{\partial X} \frac{\partial\Psi}{\partial Y} \frac{\partial^2\Psi}{\partial X\partial Y} \right]$$

$$= -\frac{Kg}{\mu_{nf}} [\phi\rho_s\beta_s + (1 - \phi)\rho_f\beta_f] \frac{\partial T}{\partial x} \quad (19)$$

$$\frac{\partial\Psi}{\partial Y} \frac{\partial T}{\partial X} - \frac{\partial\Psi}{\partial X} \frac{\partial T}{\partial Y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) + \frac{16\sigma}{3a\rho_{nf}c_{p,nf}} T_c^3 \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \quad (20)$$

به منظور بی‌بعدکردن معادلات حاکم، متغیرهای بی‌بعد زیر تعریف می‌شوند.

² Enclosure aspect ratio

³ Inertial parameter

⁴ Rayleigh number

⁵ Radiation parameter

¹ Stream function

۳- تولید آنتروپی

برای محاسبه نرخ تولید آنتروپی در محیط‌های متخلخل، سه رابطه مختلف قابل استفاده است. بر پایه پژوهش هومن و گرگنسی [۱۵]، به کارگیری مدل هدرامی و همکاران [۱۶]، دقت بالاتری را به دنبال خواهد داشت. تعمیم رابطه مذکور به جریان نانوسیالات، نتیجه می‌دهد که:

$$S_{gen}''' = \frac{k_{nf}}{T_c^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu_{nf}}{KT_c} [u^2 + v^2] + K \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (28)$$

با تعریف نرخ انتقال مشخصه^۱ به صورت

$$S'_0 = k_f (T_H - T_C)^2 / H^2 T_C^2 \quad (29)$$

می‌توان به شکل بی‌بعد نرخ تولید آنتروپی رسید:

$$N = \frac{S_{gen}'''}{S'_0} = \frac{k_{nf}}{k_f} \left[AR^2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right] + \phi \left\{ AR^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial Y} \right)^2 \right\} + Da \left[4 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial X \partial Y} \right)^2 + \left(\frac{1}{AR} \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} - AR \frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} \right)^2 \right] \quad (30)$$

که در آن، $\phi = \mu_{nf} T_C \alpha_{nf}^2 / k_f K (T_H - T_C)^2$ ، نسبت توزیع برگشت‌ناپذیری بوده، $Da = K / H^2$ عدد دارسی است. در رابطه بالا، کروش اول، برگشت‌ناپذیری انتقال گرمایی را بیان می‌کند، در حالی که جملات باقی‌مانده معرف برگشت‌ناپذیری اصطکاکی است.

هنگامی که نرخ تولید آنتروپی در تک‌تک نقاط درون محفظه به‌دست‌آمد با انتگرال‌گیری از آن روی کل محفظه، می‌توان به نرخ تولید آنتروپی کلی^۲ رسید:

$$N_{global} = \int_A N dA \quad (31) = \int_0^1 \int_0^1 N(X, Y) dXdY$$

۴- حل عددی

دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم بر تابع جریان و توزیع دما، به همراه شرایط مرزی بیان شده به صورت همزمان و با شیوه تفاضل محدود حل می‌شوند. هنگامی که تکرارها همگرا شد، مقادیر عددی برگشت‌ناپذیری‌ها در تک‌تک گره‌ها محاسبه می‌شود و سپس نرخ تولید آنتروپی کلی در محفظه به‌دست می‌آید. علاوه بر این، مقادیر ناسلت‌های موضعی و میانگین در دیوارهای غیرآدیباتیک با استفاده از روابط (۳۲) و (۳۳) تعیین می‌شوند.

$$Nu = \frac{hH}{k_f} = - \frac{k_{nf}}{k_f} AR \left(1 + \frac{4Ra}{3} \right) \left[\frac{\partial \theta}{\partial X} \right]_{Y=0} \quad (32)$$

$$\bar{Nu} = \int_0^1 Nudy \quad (33)$$

بر پایه یک مطالعه استقلال شبکه، کلیه محاسبات با یک شبکه 200×200 انجام شده است. نانوسیالات مطالعه‌شده شامل، آب-مس، آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسید تیتانیوم هستند. خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات مربوطه در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات [۱]

TiO_2	Al_2O_3	Cu	آب	
۶۸۶/۲	۷۶۵	۳۸۵	۴۱۷۹	$c_p (Jkg^{-1}K^{-1})$
۴۲۵۰	۳۹۷۰	۸۹۳۳	۹۹۷/۱	$\rho (kgm^{-3})$
۸/۹۵۳۸	۴۰	۴۰۰	۰/۶۱۳	$k (Wm^{-1}K^{-1})$
۰/۹	۰/۸۵	۱/۶۷	۲۱	$\beta \times 10^5 (K^{-1})$

در کلیه محاسبات تولید آنتروپی، مقادیر رابطه (۳۴) برای طول محفظه و دمای دیوارها در نظر گرفته شده‌اند.

$$L = 1m, T_H = 400K, T_C = 300K. \quad (34)$$

۵- صحت‌گذاری شبیه‌سازی عددی

در ابتدای هر شبیه‌سازی عددی، باید از صحت برنامه کامپیوتری مطمئن شد. بدین منظور، برنامه تهیه‌شده برای شبیه‌سازی همرفت طبیعی سیال خالص ($\phi = 0$) در یک

^۱ Characteristic transfer rate

^۲ Global entropy generation rate

محفظه، حضور تبادل تابش و اثرات غیرداریسی نیز، مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت.

شکل ۳ توزیع تابع جریان، دما و نرخ تولید آنتروپی در محفظه را برای آب خالص و نانوسیالات آب-مس، آب-اکسیدآلومینیم و آب-اکسیدتیتانیوم در رایلی ۱۰۰ آورده است. برای این‌که مقایسه حالات مختلف بهتر امکان‌پذیر باشد، مقادیر ناسلت میانگین، نرخ تولید آنتروپی کلی و بیشترین مقدار تابع جریان نیز آورده شده‌اند. در این شکل، نتایج مربوط به نانوسیالات متناظر با کسرحجمی ۰/۱ است.

تأثیر نانوذرات بر توزیع خطوط جریان در محفظه روشن است. پیداست که با اضافه کردن نانوذرات به آب، از قدرت جریان همرفت طبیعی کاسته می‌شود، به گونه‌ای که کمترین کاهش، در نانوسیال آب-مس و بیشترین آن، در نانوسیال آب-اکسیدتیتانیوم رخ می‌دهد. علت فیزیکی این کاهش، بیشتر بودن چگالی این نانوسیالات نسبت به سیال پایه است که با مشاهدات تجربی پوترا و همکاران [۲۱]، در همرفت طبیعی نانوسیالات در محیط‌های غیرمتخلخل همخوانی دارد. مشاهده توزیع دما نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات به آب، گرادیان دما در گوشه سمت چپ پایینی و گوشه سمت راست بالایی کاهش می‌یابد که کاهش تبادل گرما را به دنبال خواهد داشت. مقادیر عددی ناسلت میانگین نیز، گویای این واقعیت‌اند. باید توجه داشت که کاهش‌هایی که در انتقال گرما به وجود آمده، صرفاً به علت تضعیف جریان همرفت طبیعی است، زیرا همان‌گونه که در جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد، حضور نانوذرات خواص گرمایی سیال را حتی بهبود نیز داده‌اند. بدین ترتیب، همرفت طبیعی نانوسیال آب-اکسیدتیتانیوم با ضعیف‌ترین قدرت، کمترین انتقال گرما را در پی داشته است.

جدول ۳- خواص گرمایی آب و نانوسیالات مورد بررسی

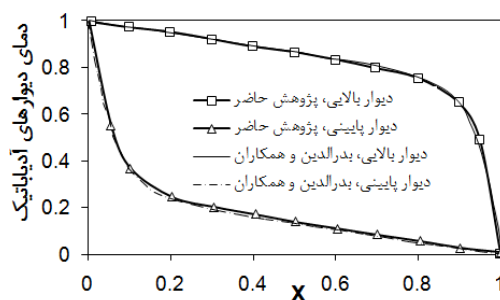
به ازای $\phi = 0.1$		سیال
$\alpha \times 10^7 (m^2 s^{-1})$	$k (W m^{-1} K^{-1})$	
۱/۴۷	۰/۶۱۳	آب
۱/۹۹۱	۰/۸۱۷	آب-مس
۱/۹۹۰	۰/۸۰۷	آب-اکسیدآلومینیم
۱/۹۲۱	۰/۷۷۷	آب-اکسیدتیتانیوم

محفظه متخلخل مربعی ($AR = 1$) در غیاب تبادل تابش ($R_d = 0$) و اثرات غیرداریسی ($G = 0$) به کار می‌رود. جدول ۲، نتایج پژوهش حاضر را در گستره وسیعی از عدد رایلی با نتایج چهار پژوهش دیگر مقایسه کرده است. پیداست که نتایج به دست آمده، تطابق بسیار خوبی با نتایج پژوهش‌های پیشین دارد.

جدول ۲- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج سایرین بر حسب عدد ناسلت میانگین در دیوارهای غیرآدیاباتیک به ازای $\phi = 0$

پژوهشگران	Ra=1000	Ra=100	Ra=10
واکر و هومسی [۱۷]	۱۲/۹۶۰	۳/۰۹۷	-
مویا و همکاران [۱۸]	-	۲/۸۰۲	۱/۰۶۵
سعید و پاپ [۱۹]	۱۳/۷۲۶	۳/۰۰۲	-
بدرالدین و همکاران [۲۰]	-	۳/۲۰۰۵	۱/۰۷۹۸
پژوهش حاضر	۱۳/۱۸۶	۳/۰۶۸	۱/۰۷۳

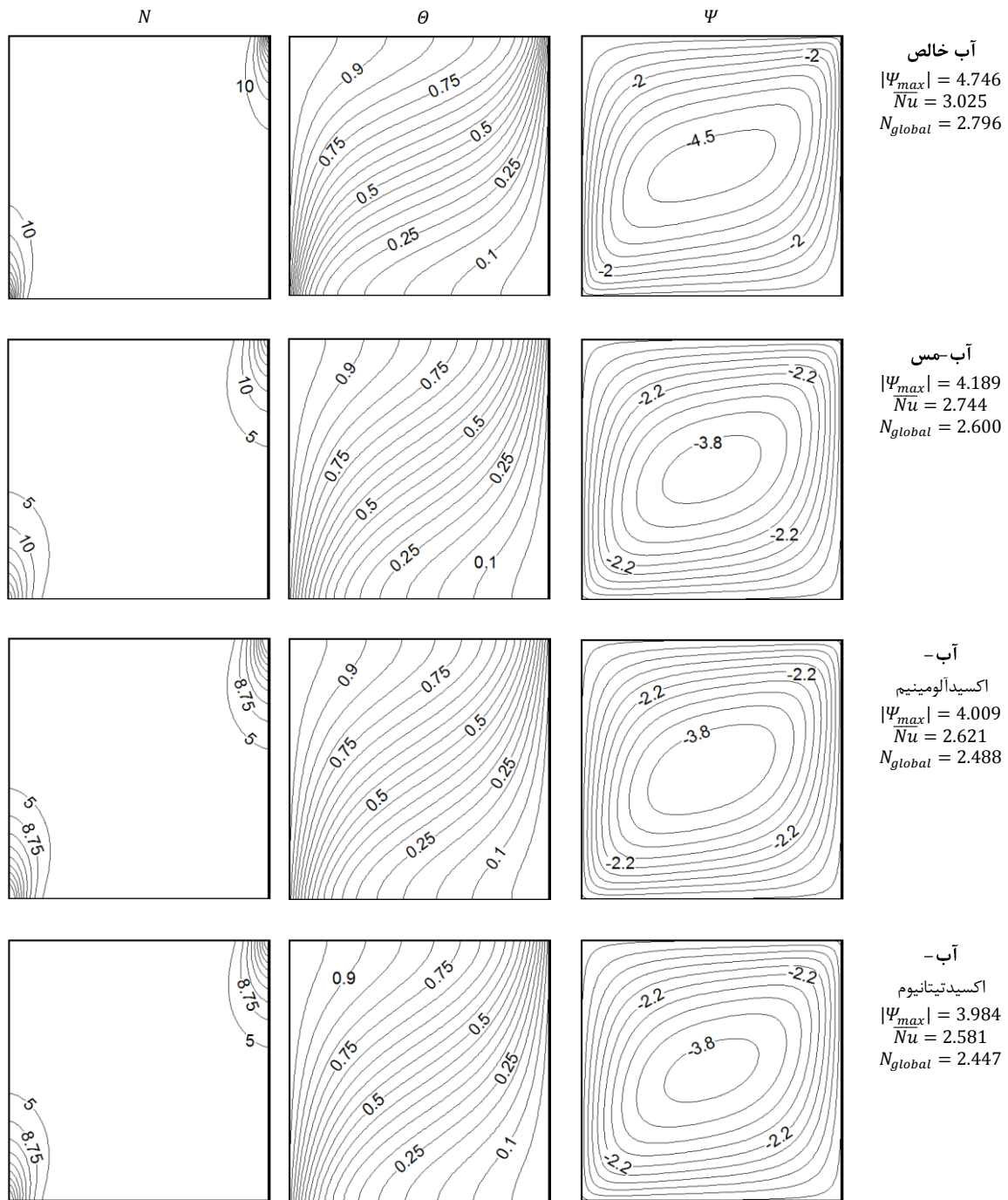
به منظور ارزیابی بیشتر حل عددی، در شکل ۲ نتایج برنامه تهیه شده بر حسب تغییرات دما در دیوارهای آدیاباتیک با نتایج شبیه‌سازی بدرالدین و همکاران [۲۰]، مقایسه شده است. پیداست که شیوه به کاررفته در پیشگویی میدان جریان، موفق عمل کرده است.



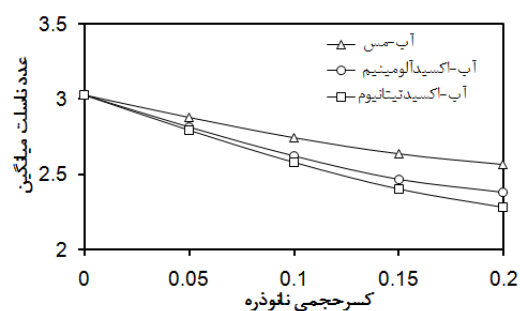
شکل ۲- مقایسه نتایج بدست آمده با مطالعات پیشین بر حسب دمای دیوارهای آدیاباتیک به ازای $\phi = 0$

۶- نتایج شبیه‌سازی

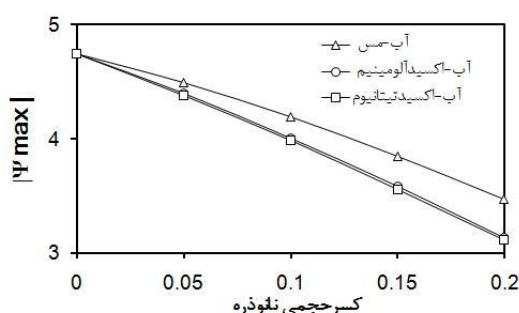
در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای محفظه متخلخل نشان داده شده در شکل ۱ ارائه می‌شوند. ابتدا محاسبات با استفاده از مدل داریسی ($G = 0$) برای محفظه‌ای مربع‌شکل ($AR = 1$) و در غیاب تبادل تابش ($R_d = 0$) انجام می‌شوند. در ادامه، تأثیر نسبت منطری



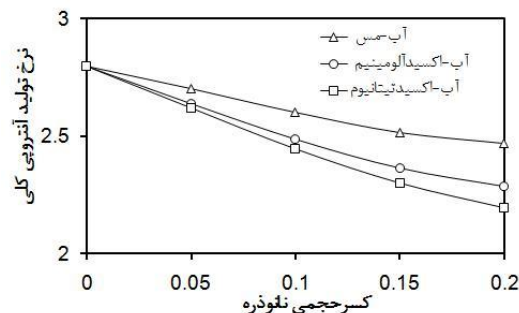
شکل ۳- توزیع خطوط جریان، دما و نرخ تولید آنتروپی برای آب و نانوسیالات مختلف در $Ra = 100$



(الف) عدد ناسلت میانگین



(ب) مقدار بیشینه تابع جریان



(ج) نرخ تولید آنروپی کلی

شکل ۴- تأثیر کسر حجمی نانوذرات

آورده شده است. در این جا، نتایج نانوسیالات متناظر با کسر حجمی ۰/۱ است.

شکل ۵، نشان می‌دهد که اگرچه در گستره وسیعی از عدد رایلی، انتقال گرمای آب خالص از نانوسیالات مورد بررسی بیشتر است، اما در رایلی‌های کوچک، این روند وارونه می‌شود. علت فیزیکی این رفتار، غالب شدن شیوهٔ رسانش گرمایی در این وضعیت است. در حقیقت، چون در رایلی‌های کوچک، جریان همرفت طبیعی قوی نیست، بهبود خواص گرمایی ناشی از افزودن نانوذرات به اثر افزایش چگالی آن

از آنجایی که حضور نانوذرات در آب از یک سو کاهش قدرت جریان همرفت طبیعی و از سوی دیگر، کاهش انتقال گرما را به دنبال دارد، جای شگفتی نیست که با افزودن نانوذرات به آب، شاهد کاهش تولید آنروپی نیز باشیم، زیرا هم برگشت‌ناپذیری اصطکاکی و هم برگشت‌ناپذیری انتقال گرمایی را کم می‌کند. این امر در توزیع خطوط آیزنتروپیک و همچنین در مقادیر عددی نرخ تولید آنروپی کلی قابل مشاهده است. بدیهی است در این شرایط، کمترین تولید آنروپی در نانوسیال آب-اکسیدتیتانیوم و بیشترین آن در آب خالص رخ می‌دهد.

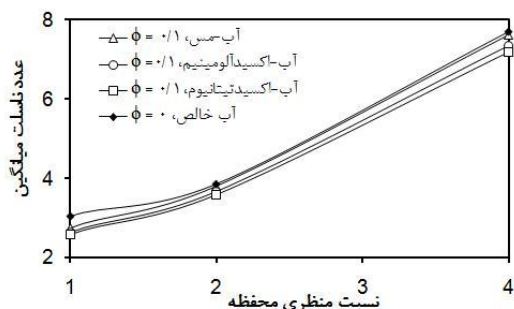
در ادامه، تأثیر کسر حجمی نانوذرات، عدد رایلی، نسبت منطری محفظه، حضور تبادل تابش و اثرات غیرداری بر انتقال گرما و تولید آنروپی در محفظه، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۶-۱ اثر کسر حجمی نانوذرات

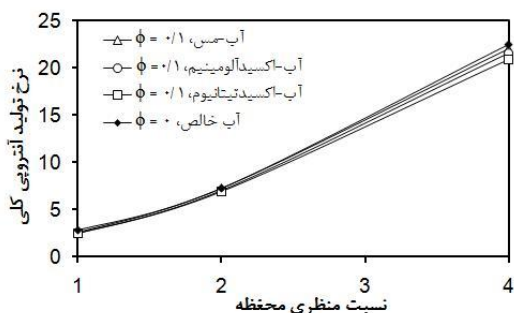
به منظور بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات بر انتقال گرما و تولید آنروپی در محفظه، مشابه سان و پاپ [۱] و چمخا و اسماعیل [۲]، محاسبات برای نانوسیالات آب-مس، آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسیدتیتانیوم تا کسر حجمی ۰/۲ انجام گرفته، نتایج در شکل ۴ با هم مقایسه شده‌اند. پیداست که در هر سه نانوسیال تحت بررسی، با افزایش کسر حجمی نانو ذرات از قدرت جریان همرفت طبیعی کاسته شده، در نتیجه، انتقال گرما و تولید آنروپی در محفظه کاهش می‌یابند. همچنین، مشخص است که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، نتایج نانوسیالات مختلف از یکدیگر متمایزتر می‌شوند. علاوه بر این، می‌توان مشاهده کرد که در سرتاسر کسر حجمی، انتقال گرما و تولید آنروپی نانوسیال آب-مس از بقیه بیشتر است.

۶-۲ اثر عدد رایلی

عدد رایلی، متغیر مهمی است که نقشی کلیدی در ایجاد جریان‌های همرفت طبیعی و همچنین انتقال گرما و تولید آنروپی در آن‌ها ایفا می‌کند. برای مطالعهٔ تأثیر این متغیر، تغییرات عدد ناسلت میانگین و نرخ تولید آنروپی کلی برای آب و نانوسیالات آب-مس، آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسیدتیتانیوم در گسترهٔ وسیعی از عدد رایلی در شکل ۵



الف) عدد ناسلت میانگین



ب) نرخ تولید آنتروپی کلی

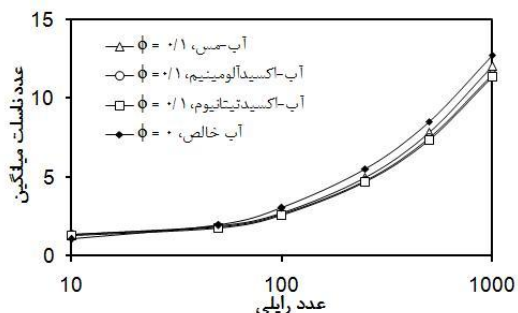
شکل ۶- تأثیر نسبت منظری محفظه

منظری محفظه نیز نمی‌تواند انتقال گرما و تولید آنتروپی نانوسیالات آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسید تیتانیوم را از نانوسیال آب-مس بیشتر کند.

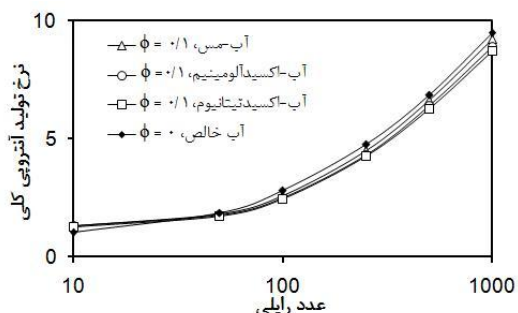
۴-۶ اثر تبادل تابش

تا این‌جا از تبادل تابش در محفظه چشم‌پوشی شده بود. برای این‌که تأثیر تبادل تابش بر ایجاد جریان همرفت طبیعی، انتقال گرما و تولید آنتروپی در محفظه مشخص شود، محاسبات پیشین در رایلی ۱۰۰ برای آب خالص و نانوسیالات آب-مس، آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسید تیتانیوم در حضور تابش، تکرار شده، نتایج بر حسب توزیع تابع جریان، دما و نرخ تولید آنتروپی در محفظه در شکل ۷ آورده شده‌اند. در این‌جا، ضریب جذب محیط در کلیه حالت‌ها برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

تأثیر تابش، بر توزیع تابع جریان و دما در محفظه روشن است. در حقیقت، حضور تابش سبب شده که تغییر دما در مقاطع عمودی درون محفظه، تقریباً یکنواخت شود. همچنین، توزیع خطوط جریان، شکل نسبتاً متقارنی را نسبت به مرکز محفظه پیدا کرده‌اند. توزیع تولید آنتروپی در محفظه



الف) عدد ناسلت میانگین



ب) نرخ تولید آنتروپی کلی

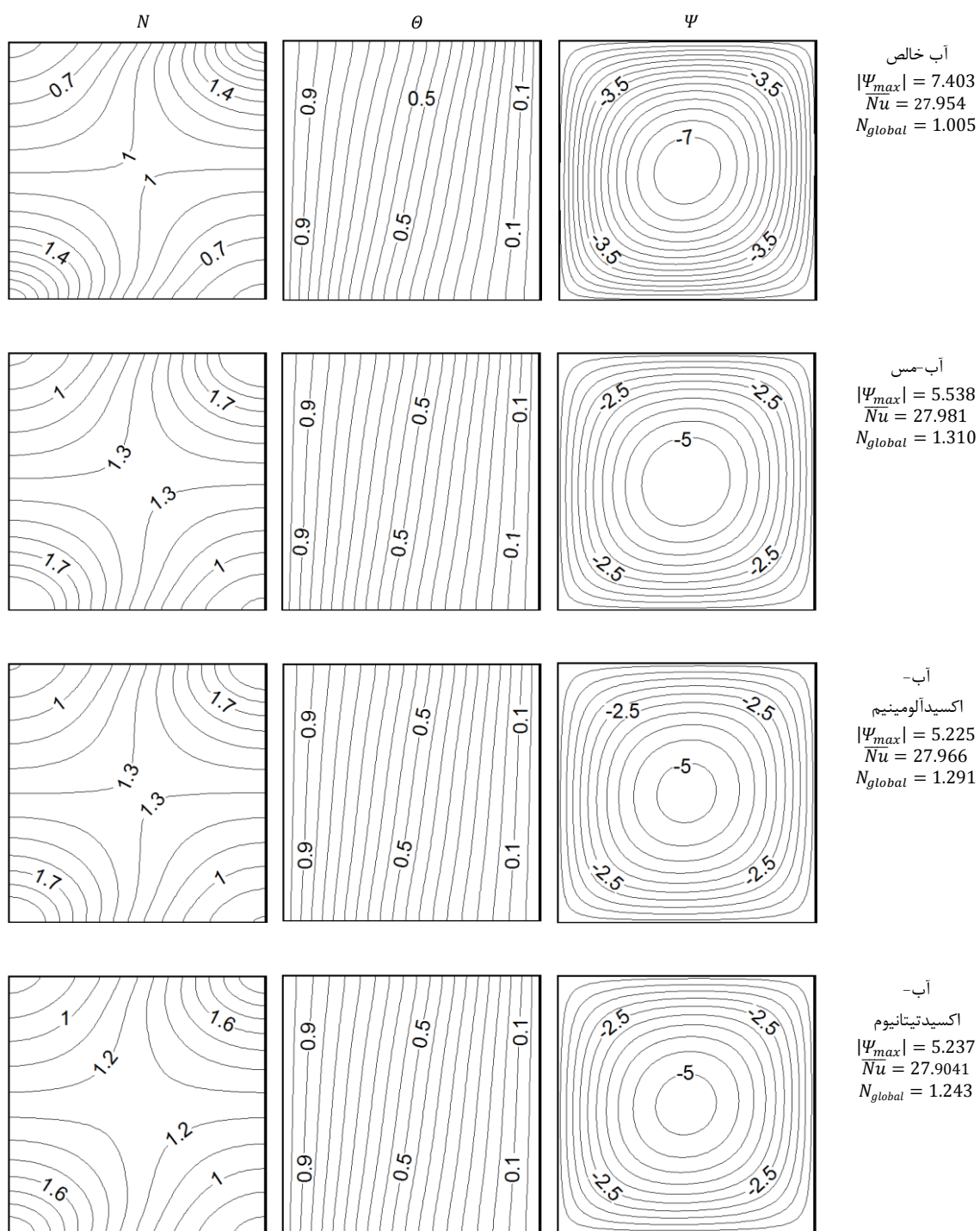
شکل ۵- تأثیر عدد رایلی

غلبه می‌کند. چنین رفتاری با مشاهدات پیشین سان و پاپ [۱] و چمخا و اسماعیل [۲] هم‌خوانی دارد.

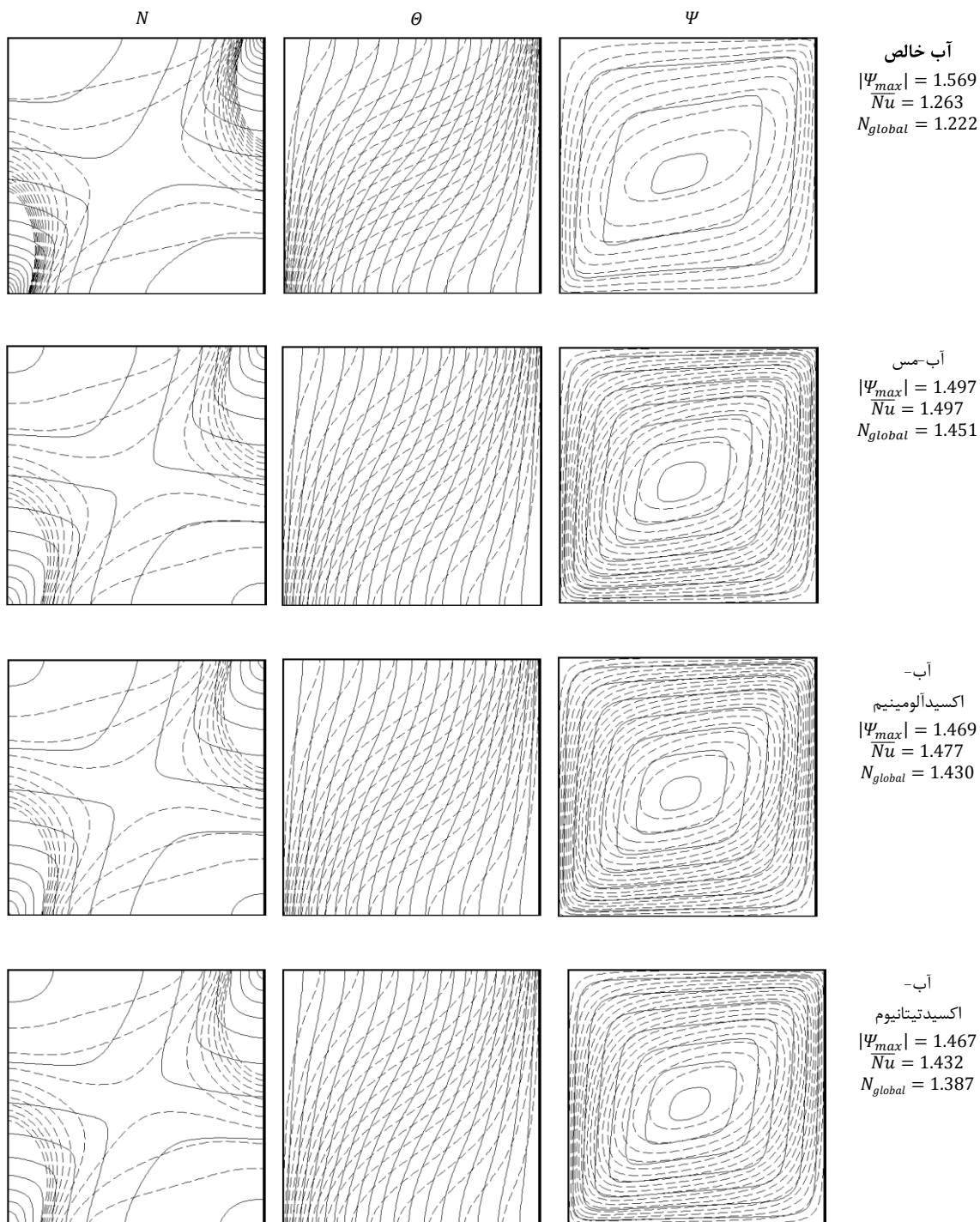
کنکاش در شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی، نتایج نانوسیالات مختلف از یکدیگر متمایزتر می‌شوند. همچنین، پیداست که در سرتاسر گستره عدد رایلی، انتقال گرما و تولید آنتروپی نانوسیال آب-مس از سایر نانوسیالات بیشتر است.

۳-۶ اثر نسبت منظری محفظه

در این بخش، اثر نسبت منظری محفظه بر انتقال گرما و تولید آنتروپی در آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، محاسبات برای آب خالص و نانوسیالات آب-مس، آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسید تیتانیوم در نسبت‌های منظری ۱، ۲ و ۴ انجام گرفته، نتایج در شکل ۶ با هم مقایسه شده‌اند. پیداست که در تمامی حالت‌ها، با افزایش نسبت منظری محفظه، انتقال گرما و تولید آنتروپی در آن افزایش یافته که ناشی از بیشتر شدن مساحت دیوارهای غیرآدیاباتیک در مقابل دیوارهای آدیاباتیک محفظه است. مشاهده این شکل، همچنین نشان می‌دهد که تغییر نسبت



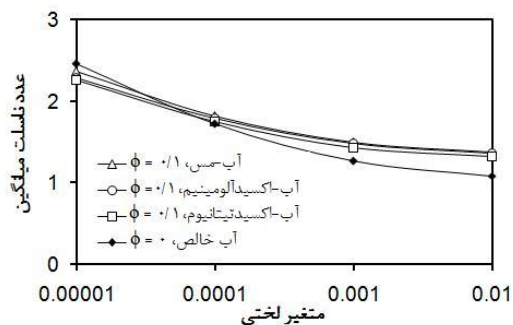
شکل ۷- توزیع خطوط جریان، دما و نرخ تولید آنتروپی برای آب و نانوسیالات مختلف در $Ra = 100$ با در نظر گرفتن تبادل تابش



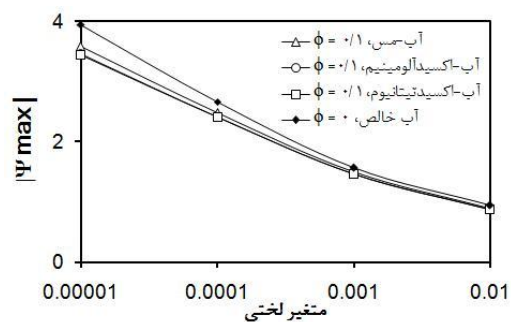
شکل ۸- توزیع خطوط جریان، دما و نرخ تولید آنتروپی برای آب و نانوسیالات مختلف در $Ra = 100$ در حضور اثرات غیرداریسی به ازای $G = 0.001$ (خط چین‌ها نتایج مدل داریسی را نشان می‌دهند).

۷ - نتیجه‌گیری

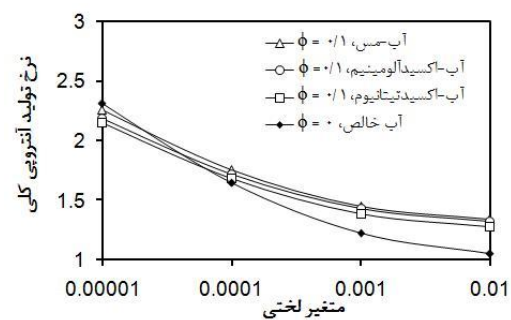
در این مقاله، انتقال گرما و تولید آنتروپی نانوسیالات در همرفت طبیعی در محفظه‌های متخلخل مستطیل شکل مورد



(الف) عدد نسلت میانگین



(ب) مقدار بیشینه تابع جریان



(ج) نرخ تولید آنتروپی کلی

شکل ۹- تأثیر متغیر لختی

بررسی قرار گرفت. بر پایه نتایج مطرح می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری کرد:

(الف) مدل داری، پیشگویی می‌کند که افزودن نانوذرات به آب از قدرت جریان همرفت طبیعی می‌کاهد و تبادل گرما و تولید آنتروپی در محفظه را کاهش می‌دهد. با این وجود، با

نیز یکنواخت‌تر شده است. مقایسه مقادیر بیشینه تابع جریان در شکل ۷ با نتایج مطرح در شکل ۳، مشخص می‌کند که حضور تبادل تابش، قدرت جریان را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد، به گونه‌ای که قدرت جریان همرفت طبیعی نانوسیال آب-مس از سایر نانوسیالات بیشتر است. تبادل تابش، همچنین میزان انتقال گرما را افزایش قابل توجهی داده است. جالب اینجا است که علیرغم این موارد، حضور انتقال گرمای تابشی، مقدار تولید آنتروپی کلی در محفظه را کم کرده است.

۶-۴ نقش اثرات غیرداری

نتایج ارائه شده تاکنون همگی بر پایه مدل داری بوده‌اند. در این بخش، نقش اثرات غیرداری، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. برای این منظور، محاسبات پیشین در رایلی ۱۰۰ برای آب خالص و نانوسیالات آب-مس، آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسید تیتانیوم در حضور اثرات غیرداری تکرار شده، نتایج بر حسب توزیع تابع جریان، دما و نرخ تولید آنتروپی در محفظه در شکل ۸ آورده شده‌اند. در این جا، متغیر لختی (G) در کلیه حالت‌ها برابر با 0.001 در نظر گرفته شده، نتایج مربوط به نانوسیالات متناظر با کسر حجمی 0.1 است. برای این که نقش اثرات داری آشکارتر شود، در این شکل، نتایج مدل داری نیز به صورت خط‌چین نمایش داده شده‌اند. نقش اثرات غیرداری بر توزیع خطوط جریان در محفظه روشن است. پیداست که اعمال این اثرات از قدرت جریان همرفت طبیعی کاسته، در نتیجه انتقال گرما و تولید آنتروپی را کم می‌کند. چنین کاهش قبلاً توسط سعید و پاپ [۱۱]، نیز گزارش شده است.

جالب اینجاست که با اعمال اثرات غیرداری، انتقال گرمای هر سه نانوسیال تحت بررسی، از انتقال گرمای آب بیشتر شده است. برای این که این اثر بهتر روشن شود، محاسبات برای گستره وسیعی از متغیر لختی تکرار شده، نتایج در شکل ۹ آورده شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که اگرچه در مسأله تحت بررسی، مدل داری انتقال گرمای نانوسیالات را کمتر از آب پیش‌بینی می‌کند، اما با پررنگ شدن اثرات غیرداری، این روند وارونه می‌شود.

- [7] Zahmatkesh I (2012) Second-law analysis of buoyancy-driven flow inside a rectangular porous enclosure with three adiabatic walls. *Majlesi J Energy Manage* 2: 15-22.
- [8] Zahmatkesh I (2013) Dependence of buoyancy-driven flow inside an oblique porous cavity on its orientation. *Emirates J Eng Res* 18: 53-61.
- [9] Kaluri RS, Basak T (2011) Entropy generation due to natural convection in discretely heated porous square cavities. *Energy* 36: 5065-5080.
- [10] Heidary H, Pirmohammadi M, Davoudi M (2012) Control of free convection and entropy generation in inclined porous media. *Heat Transfer Eng* 33: 565-573.
- [11] Saeid NH, Pop I (2005) Non-Darcy natural convection in a square cavity filled with a porous medium. *Fluid Dyn Res*, 36: 35-43.
- [12] Sigel R, Howell JR (1992) *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere, New York.
- [13] Brinkman HC (1952) The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chem Phys*, 20: 571-581.
- [14] Maxwell-Garnett JC (1904) Colours in metal glasses and in metallic films. *Philos Trans R Soc London, Ser A* 203: 385-420.
- [15] Hooman K, Gurgenci H (2007) Effects of viscous dissipation and boundary conditions on forced convection in a channel occupied by a saturated porous medium. *Transp Porous Media* 68: 301-319.
- [16] Al-Hadhrami AK, Elliott L, Ingham DB (2003) A new model for viscous dissipation in porous media across a range of permeability values. *Transp Porous Media* 53: 117-122.
- [17] Walker KL, Homsy GM (1978) Convection in a porous cavity. *J Fluid Mech* 87: 449-474.
- [18] Moya SL, Ramos E, Sen M (1987) Numerical study of natural convection in a tilted rectangular porous material. *Int J Heat Mass Transfer* 30: 741-756.
- [19] Saeid NH, Pop I (2004) Transient free convection in a square cavity filled with a porous medium. *Int J Heat Mass Transfer* 47: 1917-1924.
- [20] Badruddin IA, Zainal ZA, Narayana PAA, Seetharamu KN (2007) Numerical analysis of convection conduction and radiation using a non-equilibrium model in a square porous cavity. *Int J Therm Sci* 46: 20-29.
- [21] Putra N, Roetzel W, Das SK (2003) Natural convection of nano-fluids. *Heat Mass Transfer* 39: 775-784.
- پورنگ‌شدن اثرات غیرداریسی، عکس این روند مشاهده می‌شود.
- (ب) در میان نانوسیالات آب-مس، آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسید تیتانیوم، نانوسیال آب-مس بیشترین انتقال گرما و تولید آنتروپی را در پی دارد.
- (پ) افزایش عدد رایلی، کسر حجمی نانوذرات و نسبت منظری محفظه، انتقال گرما و تولید آنتروپی در محفظه را زیاد می‌کند.
- (ت) حضور تبادل تابش، توزیع تابع جریان، دما و نرخ تولید آنتروپی در محفظه را به طرز چشمگیری تحت تأثیر قرار می‌دهد که افزایش قابل توجه قدرت جریان و میزان تبادل گرما و کاهش شدید تولید آنتروپی را به دنبال دارد.
- (ث) در همرفت طبیعی نانوسیالات بررسی شده در این مقاله، حالت‌هایی با بیشترین تبادل گرما، همراه بیشترین تولید آنتروپی را نیز به دنبال داشته‌اند. این امر، ناشی از کوچک بودن مقدار نسبت توزیع برگشت‌ناپذیری است که سهم برگشت‌ناپذیری اصطکاکی را در تولید آنتروپی کلی ناچیز کرده است. بدین ترتیب، حالتی که همزمان از نظر قوانین اول و دوم ترمودینامیک بهینه باشد (تبادل گرمای زیاد و تولید آنتروپی کم)، محقق نشده است.

مراجع

- [1] Sun Q, Pop I (2011) Free convection in a triangle cavity filled with a porous medium saturated with nanofluids with flush mounted heater on the wall. *Int J Therm Sci* 50: 2141-2153.
- [2] Chamkha AJ, Ismael MA (2013) Conjugate heat transfer in a porous cavity filled with nanofluids and heated by a triangular thick wall. *Int J Therm Sci* 67: 135-151.
- [3] Bejan A (1996) *Entropy Generation Minimization*. CRC, Boca Raton.
- [4] Baytas AC (2000) Entropy generation for natural convection in an inclined porous cavity. *Int J Heat Mass Transfer* 43: 2089-2099.
- [5] Mahmud S, Fraser RA (2004) Magnetohydrodynamic free convection and entropy generation in a square porous cavity. *Int J Heat Mass Transfer* 47: 3245-3256.
- [6] Zahmatkesh I (2008) On the importance of thermal boundary conditions in heat transfer and entropy generation for natural convection inside a porous enclosure. *Int J Therm Sci* 47: 339-346.