

به کارگیری نانوسیال مس - آب به منظور بهبود عملکرد سامانه‌های خنک‌کننده با مکانیسم انتقال گرما جابه جایی آزاد

مجید سعیدی^{*,*}

گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مریم صفری پور

گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده: در مطالعه حاضر، انتقال گرما جابه جایی آزاد یک محفظه L- شکل پر شده با نانوسیال آب و مس، به منظور بررسی اثر مولفه‌های گوناگون مانند نسبت اندازه‌ای محفظه، کسر حجمی نانوذره‌های مس و عدد رایلی، بر ضریب انتقال گرما، توزیع دما و سرعت مورد مطالعه قرار گرفته است. معادله‌های حاکم بر جریان سیال، شامل معادله‌های پیوستگی، مومنتوم و انرژی با استفاده از روش حجم محدود حل شده‌اند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که در اعداد رایلی بالا، مکانیسم غالب در انتقال گرما، از رسانش به جابه جایی آزاد تغییر می‌کند و پیشینه ضریب انتقال گرما کاهش می‌یابد. در حالی که در اعداد رایلی پایین، سیال در بخش افقی محفظه، بدون حرکت است و مکانیسم غالب انتقال گرما، رسانش است. انتقال از هدایت به جابه جایی آزاد در اعداد رایلی در گستره 10^5 تا 10^6 رخ می‌دهد. همچنین حضور نانوذره‌های مس برای تمامی مقادیر عدد رایلی، منجر به افزایش ضریب انتقال گرما می‌شود. افزون بر این نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی بیانگر از آن است که قرارگیری تعدادی پره در محفظه، ضریب انتقال گرما را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. نتیجه‌ها نشان داد افزودن سه پره در ساختار محفظه در شرایط اندازه‌ای 10^4 ، کسر حجمی نانوذره $0/1$ و عدد رایلی 10^6 ، ضریب انتقال گرما را از $984/3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ به $1093/8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: جابه جایی آزاد، محفظه L- شکل، نانوسیال، انتقال گرما

KEYWORDS: Free convection, L-shape enclosure, Nanofluids, Heat transfer

مقدمه

توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۱،۲]. دستگاه‌های الکترونیکی حساس از قبیل واحدهای پردازش مرکزی یا

در طول چند دهه اخیر، جستجو و یافتن شیوه‌های نوین برای افزایش عملکرد دستگاه‌های خنک‌کننده، به منظور دفع گرما اضافی،

*Email: majid.saidi@khayam.ut.ac.ir, majid.saidi@ut.ac.ir

*عهده‌دار مکاتبات

مخلوط را افزایش داده و سبب بهبود قابلیت انتقال گرما می‌شوند [۱۲]. تاکنون مطالعه‌های زیادی با هدف بررسی سازوکارهای افزایش نرخ هدایت گرمایی نانوسیال‌ها انجام گرفته است. دیناروند و همکاران^۵ جابه‌جایی آزاد سه نوع گوناگون نانوسیال بر پایه آب و افزودن نانوذره‌های مس، اکسید آلومینیوم و دی‌اکسید تیتانیوم، حول یک مخروط دوار رو به پایین، با استفاده از مدل نانوسیال تیواری-داس^۶، مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌های به‌دست آمده نشان داد که انتخاب آلومینا و مس به عنوان نانوذره‌ها، منجر به مقادیر کمی‌تر و بیش‌تری از ضریب اصطکاک سطحی می‌شود. علاوه بر این، نانوذره‌های مس و تیتانیوم دی‌اکسید، به ترتیب دارای بزرگ‌ترین و کم‌ترین اعداد ناسلت^۷ موضعی هستند [۱۴]. کسایپور و همکاران^۸، هدایت مخلوطی از نانوسیال مس و آب را در یک محفظه T-شکل، در اثر میدان مغناطیسی یکنواخت به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها دریافته‌اند که در مقادیر پایین عدد رینولدز^۹، عدد ناسلت متوسط، همانند عدد هارتمن^{۱۰} کمی افزایش می‌یابد؛ با این حال در مقادیر بالاتر عدد رینولدز، میزان افزایش عدد ناسلت متوسط بیشتر قابل توجه است [۱۵]. در سال‌های اخیر، مکانیسم و کاربرد انتقال گرما جابه‌جایی آزاد در محفظه‌های نسبتاً گرم و در شرایط گوناگون، به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. بایری^{۱۱} [۱۶] به بررسی افزایش میزان انتقال گرما جابه‌جایی آزاد در یک محفظه نیم کره‌ای مورب، با استفاده از مواد متخلخل اشباع شده با نانوسیال آب-روی اکسید^{۱۲} پرداخت. عدد ناسلت متوسط برای بسیاری از ترکیب‌ها، با تغییر مولفه‌های فیزیکی گوناگون، از جمله کسر حجمی نانوسیال، میزان برق تولید شده توسط دیسک، هدایت گرمایی محیط متخلخل و تمایل دیسک نسبت به میدان گرانشی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه‌ها به روشنی نشان داد که محیط متخلخل اشباع شده با نانوسیال، سبب افزایش انتقال گرما جابه‌جایی آزاد می‌شود. با مروری بر مطالعه‌های انجام گرفته توسط سایر پژوهشگران پیرامون سازوکار افزایش انتقال گرما در نانوسیال‌ها، می‌توان دریافت که نانوسیال نسبت به مایع خالص، کارایی بیشتری در انتقال گرما دارد و با افزایش کسر حجمی نانوذره، میزان انتقال گرما افزایش می‌یابد [۱۷، ۱۸]. علاوه بر این، اندازه و موقعیت منبع گرمایی [۲۰-۱۷]، نوع نانوذره‌ها [۲۱، ۱۸، ۱۷]

Central Processing Unit که به اختصار CPUs نامیده می‌شود، به صورت گسترده، در سامانه‌هایی که نرخ انتقال گرما آن‌ها کم است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سهولت در انتقال موثر گرما به منظور حفظ درجه گرما مشخص در دستگاه و دفع گرمای اضافی، امری مهم در توسعه سامانه‌های خنک‌کننده است؛ زیرا به‌کارگیری سامانه‌های خنک‌کننده نامناسب تأثیر منفی بر عملکرد دستگاه می‌گذارد. تاکنون الگوهای توسعه یافته گوناگونی از جمله میکروکانال^۱، پاشش جت^۲ و جریان سیال در محیط متخلخل^۳ برای خنک کردن سامانه‌های با دمای بالا پیشنهاد شده است. در این میان، یکی از فرایندهای شناخته شده برای دفع مقادیر بالای گرما در سامانه‌های خنک‌کننده الکتریکی، استفاده از میکروکانال خنک‌کننده آب است [۳-۵]. از دیگر فرایندها، پاشش جت است که به صورت گسترده‌ای برای خنک کردن دستگاه‌های الکترونیکی، پره‌های توربین گاز، گرم کردن، سرد کردن یا خشک نمودن خمیر کاغذ و منسوجات به کار گرفته می‌شود [۶]. از جمله برتری‌های آن مقاومت گرمایی کم، انتقال گرما مستقیم و دمای به‌نسبت یکنواخت سطح است. از معایب این روش نیز می‌توان به قدرت پمپاژ بالا و فرسایش سطوح به علت سرعت بالا اشاره کرد [۸، ۹]. روش جریان سیال تک‌فازی و دوفازی در بستر متخلخل نیز، با توجه به سطح بزرگ آن گزینه دلخواهی است؛ اما مشکل اصلی این فرایند، نیاز آن به قدرت پمپاژ بالا است [۱۰]. به منظور غلبه بر مسائل مربوط به قدرت پمپاژ و هدایت گرمایی پایین خنک‌کننده، همرفت طبیعی در محفظه‌های پر شده از نانوسیال‌ها^۴، به عنوان فناوری نوین و جایگزینی مناسب برای خنک‌سازی در شارهای گرمایی بالا (به عنوان مثال، شار گرمای موضعی در واحدهای پردازش مرکزی بیش از 400 W/cm^2 می‌باشد [۱۱])، مورد مطالعه قرار گرفته است.

افزایش انتقال گرما با استفاده از نانوسیال‌ها به ویژگی‌های فیزیکی نانوذره‌ها، مانند شکل، اندازه، غلظت و همچنین ویژگی‌های گرمایی آن‌ها بستگی دارد. پژوهشگران گزارش‌های متعددی در ارتباط با استفاده از غلظت کم نانوذره‌ها (به عنوان مثال ۵-۱ درصد حجمی) و افزایش هدایت گرمایی تا میزان ۲۰٪، ارائه کرده‌اند [۱۳، ۱۲]. در این میان، نانوذره‌های مس جزء شناخته‌شده‌ترین نانوذره‌ها به کار برده شده در نانوسیال‌ها هستند که به طور چشمگیری هدایت گرمایی

(۱) Micro-channel
(۳) Porous media flow
(۵) Dinarvand et al
(۷) Nusselt number
(۹) Reynolds number
(۱۱) Bairi

(۲) Jet impingement
(۴) Nanofluids
(۶) Tiwari-Das
(۸) Kasaeipoor et al
(۱۰) Hartmann number
(۱۲) ZnO

جدول ۱- ویژگی‌های ترموفیزیکی سیال پایه و مس در دمای ۲۰ °C، همراه با معادله‌های مورد مطالعه در بررسی این نانوسیال

واحد کمیت	مایع (آب) [۲۵]	جامد (مس) [۲۵]	نانوسیال
$J kg^{-1} K^{-1}$	۴۱۷۹	۳۸۵	$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s$
$kg m^{-3}$	۹۹۷/۱	۸۹۳۳	$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s$
$W m^{-1} K^{-1}$	۰/۶۱۳	۴۰۰	$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f) - 2\varphi(k_f - k_s)}{(k_s + 2k_f) + \varphi(k_f - k_s)} \right]$
K^{-1}	21×10^{-5}	$1/5 \times 10^{-5}$	$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_s$
$m^2 s^{-1}$	$1/471 \times 10^{-7}$	$1/16 \times 10^{-4}$	$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}}$
Pa.s	$1/0005 \times 10^{-3}$	-	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}$

تعدادی پره، به منظور مطالعه بر روی میزان انتقال گرما تغییر یافت. اختلاف دما بین دو سطح منجر به حرکت سیال در درون محفظه از صفحه گرم به سمت صفحه سرد، در تأثیر نیروی شناوری خواهد شد. دمای $T_c = 20^\circ C$ به عنوان دمای محیط و دمای $T_h = 120^\circ C$ به عنوان دمای یک قطعه الکتریکی گرم مانند CPU رایانه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است در این مطالعه از نرم افزار Comsol استفاده شده است و نتیجه‌های این پژوهش می‌تواند در طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های خنک‌کننده الکترونیکی به کار گرفته شود.

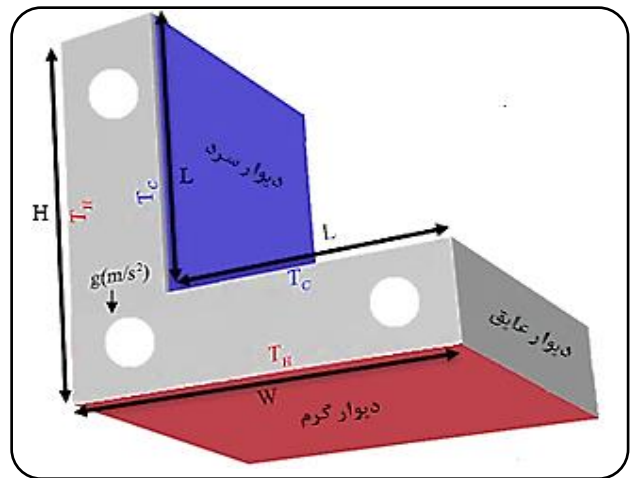
بخش نظری

طرح مسئله

در شکل ۱، هندسه محفظه مورد مطالعه نشان داده شده است. اندازه حفره عمود بر صفحه، با فرض طولانی بودن، دو بعدی در نظر گرفته شده است و در این مورد ارتفاع و عرض با یکدیگر برابر هستند. سطح محفظه در تماس با منبع گرمایی در دمای ثابت $T_h = 120^\circ C$ و سطح دیگر در تماس با محیطی با دمای $T_c = 20^\circ C$ قرار گرفته است. باقی سطوح، عایق و غیر قابل نفوذ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین نسبت اندازه‌های محفظه (AR) به صورت معادله (۱) تعریف شده است:

$$AR = \frac{L}{H} \quad (1)$$

فضای داخلی محفظه L- شکل با نانوسیال آب و نانوذره‌های یکنواخت و کروی شکل مس با قطر 100 nm پر شده است. ویژگی‌های ترموفیزیکی آب به عنوان سیال پایه و همچنین نانوذره‌های مس همراه با برخی از معادله‌های مورد مطالعه در بررسی این نانوسیال، از جمله محاسبه چگالی موثر، در جدول (۱)



شکل ۱- محفظه L- شکل

و ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوسیال‌ها مانند گرانیوی دینامیکی موثر، هدایت گرمایی و ضریب انبساط گرمایی از مهم‌ترین مولفه‌ها در میزان انتقال گرما می‌باشند [۲۲-۲۴].

با وجود مطالعه‌های فراوان انجام گرفته پیرامون انتقال گرما جابه جایی آزاد در محفظه‌های پر شده با نانوسیال، فقدان محسوس داده‌ها و اطلاعات در مورد شرایط بهینه و میزان انتقال گرما وجود دارد. مطالعه حاضر به بررسی اثر مولفه‌های گوناگون عملیاتی و طراحی مانند عدد رایلی^۳، هندسه و کسر حجمی نانوذره‌های مس، بر روی ویژگی‌های جابه جایی آزاد درون محفظه L- شکل پر شده با نانوسیال می‌پردازد. دلیل انتخاب این نوع هندسه (محفظه L- شکل)، بررسی همزمان مکانیسم‌های انتقال گرما در محفظه‌های افقی و عمودی می‌باشد. همچنین با استفاده از این هندسه، امکان بررسی جریان سیال در تأثیر نیروهای شناوری فراهم می‌شود. افزون بر این، هندسه محفظه با نصب

(۱) Maxwell equation

(۳) Rayleigh number

(۲) Brinkman correlation

جدول ۲- معادله‌های حاکم بر پیوستگی، مومنتوم و انرژی

شرایط مرزی	معادله‌های حاکم	
دیواره گرم: $U=V=0$	با بعد	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$
	بدون بعد	$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$
دیواره سرد: $U=V=0$	با بعد	$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} g(T - T_c) \cos\omega$
	بدون بعد	$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} RaPr\theta \cos\omega$
	با بعد	$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} g(T - T_c) \sin\omega$
	بدون بعد	$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} RaPr\theta \sin\omega$
دیواره عایق: $U=V=0$	با بعد	$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$
	بدون بعد	$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right)$

$Y = \frac{y}{L}$ (۴)

$U = \frac{uL}{\alpha_f}$ (۵)

$V = \frac{vL}{\alpha_f}$ (۶)

$P = \frac{\bar{\rho}L^2}{\rho_{nf}\alpha_f^2}$ (۷)

$\theta = \frac{T-T_c}{\Delta T}$ (۸)

عدد رایلی، پرنتل^۳ و ناسلت نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند [۳۰]:

$Ra = \frac{g\beta_f L^3 \Delta T}{\nu_f \alpha_f}$ (۹)

$Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}$ (۱۰)

$Nu_l = \frac{hH}{k_f}$ (۱۱)

از اصطکاک بین دیواره‌ها و نانوسیال صرف نظر شده است. همچنین شرایط مرزی در نظر گرفته برای حل معادله‌ها، در جدول (۲) بیان شده است. برای دیواره‌های گرم $T = T_h$ ، برای دیواره‌های سرد $T = T_c$ و برای دیواره‌های عایق $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ می‌باشد. ضریب انتقال گرما جابه جایی و هدایت گرمایی از روش معادله‌های زیر قابل محاسبه است [۱۶]:

$h = \frac{q_w}{T_h - T_c}$ (۱۲)

گزارش شده است. این پژوهش با فرض جریان آرام، سیال تراکم‌ناپذیر و نیوتنی انجام گرفته است. همچنین فرض شده است که میان نانوذره‌های و مولکول‌های سیال پایه، هیچ‌گونه لغزشی وجود ندارد و در تعادل گرمایی با یکدیگر هستند. در این پژوهش، تقریب بوسینسک^۱ اعمال شده است و اثر اندازه‌های متفاوت محفظه (AR)، تعداد پره، کسر حجمی نانوذره‌ها (ϕ) و عدد رایلی (Ra) بر میزان انتقال گرما با مکانیسم جابه جایی آزاد مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل‌سازی ریاضی

برای ساده‌سازی در مدل‌سازی ریاضی فرایند، فرضیه‌های ساده شونده شامل حالت پایا، تقریب بوسینسک، عدم اتلاف لزجتی، نبود تابش و جریان آرام دو بعدی ($Ra < 10^9$) در نظر گرفته شد. معادله‌های پیوستگی، مومنتوم و انرژی در جدول ۲ ارایه شده‌اند [۱۶]. وابستگی چگالی نانوسیال به دما، بر اساس بسط تیلور^۲، دور درجه گرما در نظر گرفته شده است [۲۹]:

$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$ (۲)

به منظور بی‌بعد سازی معادله‌های ارایه شده در جدول (۲)، از مولفه‌های بدون بعد زیر استفاده شده است:

$X = \frac{x}{L}$ (۳)

(۱) Boussinesq approximation

(۲) Taylor

(۳) Prandtl numbers

جمله‌های نفوذی در معادله‌های حاکم بر اساس روش گسسته‌سازی مرکزی و عبارات جابه جایی به صورت مرتبه دو پیشرو، تخمین زده شدند. بیشترین میزان خطای قابل قبول در این پژوهش 10^{-6} در نظر گرفته شد.

$$\text{خطا} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m |\phi^{k+1} - \phi^k|}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m |\phi^{k+1}|} < 10^{-6} \quad (18)$$

در معادله (۱۸)، مولفه‌های k ، m و n به ترتیب برابر با مرتبه تکرار و تعداد نقاط شبکه در جهت x و y می‌باشند.

به منظور تعیین مناسب‌ترین اندازه شبکه که منجر به مستقل بودن نتیجه‌ها از شبکه می‌شود، عدد ناسلت با اندازه متفاوت شبکه محاسبه شد. جدول ۳ نتیجه‌ها را به ازای $AR = 0.4$ ، $\phi = 0.06$ و عدد رایلی برابر با 10^5 ، نشان می‌دهد. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده، دیده می‌شود که شبکه‌ای با تعداد سلول 80×80 ، شبکه‌ای بهینه و مناسب برای حل بوده و شبکه‌بندی ریزتر، تغییر محسوسی در عدد ناسلت میانگین ایجاد نمی‌کند. بنابراین شبکه 80×80 برای ادامه محاسبه‌ها انتخاب شد.

به منظور ارزیابی حل عددی و اطمینان از صحت عملکرد مدل پیشنهادی، تغییرهای عدد ناسلت متوسط برای محفظه‌ای با $AR = 0.25$ و به ازای مقادیر گوناگون عدد رایلی محاسبه شده و با نتیجه‌های تسنیم و محمود [۳۲] و محمودی [۳۰] مقایسه شد. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، نتیجه‌های به دست آمده از مدل عددی پژوهش حاضر با داده‌های دو مرجع مذکور مطابقت دارد؛ که نشان‌دهنده صحت عملکرد مدل پیشنهادی می‌باشد. نتیجه‌های به دست آمده از محفظه L- شکل پر شده از نانوسیال آب و مس با $AR = 0.4$ و $\phi = 0.06$ نشان می‌دهند که مدل کنونی می‌تواند برای پیش‌بینی سرعت انتقال گرما در محفظه L- شکل مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌ها و بحث

به منظور بررسی سرعت انتقال گرما، اثر مولفه‌های گوناگون، در یک گستره‌ی مشخص، از جمله نسبت اندازه محفظه L- شکل (AR)، کسر حجمی نانوذره‌های مس (ϕ) و عدد رایلی (Ra)، بر ضریب انتقال گرما، توزیع دما و سرعت مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین تأثیر اصلاح ساختار محفظه با افزودن پره، بر ضریب انتقال گرما مطالعه شد.

جدول ۳- عدد ناسلت متوسط روی دیواره‌های گرم برای نانوسیال آب و مس به ازای $AR = 0.4$ ، $Ra = 10^5$ و $\phi = 0.06$

اندازه شبکه	20×20	40×40	60×60	80×80	100×100
عدد ناسلت متوسط	۴/۶۵۹۸	۴/۶۶۲۱	۴/۶۷۳۴	۴/۶۸۵۷	۴/۶۸۶۱

$$k_{nf} = -\frac{q_w}{\frac{\partial T}{\partial X}} \quad \text{دیواره‌های عمودی:} \quad (13)$$

$$k_{nf} = -\frac{q_w}{\frac{\partial T}{\partial Y}} \quad \text{دیواره‌های افقی:} \quad (14)$$

با جای‌گذاری معادله‌های (۱۲) تا (۱۴) در معادله (۱۱)، عدد ناسلت موضعی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Nu_l = -\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right) \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (15)$$

$$Nu_l = -\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right) \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (16)$$

عدد ناسلت متوسط از روش انتگرال‌گیری عدد ناسلت موضعی، در امتداد دیوار گرم محاسبه می‌شود:

$$Nu = \frac{1}{2} \left(\int_0^1 Nu_l dX \Big|_{Y=0} + \int_0^1 Nu_l dY \Big|_{X=0} \right) \quad (17)$$

محفظة L- شکل اصلاح شده

یکی از عامل‌های تأثیرگذار در افزایش نرخ انتقال گرما، ایجاد تغییرهای ساختاری در محفظه L- شکل است. در مطالعه حاضر، به منظور افزایش نرخ انتقال گرما و اصلاح رژیم جریان، محفظه L- شکل با قرار دادن تعدادی پره استوانه‌ای (۲ و ۳ پره) اصلاح شد. چگونگی قرارگیری پره‌ها در داخل محفظه به صورت عمود بر دیواره‌های جانبی و در تماس مستقیم با نانوسیال است.

روش عددی و اعتبار سنجی

در این پژوهش، برای حل معادله‌های حاکم بر جریان سیال که شامل معادله‌های پیوستگی، مومنتوم و انرژی هستند، از روش‌های عددی مبتنی بر روش حجم محدود استفاده شد [۳۱]. همچنین ارتباط میدان فشار و سرعت در معادله مومنتوم، با الگوریتم سیمپلر بیان شد. با توجه به این که معادله‌های حاکم غیرخطی بودند، روش بالا تخفیف متوالی^۱، برای حل معادله‌ها استفاده شد. همه محاسبه‌ها با استفاده از پردازنده مرکزی دو هسته‌ای با قدرت ۲/۵۳ گیگا هرتز^۲ انجام شده و زمان پردازنده برای هر شبیه‌سازی حدود ۲۰ ثانیه بود.

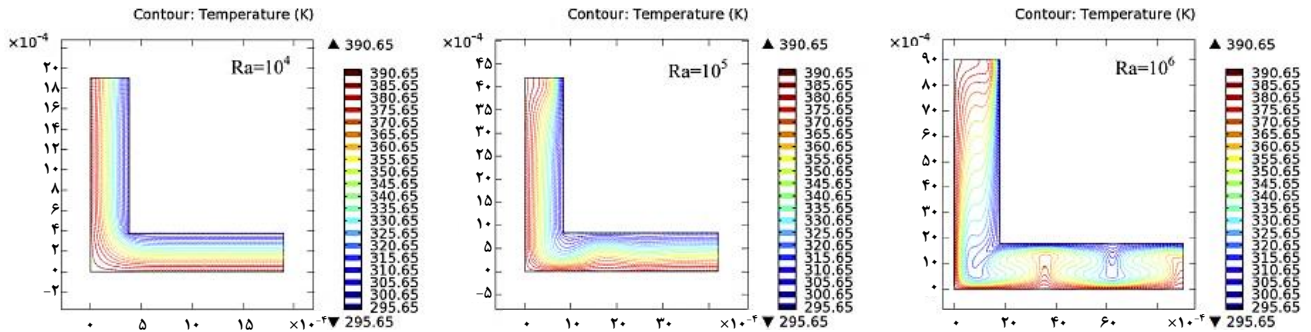
(۱) SIMPLER algorithm

(۳) Core Duo CPU 2.53 GHz system

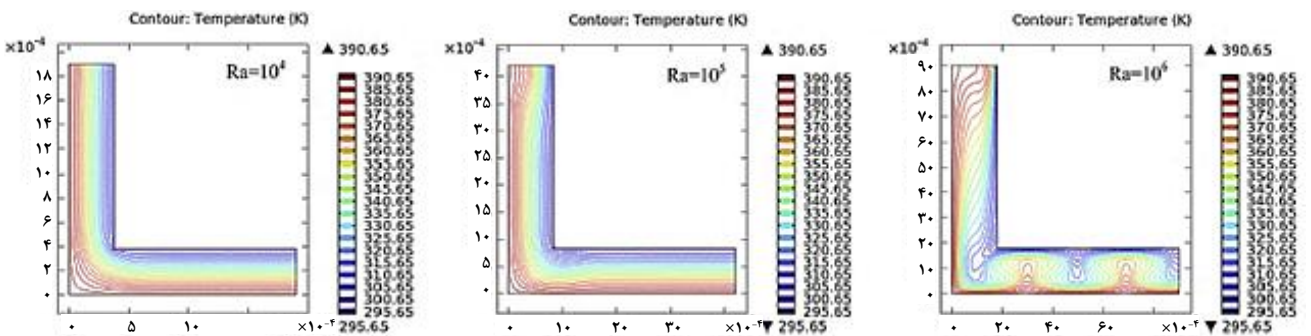
(۲) Successive over-under relaxation method

جدول ۴- مقایسه نتیجه‌های پژوهش حاضر با داده‌های گزارش شده در مراجع [۳۰، ۳۲]

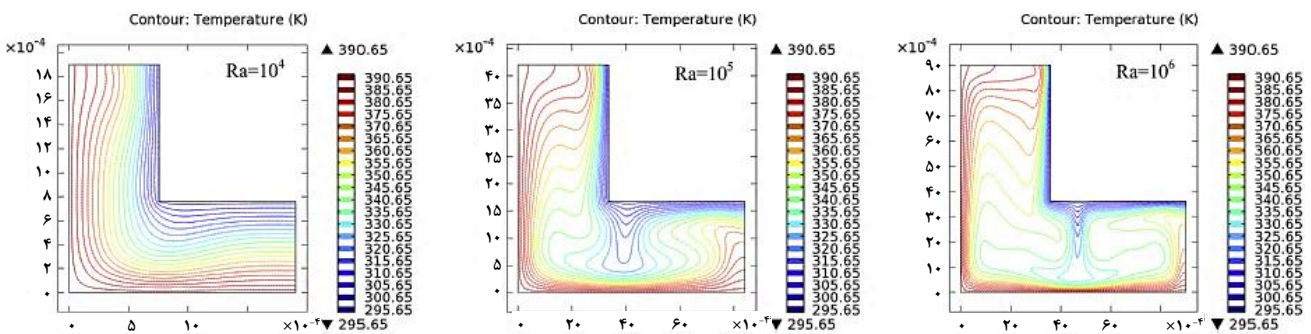
انحراف	محفظه L- شکل پر شده از نانوسیال آب و مس (AR = ۰/۴ و $\phi = ۰/۰۶$)			محفظه L- شکل پر شده از هوا (AR = ۰/۲۵)		
	Nu پژوهش حاضر	[Nu] [۳۰]	Nu پژوهش حاضر	[Nu] [۳۰]	[Nu] [۳۲]	
۱/۹ %	۲/۲۴۱	۲/۲۸۴	۳/۲۶۱	۳/۲۵۹	۳/۲۵۵	$Ra = 10^4$
۱/۴ %	۴/۶۸۶	۴/۶۱۹	۳/۹۱۰	۳/۸۵۵	۳/۹۰۳	$Ra = 10^5$
۳/۰ %	۸/۰۰۷	۷/۷۶۴	۹/۲۲۷	۹/۳۴۰	۹/۳۳۱	$Ra = 10^6$



شکل ۲- اثر عدد رایلی بر توزیع خطوط هم دما در محفظه L- شکل؛ $AR = ۰/۲$ و $\phi = ۰$



شکل ۳- اثر عدد رایلی بر توزیع خطوط هم دما در محفظه L- شکل؛ $AR = ۰/۵$ و $\phi = ۰$

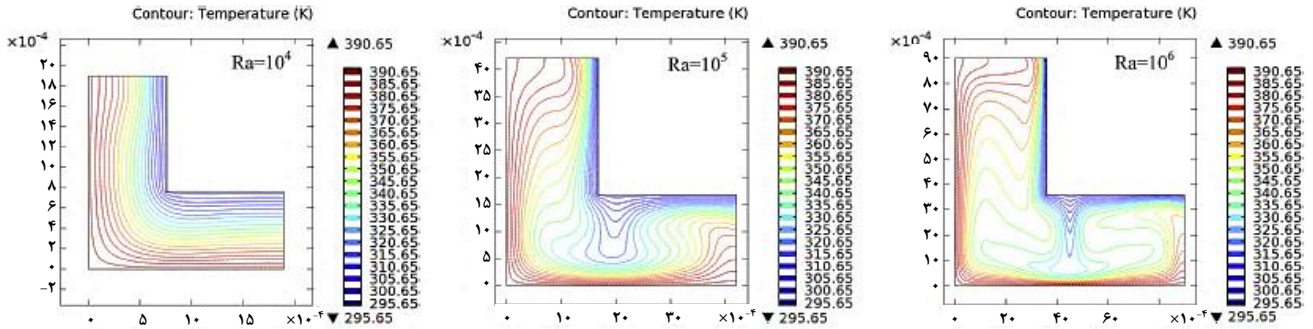


شکل ۴- اثر عدد رایلی بر توزیع خطوط هم دما در محفظه L- شکل؛ $AR = ۰/۴$ و $\phi = ۰$

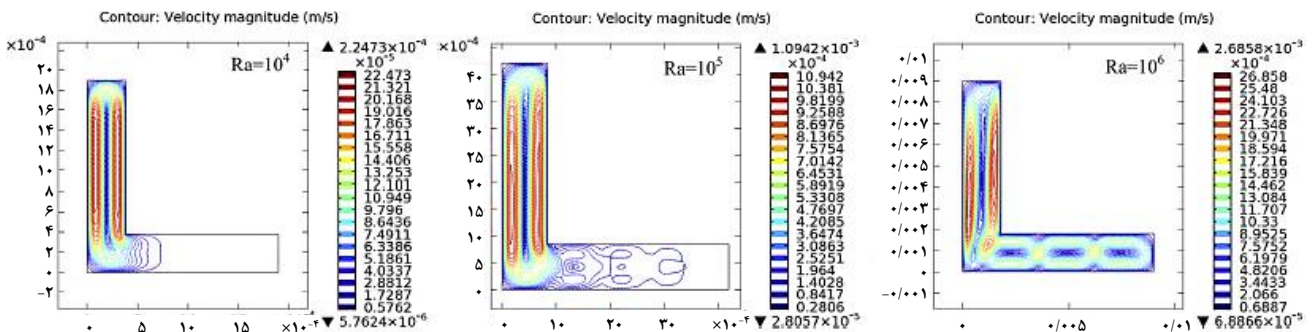
شکل‌های ۲ و ۳ هنگامی که نسبت اندازه‌ها برابر با ۰/۲ است، خطوط هم‌دما در محفظه L- شکل در مقدارهای کم اعداد رایلی مانند 10^4 به صورت موازی با دیواره‌های گرم و سرد هستند. این پدیده بدان معناست که در اعداد رایلی پایین، رسانش، مکانیسم اصلی انتقال گرما است.

تأثیر عدد رایلی، نسبت ابعاد محفظه و کسر حجمی نانوذره‌ها بر جابه جایی آزاد

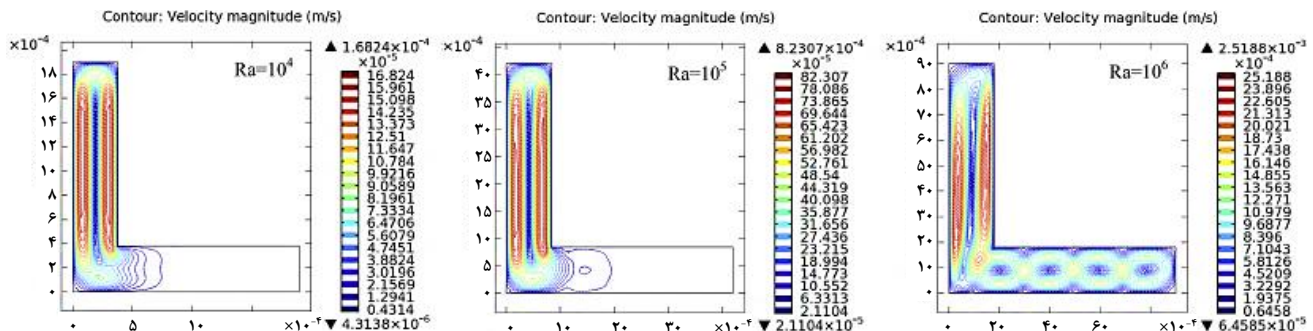
شکل‌های ۲ تا ۵ خط‌های هم‌دما مربوط به نانوسیال مس-آب به ازای مقدارهای گوناگون اعداد رایلی را نشان می‌دهد. با توجه به



شکل ۵- اثر عدد رایلی بر توزیع خطوط هم دما در محفظه L- شکل؛ $AR = 1/4$ و $\phi = 0/1$



شکل ۶- اثر عدد رایلی بر توزیع سرعت در محفظه L- شکل با $AR = 1/2$ و $\phi = 0$

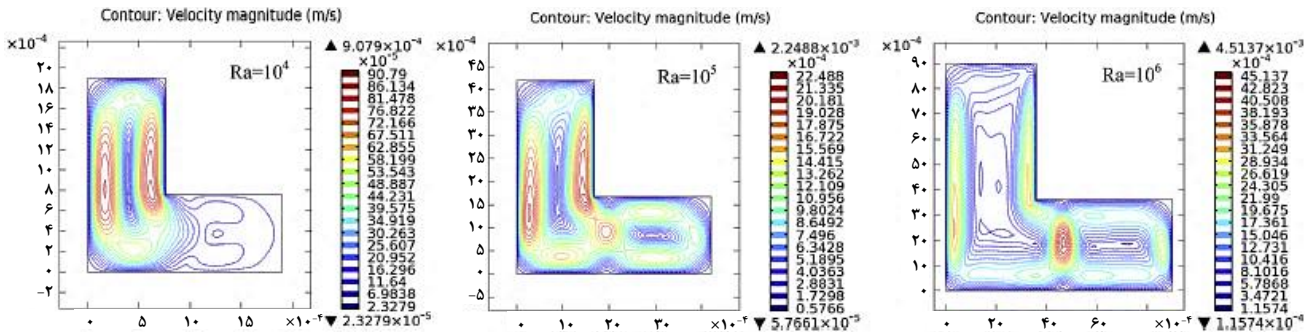


شکل ۷- اثر عدد رایلی بر توزیع سرعت در محفظه L- شکل با $AR = 1/2$ و $\phi = 1/1$

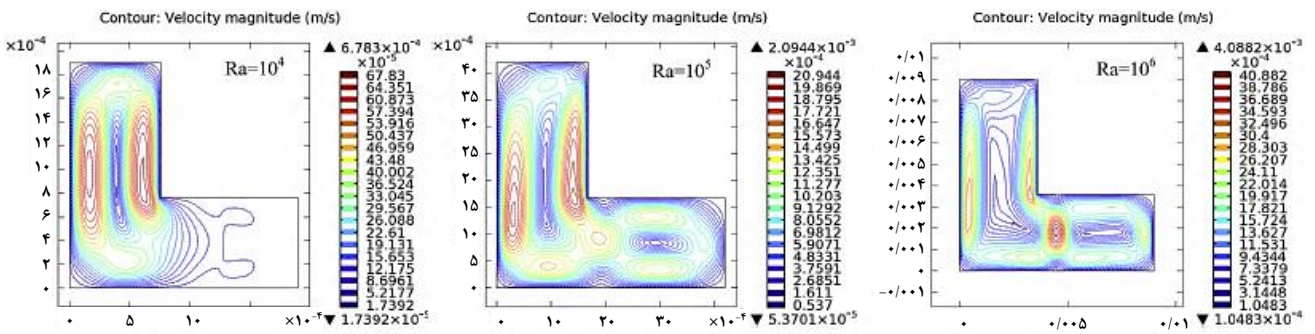
مقدار عدد رایلی، تعداد جریان‌های گردابی تشکیل شده افزایش یافته است. افزون بر این، هر چه عدد رایلی بیش‌تر شود، قدرت گردابه‌های چرخشی بیشتر شده و تغییرهای نرخ انتقال گرما موضعی افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه توزیع سرعت در عددهای رایلی گوناگون نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی و تقویت نیروهای غوطه‌وری، اندازه سرعت افزایش می‌یابد. افزودن نانوذره‌ها به آب خالص در گام نخست سبب افزایش گرانروی و هدایت گرمایی موثر سیال می‌شود و این امر سرانجام بر جریان و توزیع دما موثر است. در انتقال گرما جابه‌جایی آزاد، اختلاف دما سبب ایجاد اختلاف چگالی و در نتیجه حرکت سیال می‌شود که در بحث حرکت سیال،

با افزایش عدد رایلی از 10^5 تا 10^6 ، خطوط هم‌دما از حالت خطی خارج شده و آشفتگی جریان به‌طور کامل مشهود است همچنین تراکم خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره‌ها در اعداد رایلی 10^6 ، نشان دهنده افزایش گرداب‌ها و محدود شدن انتقال گرما به ناحیه نازک مجاور به دیواره است. علت این امر را می‌توان به علت تبدیل مکانیسم انتقال گرما از رسانش به جابه‌جایی آزاد دانست. این رفتار در شکل‌های ۴ و ۵ با توجه به تغییر اندازه‌ها به $1/4$ نیز قابل مشاهده است.

مطابق با شکل‌های ۶ تا ۹ جریان گردابه‌ای به هنگام حرکت مایع گرم در جهت بالا و به سمت دیواره سرد ایجاد می‌شود و جریان در بخش افقی محفظه، تقریباً راکد است. شایان ذکر است با افزایش



شکل ۸- اثر عدد رایلی بر توزیع سرعت در محفظه L- شکل با $AR = 0/4$ و $\phi = 0$



شکل ۹- اثر عدد رایلی بر توزیع سرعت در محفظه L- شکل با $AR = 0/4$ و $\phi = 0/1$

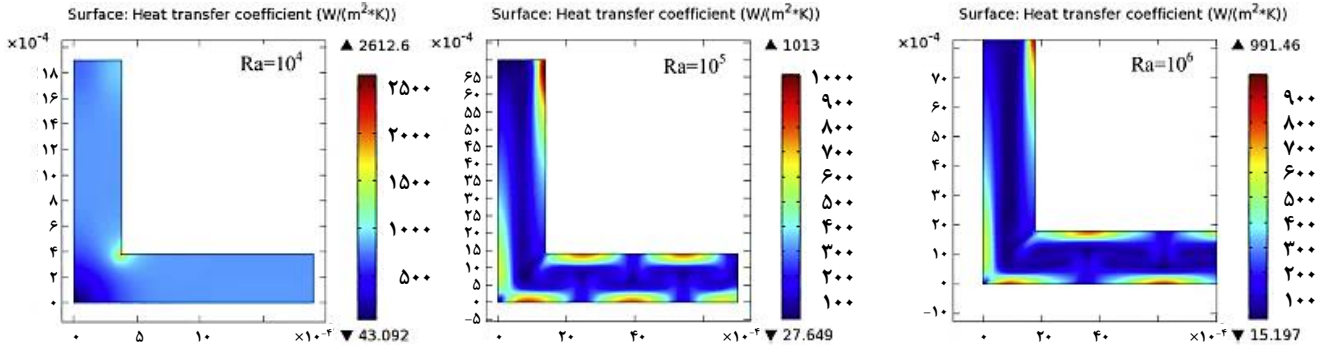
مقدارهای عدد رایلی، ضریب انتقال گرما با افزایش کسر حجمی نانوذره‌های مس، افزایش یافته است و در یک ϕ ثابت، بیشترین ضریب انتقال گرما در مقدارهای کمتر عدد رایلی، بیشتر است. برای مثال در محفظه‌ای با $AR = 0/2$ و $\phi = 0/1$ ، بیشترین ضریب انتقال گرما برای اعداد رایلی 10^4 و 10^5 به ترتیب $1052/1$ ، $1059/8$ و $3384/4$ W/m²K به دست آمد. تفاوت در عددهای رایلی بالا (به طور مثال تفاوت میان $Ra = 10^5$ و $Ra = 10^6$) ناچیز است. شایان ذکر است این نتیجه همسو با نتیجه‌های پژوهش *امین الساداتی و قاسمی* در ارتباط با افزایش نرخ انتقال گرما در یک محفظه مربعی شکل، به دلیل افزودن نانوذره‌ها به آب خالص در اعداد رایلی پایین است [۳۳].

اثر نسبت اندازه بر میزان انتقال گرما امری مشهود است. مقایسه نسبت اندازه‌های گوناگون نشان می‌دهد که ضریب انتقال گرما در $AR = 0/4$ ، به دلیل گردش بیشتر، نسبت به $AR = 0/2$ بیشتر است. همچنین در اعداد رایلی پایین، منطقه راکد در بخش افقی محفظه با $AR = 0/4$ ، نسبت به $AR = 0/2$ کوچک‌تر است. بنابراین سرعت انتقال گرما بالاتر در نسبت بزرگ‌تری از اندازه‌ها، به دست می‌آید.

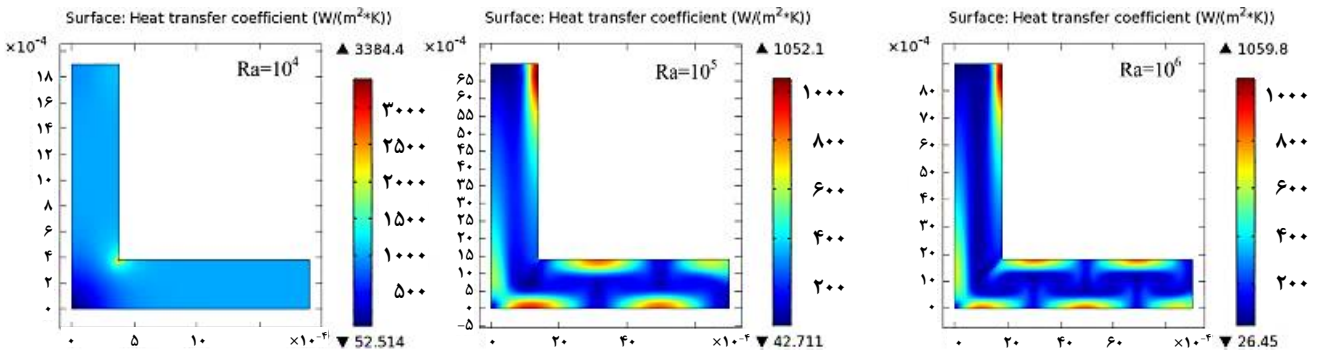
ضریب افزایش انتقال گرما

به منظور تخمین میزان بهبود عملکرد در سامانه‌های خنک‌کننده

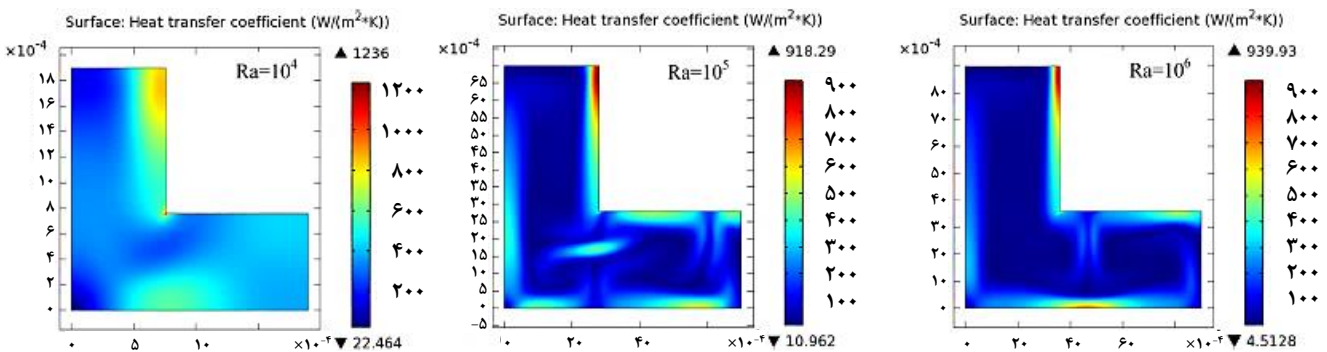
گرانروی عامل تعیین‌کننده‌ای بوده و روشن است در صورت وجود یک نیروی محرکه‌ی ثابت مانند اختلاف چگالی محدود در اثر اختلاف دما، با افزایش گرانروی سیال، سرعت حرکت سیال کمتر خواهد شد. کاهش سرعت سیال نیز سبب کاهش سازوکار انتقال گرما در اثر انتقال جرم می‌شود. با توجه شکل‌های ۵ تا ۹ دیده می‌شود که با افزایش کسر حجمی نانوذره‌های جامد، چگالی و گرانروی نانوسیال افزایش و سرعت کاهش می‌یابد. اگرچه k_{eff} با کسر حجمی نانوذره جامد افزایش می‌یابد، لیکن اثر شناوری کاهش خواهد یافت که این امر منجر به کاهش انتقال گرما با مکانیسم جابه جایی خواهد شد. همچنین افزایش کسر حجمی نانو ذره منجر به ناپایداری نانوسیال خواهد شد. در مقدارهای ثابتی از عدد رایلی، با افزایش کسر حجمی نانوذره‌ها، جریان گردابی کاهش می‌یابد. از سویی دیگر، در یک کسر حجمی ثابت، با افزایش عدد رایلی، میزان چرخش افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که روند همانندی برای توزیع سرعت و خطوط هم‌دما در مقدارهای گوناگون کسر حجمی نانوذره جامد، نسبت اندازه و اعداد رایلی، توسط محمودی [۳۰] گزارش شده است. هدف اصلی از به کارگیری نانوسیال‌ها در سامانه‌های جابه جایی آزاد، افزایش سرعت انتقال گرما است. با توجه به ضریب‌های انتقال گرما موضعی ارایه شده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳، برای تمامی



شکل ۱۰- اثر عدد رایلی بر ضریب انتقال گرما در محفظه L- شکل با $AR = +/۲$ و $\phi = +$



شکل ۱۱- اثر عدد رایلی بر ضریب انتقال گرما در محفظه L- شکل با $AR = +/۲$ و $\phi = +/۱$



شکل ۱۲- اثر عدد رایلی بر ضریب انتقال گرما در محفظه L- شکل با $AR = +/۴$ و $\phi = +$

منجر به بهبود عملکرد سامانه خنک کننده می شود به طوری که در عدد رایلی ۱۰۰۰، افزایش ۵/۰٪ نانوذره مس منجر به افزایش ۲۱/۶٪ انتقال گرما خواهد شد. این نتیجه در تایید نتیجه های پژوهشی بسیاری از پژوهشگران از جمله، چامخا و همکاران^۱ است که بر اساس آن افزودن نانوذره ها با کسر حجمی کم (۱٪ تا ۵٪) سبب افزایش ضریب هدایت گرمایی نانوسیال تا حدود ۲۰٪ می شود [۳۴]. همچنین، همان گونه که در قسمت پیش اشاره شد، افزایش عدد رایلی اثر منفی بر انتقال گرما خواهد داشت.

با مکانیسم جابه جایی آزاد با استفاده از نانوسیال آب و مس نسبت به آب خالص، ضریب افزایش انتقال گرما به صورت زیر تعریف می شود [۱۶]:

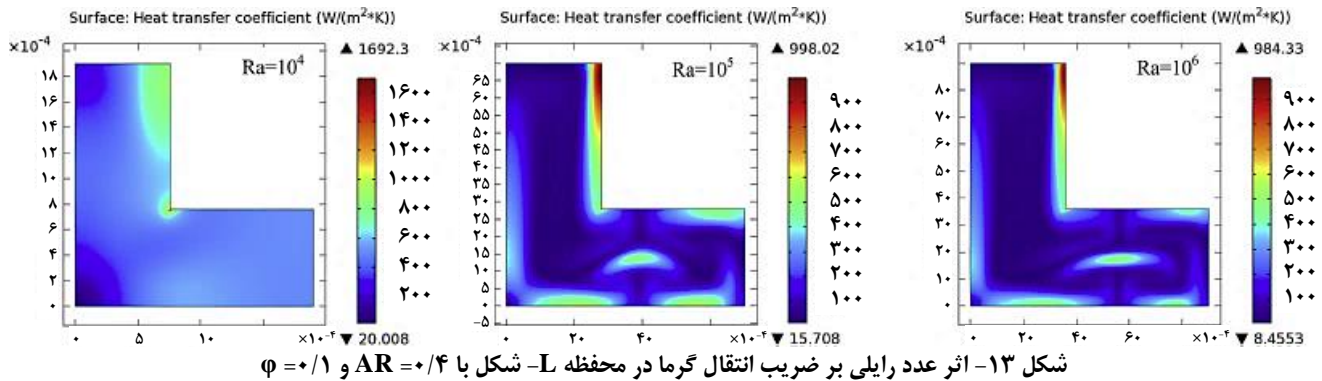
$$En = \frac{Nu_{ave,nanofluid} - Nu_{ave,basefluid}}{Nu_{ave,basefluid}} \times 100 \quad (19)$$

میزان ضریب افزایش انتقال گرما، به صورت تابعی از کسر حجمی نانوذره های مس و عدد رایلی، در محفظه L- شکل با $AR = +/۴$ بررسی شده است. طبق نتیجه های گزارش شده در جدول ۵، افزایش کسر حجمی نانوذره های مس به طور محسوسی

(۱) Chamkha et al

جدول ۵- ضریب افزایش انتقال گرما در محفظه L- شکل با $AR = 0.4$

ϕ (%)	$Ra=10^3$	$Ra=10^4$	$Ra=10^5$	$Ra=10^6$
0/0	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000
0/5	3/4565	2/8759	2/4354	1/7658
0/1	5/4568	5/0087	4/4343	3/7895
1/5	8/0085	7/5468	6/9876	5/4563
2/0	10/2345	9/6548	9/1235	8/4579
2/5	12/2345	11/1987	10/6899	9/0536
3/0	15/1577	14/4579	13/0067	12/5468
3/5	17/8765	15/5454	14/6564	13/3468
4/0	19/1867	17/6549	16/0003	14/7646
4/5	20/9856	18/7654	17/8643	15/4567
5/0	21/6549	19/8742	18/8754	16/8750



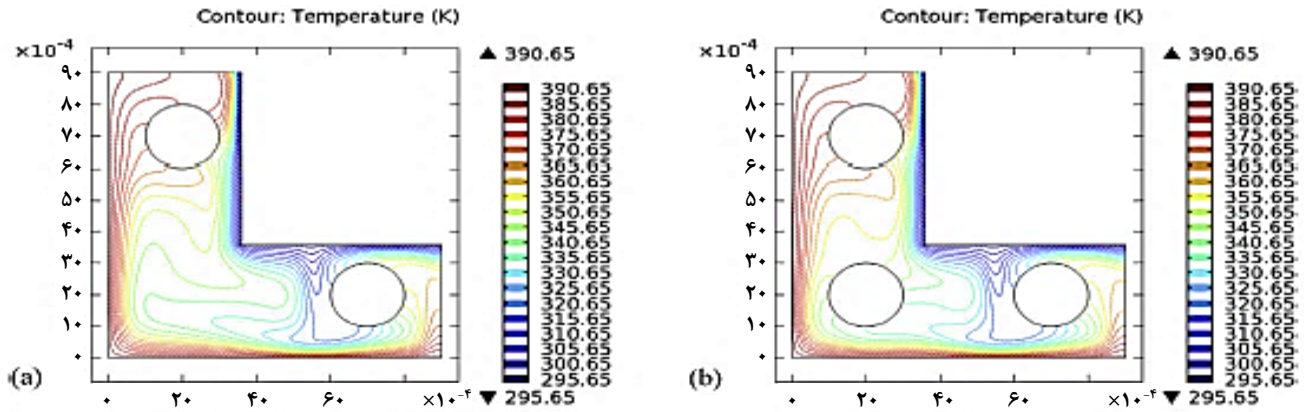
شکل ۱۳- اثر عدد رایلی بر ضریب انتقال گرما در محفظه L- شکل با $AR = 0.4$ و $\phi = 0.1$

بررسی کارایی محفظه L- شکل اصلاح شده

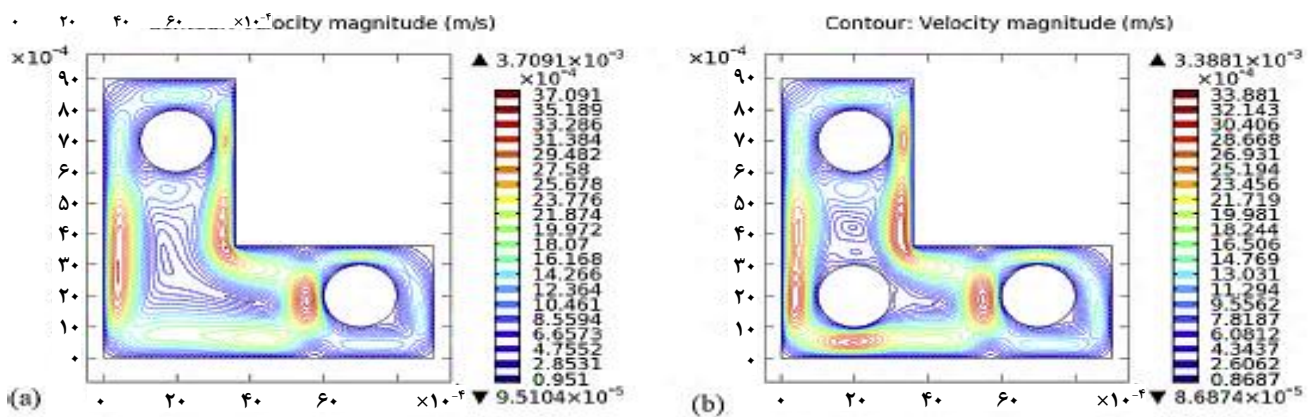
در شکل ۱۴، اثر تعداد پره‌ها بر توزیع خطوط هم‌دما در محفظه L- شکل با مقادیرهای $AR = 0.4$ ، $\phi = 0.1$ و $Ra = 10^6$ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، قرار دادن پره سبب می‌شود که خطوط هم‌دما به یکدیگر نزدیک شده و در نتیجه‌ی آن گرادینان دما افزایش یابد. علاوه بر این به‌کارگیری پره موجب تبادل گرمای بهتر سیال با دیواره‌ی محفظه و افزایش دمای خروجی محفظه می‌شود. شکل ۱۵ به روشنی نشان می‌دهد که قرار داد سه پره در محفظه، گردابه‌های بیشتری در مقایسه با دو پره ایجاد می‌کند. بنابراین تعداد پره از جمله مولفه‌های مهم در افزایش جابه‌جایی آزاد است. علاوه بر این ضریب‌های انتقال گرما موضعی در محفظه‌های اصلاح شده، در شرایط $AR = 0.4$ ، $\phi = 0.1$ و $Ra = 10^6$ ، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مقایسه‌ی محفظه معمولی (شکل ۱۳) و اصلاح شده (شکل b-۱۶) نشان می‌دهد که استفاده از پره در ساختار محفظه، ضریب انتقال گرما را به طور چشمگیری از $984/3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ به $1093/8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ افزایش می‌دهد.

(۱) Xuan et al

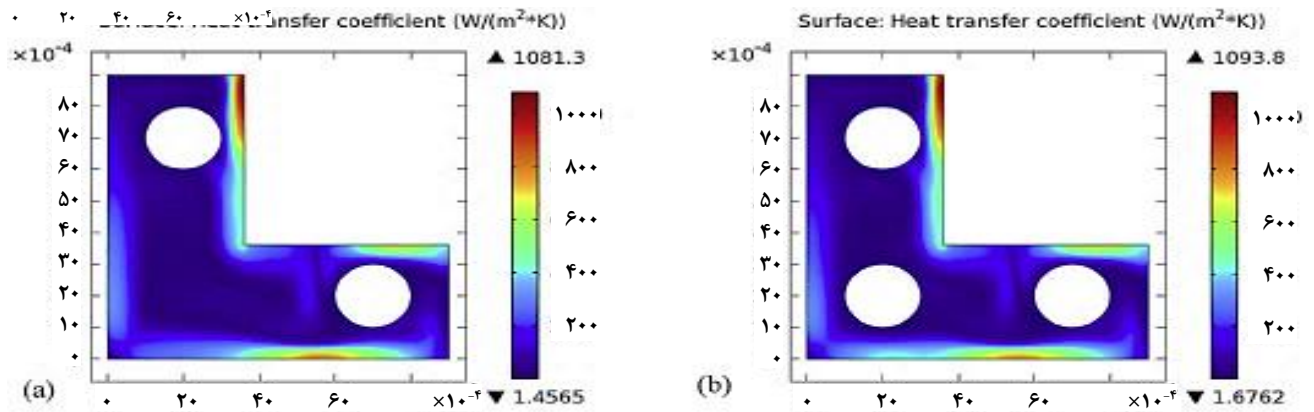
هدف از این پژوهش، توسعه محفظه پر شده با نانوسیال به منظور کاربرد در قطعه‌های الکترونیکی می‌باشد. در نتیجه با توجه به کاربرد این فناوری، پایداری نانوسیال از اهمیت بالایی برخوردار است. گرچه افزایش درصد وزنی نانوذره منجر به افزایش ضریب انتقال گرما خواهد شد، اما افزایش غلظت نانوذره منجر به کاهش پایداری نانوسیال خواهد شد. به عنوان نمونه، ژوان و همکاران^۱ دیدند افزایش کسر حجمی نانوذره تا ۵٪، منجر به کاهش پایداری نانوسیال تا ۳۰ ساعت خواهد شد [۱۳]. به همین دلیل، هدف از این مقاله، بررسی اثر افزودن نانوذره‌ها در غلظت‌های پایین بوده است. در غلظت‌های پایین نسبت رسانایی گرمایی نانو سیال به رسانایی گرمایی سیال پایه تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. این در حالی است که رسانایی گرمایی نانوسیال‌ها هم به رسانایی گرمایی نانوذره‌ها و هم به رسانایی گرمای سیال پایه بستگی دارد. همچنین به منظور درک بهتر از اثر سایر مولفه‌ها، کسر حجمی نانوذره در مقدارهای پایین مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۴- توزیع خط ihd هم دما در محفظه L- شکل اصلاح شده با $AR=0.4$ ، $\phi = \pi/4$ و $Ra = 10^6$ (a) دو پرده، $R = 0.01$ (b) سه پرده، $R = 0.01$



شکل ۱۵- توزیع سرعت در محفظه L- شکل اصلاح شده با $AR=0.4$ ، $\phi = \pi/4$ و $Ra = 10^6$ (a) دو پرده، $R = 0.01$ (b) سه پرده، $R = 0.01$



شکل ۱۶- ضریب انتقال گرما در محفظه L- شکل اصلاح شده با $AR=0.4$ ، $\phi = \pi/4$ و $Ra = 10^6$ (a) دو پرده، $R = 0.01$ (b) سه پرده، $R = 0.01$

نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر مولفه‌های گوناگون، مانند نسبت اندازه محفظه L- شکل، کسر حجمی نانوذره‌های مس و عدد رایلی بر روی سرعت انتقال گرما در یک محفظه L- شکل پر شده با نانوسیال آب و مس، به روش عددی مطالعه شد. بررسی‌ها نشان داد که در مقادیر بالای

عدد رایلی، مکانیسم انتقال گرما جابه جایی آزاد حاکم است. افزودن نانوذره‌های مس در آب خالص می‌تواند به طور چشمگیری سبب افزایش انتقال گرما شود. همچنین با افزایش عدد رایلی، تعداد جریان‌های گردابی افزایش یافته ولی بیشینه ضریب انتقال گرما کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌سازی به خوبی نشان داد

x	مختصه افقی (m)	که استفاده از پره‌های استوانه‌ای در محفظه L- شکل، سرعت انتقال گرما را
X	مختصه افقی بدون بعد	افزایش می‌دهد.
y	مختصه عمودی (m)	
Y	مختصه عمودی بدون بعد	
α	ضریب پخش گرمایی (m^2/s)	فهرست نمادها
β	ضریب انبساط گرمایی (K^{-1})	نسبت اندازه محفظه
ω	زاویه انحراف	ظرفیت گرمای ویژه ($J/kg.K$)
θ	دمای بی بعد	شتاب گرانش (m/s^2)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (kgm/s)	ضریب انتقال گرما (W/m^2K)
ν	ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)	ارتفاع محفظه (m)
ρ	دانسیته (kg/m^3)	ضخامت محفظه (m)
φ	نسبت حجمی نانوذره‌ها	هدایت گرمایی ($W/m K$)
Φ	ضریب انتقال	عدد ناسلت
c	دیواره سرد	عدد ناسلت موضعی
f	سیال خالص	فشار (Pa)
h	دیواره گرم	عدد پرتل
nf	نانوسیال	شار گرمایی (W/m^2)
w	دیوار	شعاع پره (m)
s	ذره‌های جامد	عدد رایلی
		دما (K)
		سرعت در جهت x، (m/s)
		سرعت بدون بعد در جهت x
		سرعت در جهت y، (m/s)
		سرعت بدون بعد در جهت y

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

مراجع

- [1] Naphon P., Wongwises S., [Investigation on the Jet Liquid Impingement Heat Transfer for the Central Processing Unit of Personal Computers](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37(7)**: 822-826 (2010).
- [2] Palm S.J., Roy G., Nguyen C.T., [Heat Transfer Enhancement with the Use of Nanofluids in Radial Flow Cooling Systems Considering Temperature-Dependent Properties](#), *Applied Thermal Engineering*, **26(17)**: 2209-2218 (2006).
- [3] Xie Y.Q., Yu J.Z., Zhao Z.H., [Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer for the Ethanol-Water Solution and FC-72 in Rectangular Microchannels](#), *Heat and Mass Transfer*, **41(8)**: 695-702 (2005).
- [4] Jiang P.X., Fan M.H., Si G.S., Ren Z.P., [Thermal-Hydraulic Performance of Small Scale Micro-Channel and Porous-Media Heat-Exchangers](#), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **44(5)**: 1039-1051 (2001).

[۵] کریمی ه.، سبزه میدانی، م.م.، مطالعه عددی تأثیر عامل‌های هندسی بر انتقال گرمای نانو سیال آب - Al_2O_3 در یک میکروکانال، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۳۵: ۱۳۷ تا ۱۵۰ (۱۳۹۵).

- [6] Rao Y., Liu Y., Wan C., [Multiple-Jet Impingement Heat Transfer in Double-Wall Cooling Structures with Pin Fins and Effusion Holes](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **133**:106-119 (2018).
- [7] Pachpute S., Premachandran B., [Slot Air Jet Impingement Cooling Over a Heated Circular Cylinder with and without a Flow Confinement](#). *Applied Thermal Engineering*, **132**: 352-367 (2018).
- [8] Jiang P.X., Li M., Lu T.J., Yu L., Ren Z.P., [Experimental Research on Convection Heat Transfer in Sintered Porous Plate Channels](#), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47(10)**: 2085-2096 (2004).
- [9] Hetsroni G., Gurevich M., Rozenblit R., [Sintered Porous Medium Heat Sink for Cooling of High-Power Mini-Devices](#), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **27(2)**: 259-266 (2006).
- [10] Bintoro J.S., Akbarzadeh A., Mochizuki, M., [A Closed-Loop Electronics Cooling by Implementing Single Phase Impinging Jet and Mini Channels Heat Exchanger](#), *Applied Thermal Engineering*, **25(17)**: 2740-2753 (2005).
- [11] Joshi Y., Kumar P., "Energy Efficient Thermal Management of Data Centers", Springer, 1st ed. London, New York, Dordrecht, Heidelberg (2012).
- [12] Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thompson L.J., [Anomalous Increase in Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles](#), *Appl Phys Lett*, **78**: 718-720 (2001).
- [13] Xuan Y., Li Q., [Heat Transfer Enhancement of Nanofluids](#), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **21(1)**: 58-64 (2000).
- [14] Dinarvand S., Pop I., [Free-Convective Flow of Copper/Water Nanofluid about a Rotating Down-Pointing Cone Using Tiwari-Das Nanofluid Scheme](#), *Advanced Powder Technology*, **28(3)**: 900-909 (2017).
- [15] Kasaeipoor A., Ghasemi B., Aminossadati S.M., [Convection of Cu-Water Nanofluid in a Vented T-Shaped Cavity in the Presence of Magnetic Field](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **94**: 50-60 (2015).
- [16] Bāiri A., [Experimental Study on Enhancement of Free Convective Heat Transfer in a Tilted Hemispherical Enclosure by Using Water-ZnO Nanofluid Saturated Porous Materials](#), *Applied Thermal Engineering*, **148**: 992-998 (2019).
- [17] Aminossadati S.M., Ghasemi B., [Natural Convection Cooling of a Localised Heat Source at the Bottom of a Nanofluid-Filled Enclosure](#), *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, **28(5)**: 630-640 (2009).
- [18] Ghasemi B., Aminossadati S.M., [Periodic Natural Convection in a Nanofluid-Filled Enclosure with Oscillating Heat Flux](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **49(1)**: 1-9 (2010).
- [19] Koca A., Oztop H.F., Varol Y., [The Effects of Prandtl Number on Natural Convection in Triangular Enclosures with Localized Heating from Below](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **34(4)**: 511-519 (2007).
- [20] Varol Y., Koca A., Oztop H.F., [Natural Convection in a Triangle Enclosure with Flush Mounted Heater on the Wall](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **33(8)**: 951-958 (2006).

- [21] Oztop H.F., Abu-Nada E., [Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled with Nanofluids](#), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **29(5)**: 1326-1336 (2008).
- [22] Mahmoodi M., [Mixed Convection Inside Nanofluid Filled Rectangular Enclosures with Moving Bottom Wall](#), *Thermal Science*, **15(3)**: 889-903 (2011).
- [23] Rudyak V.Y., Belkin A.A., Tomilina E.A., [On the Thermal Conductivity of Nanofluids](#), *Technical Physics Letters*, **36(7)**: 660-662 (2010).
- [24] Turgut A., Tavman I., Chirtoc M., Schuchmann H.P., Sauter C., Tavman S., [Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO₂ Nanofluids](#), *International Journal of Thermophysics*, **30(4)**: 1213-1226 (2009).
- [25] Ozisik M.N., ["Heat Transfer a basic approach"](#), McGraw-Hill, New York (1985).
- [26] Maxwell J.C. ["A Treatise on Electricity and Magnetism"](#), Oxford University Press, 2nd ed. UK, Cambridge (1904).
- [27] Ishihara I., Fukui T., Matsumoto R., [Natural Convection In A Vertical Rectangular Enclosure With Symmetrically Localized Heating and Cooling Zones](#), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **23(3)**: 366-372 (2002).
- [28] Brinkman H.C., [The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions](#), *The Journal of Chemical Physics*, **20(4)**: 571-571(1952).
- [29] Aly A.M., Raizah Z.A.S., [Double-Diffusive Natural Convection in an Enclosure Filled with Nanofluid Using ISPH Method](#), *Alexandria Engineering Journal*, **55(4)**: 3037-3052 (2016).
- [30] Mahmoodi M., [Numerical Simulation of Free Convection of a Nanofluid in L-Shaped Cavities](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **50(9)**: 1731-1740 (2011).
- [31] Ferziger J.H., Perić M., ["Computational Methods for Fluid Dynamics"](#), Springer-Verlag, Berlin (1996).
- [32] Tasnim S.H., Mahmud S., [Laminar Free Convection Inside an Inclined L-Shaped Enclosure](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **33(8)**: 936-942 (2006).
- [33] Aminossadati S.M., Ghasemi B., [Natural Convection Cooling of a Localised Heat Source at the Bottom of a Nanofluid-Filled Enclosure](#), *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, **28(5)**: 630-640 (2009).
- [34] Chamkha A., Ismael M., Kasaeipoor A., Armaghani T., [Entropy Generation and Natural Convection of CuO-Water Nanofluid in C-Shaped Cavity Under Magnetic Field](#), *Entropy*, **18(2)**: 50 (2016).