



The effect of changing magnitude and direction of the magnetic field on the flow and combined convection heat transfer for the nanofluid in concentric/eccentric rotating cylinder annulus

Behrad Haghighi^{1*}, Nasrin Shoul², Ali Abshahi Pour³

¹ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Val-e- Asr University, Rafsanjan, Iran.

² Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Val-e- Asr University, Rafsanjan, Iran.

³ Bachelor of Science, Department of Mechanical Engineering, Val-e- Asr University, Rafsanjan, Iran.

* 7718897111, Rafsanjan, Iran, b.haghighi@vru.ac.ir

Article info

Article history:

Received: 29 Dec 2022

Revised: 1 Feb 2022

Accepted: 17 Feb 2022

Available online: 17 Feb 2022

Keywords:

Combined convection

Nanofluid flow

Magnetic field

Non-concentric cylinders

<https://doi.org/10.22077/AEC.2023.5952.1017>

Abstract

In this research, fluid flow and heat transfer along with free and forced convection for nanofluid (aluminum oxide/water) confined in the space between two concentric and non-concentric cylinders in a horizontal state of infinite length which are at two temperatures have been kept differently, has been investigated in the presence of a magnetic field, with variable magnitude and direction, it has been simulated by Fluent software, and its design and meshing has been done by Gambit software. Forced flow occurs due to the rotation of the outer cold cylinder with a constant angular velocity around the central axis of the two cylinders. In addition, Buzinsk's approximation has been used to calculate the buoyancy forces that arise due to the temperature difference between the two cylinders. The obtained results are presented for a different range of dimensionless numbers (Reynolds, Rayleigh, Hartmann) and volume fraction of nanoparticles. The numerical results show that an increase in the volume fraction and Rayleigh number leads to an increase in heat transfer, and an increase in the Reynolds number leads to its decrease, and also the use of an external magnetic field suppresses the fluid velocity and heat transfer, and these changes are more tangible in the vertical direction.

بررسی تاثیر اندازه و جهت میدان مغناطیسی بر جریان و انتقال حرارت توام جابه‌جایی آزاد و اجباری برای نانوسیال محبوس در فضای بین دو استوانه هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز دوار

بهراد حقیقی^{۱*}، نسرين شول^۲، علی آبشاهی پور^۳

^۱ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

^۳ کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

* 7718897111، رفسنجان، ایران، b.haghighi@vru.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، جریان سیال و انتقال حرارت توام جابه‌جایی آزاد و اجباری برای نانوسیال (آلومینیوم اکسید/آب) محبوس در فضای بین دو استوانه هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز در حالت افقی به طول بی‌نهایت که در دو دمای متفاوت نگه داشته شده‌اند، در حضور میدان مغناطیسی با اندازه و جهت متغیر با کمک نرم افزار فلونت شیبیه سازی شده است و طراحی و شبکه بندی آن با نرم افزار گمبیت صورت پذیرفته است. جریان اجباری به واسطه چرخش استوانه سرد خارجی با سرعت زاویه‌ای ثابت حول محور مرکزی دو سیلندر پدید می‌آید. علاوه بر این، در محاسبه نیروهای شناوری که به واسطه اختلاف دمای موجود میان دو استوانه به وجود می‌آیند، از تقریب بوزینسک بهره‌گرفته شده است. نتایج به دست آمده برای محدوده وسیعی از گروه اعداد بدون بعد (رینولدز، رایلی، هارتمن) و کسرحجمی نانوذرات ارائه شده‌اند. نتایج عددی نشان می‌دهند افزایش کسر حجمی و عدد رایلی منجر به افزایش انتقال حرارت و افزایش عدد رینولدز، کاهش آن را به همراه دارد و نیز استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی باعث سرکوب سرعت سیال و انتقال حرارت می‌شود که این تغییرات در راستای عمودی ملموس‌تر است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۸/۱۰/۰۱

بازنگری: ۱۲/۱۱/۰۱

پذیرش: ۲۸/۱۱/۰۱

نشر برخط: ۲۸/۱۱/۰۱

کلمات کلیدی:

جابه‌جایی مرکب

جریان نانوسیال

میدان مغناطیسی

استوانه‌های غیرهم‌مرکز

۱- مقدمه

دادند افزایش میدان مغناطیسی باعث سرکوب جریان و انتقال حرارت سیال می-شود. شیخ الاسلامی و همکاران [۲۲] تاثیر منبع مغناطیسی بر جریان نانوسیال در محیط متخلخل را مورد بررسی قرار دادند. برطبق یافته‌های آنها افزایش عدد هارتمن باعث کاهش سرعت سیال و عدد ناسلت می‌شود. سوداگر و همکاران [۲۳] با بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر روی استوانه‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز نشان دادند افزایش عدد هارتمن باعث کاهش ناسلت محلی برای هر دو نوع استوانه می-شود.

امروزه با توجه به کاربرد گسترده هندسه‌های استوانه‌ای به منظور انتقال سیالات در صنایع، نیروگاه‌ها و تجهیزات الکترونیکی [۸، ۲۴] و همچنین اهمیت بالایی که پدیده انتقال حرارت بر بازدهی این مراکز دارد [۱۵] بررسی و کشف قوانین حاکم بر این پدیده و جریان سیال در هندسه‌های استوانه‌ای می‌تواند به افزایش بازدهی این مراکز و تجهیزات کمک کند به همین منظور در این مقاله بررسی تاثیر مجموعه‌ای از پارامترها از قبیل اعمال میدان مغناطیسی بر جریان و انتقال حرارت مرکب نانوسیال (هم به صورت تک‌فازی و هم به صورت دوفازی) محبوس در فضای بین استوانه‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز به نحوی که استوانه بیرونی چرخان در نظر گرفته شده است مورد بررسی قرار گرفته است که در پژوهش‌های پیشین ترکیب تمام این پارامترها به صورت همزمان به چشم نمی‌خورد.

۲ فرمول بندی مسئله

در این پژوهش جریان و انتقال حرارت نانوسیال محبوس در فضای بین دو استوانه با شعاع‌های $R_o = 2R_i$ و R_i در وضعیت‌های هم‌مرکز ($ec = 0$) و خروج از مرکز به میزان $ec = 10\%$ مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط شبیه‌سازی به نحوی است که در ابتدا استوانه‌های داخلی و خارجی در دمای یکسان T_0 قرار دارند، ناگهان استوانه بیرونی با سرعت ω_2 در خلاف جهت عقربه‌های ساعت حول محور مرکزی استوانه‌ها شروع به چرخش می‌کند و دمای استوانه داخلی تا T_i افزایش پیدا می‌کند سپس تاثیر پارامترهایی از قبیل کسر حجمی و اعداد رایلی، رینولدز و هارتمن در حالت پایا بررسی می‌شود. شماتیک اجزا مورد استفاده در این شبیه‌سازی در شکل (۱) نمایش داده شده است.

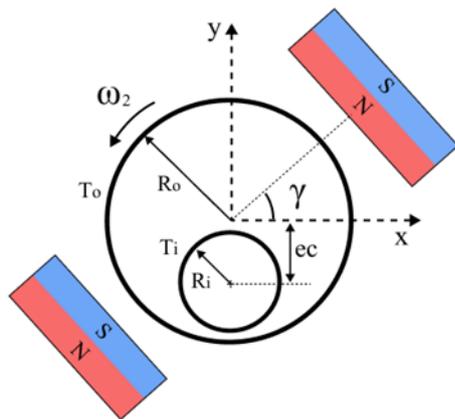


Fig. 1. Schematic of concentric and non-concentric cylinders from the front view.

شکل ۱. شماتیک استوانه‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز از نمای رو به رو.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود نانوسیال نیوتنی تحت تاثیر یک میدان یکنواخت خارجی است و میدان مغناطیسی ناشی از حرکت نانوسیال و حرارت تولید شده توسط میدان الکترومغناطیسی به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته شده است. نانوسیالی که فضای بین دو استوانه را پر کرده است آلومینیوم اکسید/آب می‌باشد که مشخصات سیال پایه و نانوذرات در دمای مرجع 22°C در جدول (۱) ذکر شده است. باتوجه به خواص سیال پایه در جدول (۱) و رابطه (۲۷) عدد پراوتل برای آب مقدار 6 می‌باشد.

انتقال حرارت یکی از پدیده‌های مهم فیزیکی می‌باشد که در طی آن انرژی حرارتی به واسطه اختلاف دما به صورت‌های رسانش، تابش و جابه‌جایی منتقل می‌شود [۱]. در انتقال حرارت به روش جابه‌جایی تبادل انرژی بین سیال و جسم جامد صورت می‌پذیرد و در انواع آزاد، اجباری و مرکب (توام آزاد و اجباری) وجود دارد. مبدل‌های حرارتی، آبگرمکن‌های خورشیدی، خنک‌کننده‌های قطعات الکترونیکی نمونه-ای از تجهیزاتی هستند که بر مبنای انتقال حرارت از نوع جابه‌جایی ساخته شده‌اند. هندسه این تجهیزات عموماً به شکل استوانه است و با توجه به کاربرد هندسه‌های استوانه‌ای در بحث انتقال حرارت توجه دانشمندان زیادی به آنها جلب شده است. ما و همکاران [۲] در طی مقاله‌ای به بررسی انتقال حرارت در یک استوانه افقی چرخان پرداختیم. برطبق یافته‌های آنها چرخش استوانه منجر توزیع غیر یکنواخت عدد ناسلت می‌شود. تالش بهرامی و همکاران [۳] با بررسی انتقال حرارت درون دو استوانه غیرهم‌مرکز به نحوی که استوانه داخلی چرخان در نظر گرفته شده است نشان دادند با افزایش خروج از مرکز، میانگین عدد ناسلت بهبود می‌یابد. حبیب و همکاران [۴] نشان دادند در اعداد رایلی بیش از 104، افزایش خروج از مرکز استوانه داخلی، افزایش عدد ناسلت را به همراه دارد. ورما و همکاران [5] استفاده از لوله‌های موج دار در مبدل‌های حرارتی هم‌مرکز را عامل افزایش ضریب انتقال حرارت تا 1.5 الی 2 برابر معرفی نمودند. با ظهور نانوسیالات تحول عظیمی در بحث انتقال حرارت رخداد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

به کمک فناوری نانو دانشمندان توانستند از مواد فلزی و غیرفلزی ذرات ریزی با ابعاد نانومتر تهیه کنند که به نانو ذرات مشهورند. با افزودن این ذرات به یک سیال خالص (مانند آب)، سیال جدیدی با خواص کاملاً متفاوت به وجود می‌آید که نانوسیال نامیده می‌شود. چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه خواصی از سیال هستند که متناسب با درصد حجمی [۶، ۷، ۸]، نوع، شکل و اندازه نانوذرات [۹] مقدارشان تغییر می‌کند. ژانگ و همکاران [۱۰]، زینلی و همکاران [۱۱]، نگوین و همکاران [۱۲]، منصور و همکاران [۱۳] در طی مقالاتی نشان دادند استفاده از نانوسیال آلومینیوم اکسید/آب به جای سیالات خالص در مبدل‌های حرارتی باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. المغلانی و همکاران [۱۴] تاثیر نانوذرات آلومینیوم اکسید، تیتانیوم اکسید و مس را بر روی انتقال حرارت مرکب در دو استوانه غیرهم‌مرکز به نحوی که استوانه داخلی چرخان در نظر گرفته شده است مورد بررسی قرار دادند. بر طبق یافته‌های آنها در جابه‌جایی مرکب افزودن نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود.

علاوه بر عوامل مذکور، میدان مغناطیسی نیز بر میزان انتقال حرارت در نانوسیالات موثر است. شدت، زاویه اعمال میدان مغناطیسی و نحوه توزیع نانوذرات از جمله عوامل تعیین کننده در این پدیده هستند [۱۵]. به طور کلی اعمال میدان مغناطیسی بر روی نانوسیالات می‌تواند باعث افزایش شدید، افزایش اندک و یا حتی کاهش انتقال حرارت شود. همچنین در بعضی موارد انتقال حرارت در بازه‌های مشخصی از میدان مغناطیسی افزایش و با خروج از بازه مذکور کاهش می‌یابد [۱۶]. ملوندی و همکاران [۱۷] تاثیر میدان مغناطیسی بر روی انتقال حرارت نانوسیال آلومینیوم اکسید/آب درون دو استوانه هم‌مرکز را مورد بررسی قرار دادند. بر طبق یافته‌های آنها افزایش عدد هارتمن در بازه 0 تا 15 (در صورتی که استوانه داخلی عایق، و یک شار حرارتی ثابت از استوانه بیرونی در نظر گرفته شود) می‌تواند باعث کاهش نرخ انتقال حرارت شود. سان و همکاران [۱۸] با بررسی تاثیر میدان مغناطیسی ثابت بر روی انتقال حرارت نانوسیال اکسید آهن/آب درون یک استوانه افقی نشان دادند افزایش میدان مغناطیسی از 415 به 700 گاوس باعث افزایش عدد ناسلت محلی از 4.36% به 7.19% می‌شود. ژانگ و همکاران [۱۹] در سال 2021 با بررسی تجربی تاثیر میدان مغناطیسی متناوب (0 تا 100 هرتز) بر روی نانوسیال اکسید آهن/آب محبوس در فضای بین دو استوانه هم‌مرکز، نشان دادند با افزایش میدان مغناطیسی نرخ افزایش انتقال حرارت کاهش می‌یابد. حاجت زاده و همکاران [۲۰] با بررسی عددی جابه‌جایی آزاد نانوسیال آلومینیوم/آب در حضور میدان مغناطیسی نشان دادند افزایش عدد هارتمن باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود. همچنین آنها نشان دادند افزایش زاویه میدان مغناطیسی از 0 تا 15 درجه افزایش و از 15 تا 90 درجه، کاهش انتقال حرارت را به همراه دارد. مزینی و همکاران [۲۱] با بررسی پدیده جابه‌جایی مرکب در استوانه‌های هم‌مرکز نشان

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانو ذره.

Table 1. Thermophysical properties of basic fluid and nanoparticles.

Properties	Al ₂ O ₃	Water
ρ (kgm ⁻³)	3970	997.8
c_p (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	765	4179
μ (Pa.s)	-	9.58e-4
k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	25	0.6
$\beta \times 10^4$ (K ⁻¹)	0.85	2.3
d_p (nm)	100	-

$$D_B = \frac{k_B T}{3\pi\mu d_p} \quad (10)$$

$$D_T = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \left(0.26 \frac{k_f}{2k_f + k_p}\right) \quad (11)$$

معادله مومنتوم سیال همان معادله ممنتوم در سامانه مختصات استوانه‌ای است که به صورت زیر برای سیال و نانوذره به ترتیب توسط روابط (۱۲) و (۱۳) قابل بیان است [۲۱]:

$$\begin{aligned} (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} &= -\vec{\nabla} p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{v} + \\ \frac{Ra}{Pr Re^2} \theta & \left[(\cos \phi) \vec{e}_r - (\sin \phi) \vec{e}_\phi \right] - V_r \frac{Ha^2}{Re} \vec{e}_r \end{aligned} \quad (12)$$

$$(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \tau + \vec{g} \quad (13)$$

که در آن τ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau = -\mu_{nf} (\vec{\nabla} \vec{v} + (\vec{\nabla} \vec{v})^t) \quad (14)$$

$(\vec{\nabla} \vec{v})^t$ ترانهاده $\vec{\nabla} \vec{v}$ است.

معادله انرژی نیز بعد از اعمال متغیرهای θ بعد برای سیال پایه به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$\vec{v} \cdot \vec{\nabla} \theta = \frac{1}{Re Pr} \nabla^2 \theta \quad (15)$$

و برای نانو ذره به شکل زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T &= \vec{v} \cdot (\alpha_{nf} \vec{\nabla} T) + \\ \frac{\rho_p c_p}{\rho_{nf} c_{nf}} & \left(D_B \vec{\nabla} \phi \cdot \vec{\nabla} T + D_T \frac{\vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla} T}{T} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

که در روابط فوق عملگر دل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \vec{e}_\phi \quad (17)$$

اعداد θ بعد استفاده شده در معادلات به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Re = \frac{(R_o \omega) D}{\nu} \quad (18)$$

$$Ra = \frac{g \beta (T_i - T_o) D^3}{\nu \alpha} \quad (19)$$

$$Ha = B_o D \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}} \quad (20)$$

$$D = R_o - R_i \quad (21)$$

در این آزمایش همه خواص ترموفیزیکی سیال به جز چگالی ثابت در نظر گرفته شده‌اند که برای محاسبه تغییرات آن از تقریب بوزینسک مطابق رابطه (۱) استفاده شده است.

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

در معادله فوق β ضریب انبساط حرارتی می‌باشد که از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2)$$

با توجه به کمبود داده‌های تجربی برای چگالی نانوسیال در دمای مشخص، محاسبه این پارامتر از طریق روابط وابسته به کسر حجمی نانوسیال انجام می‌شود که در این پژوهش از رابطه پک و چو [۲۵] استفاده شده است زیرا به کمک این رابطه می‌توان میزان چگالی نانوسیال را با خطای 0.6% محاسبه کرد.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (3)$$

همچنین از مدل‌های واسپ [۲۶] و برینکمن [۲۷] به ترتیب برای محاسبه هدایتی حرارتی و لزجت نانوسیال استفاده شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \left[\frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (4)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 + \phi)^{2.5}} \quad (5)$$

گرمای ویژه و ضریب انبساط حجمی نیز از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$C_{p,nf} = (1 - \phi) C_{p,f} + \phi C_{p,p} \quad (6)$$

$$\beta_{nf} = (1 - \phi) \beta_f + \phi \beta_p \quad (7)$$

معادله پیوستگی برای سیال:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (8)$$

معادله پیوستگی برای نانوذره:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \phi = \vec{\nabla} \cdot \left(D_B \vec{\nabla} \phi + D_T \frac{\vec{\nabla} T}{T} \right) \quad (9)$$

که در آن ϕ کسر حجمی نانوسیال، D_B ضریب نفوذ براونی و D_T ضریب پخش حرارتی می‌باشد که از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

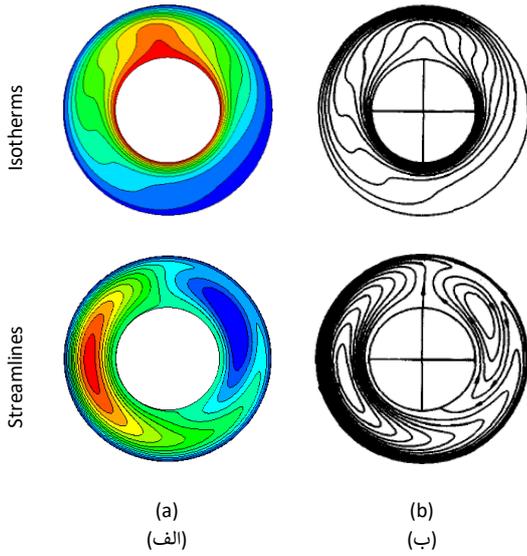


Fig. 3. Comparing streamlines and isotherms in the a) present study and b) Yoo study with $Pr = 0.7$, $Ra = 104$ and $Re = 100$.

شکل ۳. مقایسه خطوط جریان و هم‌دما در (الف) پژوهش حاضر و (ب) پژوهش یو برای سیال با $Pr = 0.7$ ، $Ra = 104$ و $Re = 100$.

۴ نتایج

۴-۱- بررسی تاثیر عدد رایلی بر نرخ انتقال حرارت

بررسی اثر میدان مغناطیسی بر جریان سیال و انتقال حرارت موضوع اصلی پژوهش حاضر است اما تاثیر پارامترهای دیگری هم‌چون عدد رینولدز و عدد رایلی و کسر-حجمی بر انتقال حرارت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر عدد رایلی در شکل (۴) برای استوانه‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز و برای هر دو حالت تک‌فازی و دو-فازی نشان داده شده است. با تغییر اختلاف دمای بین دو استوانه می‌توان عدد رایلی را تغییر داد. با افزایش عدد رایلی نرخ انتقال حرارت کلی افزایش یافته است که با توجه به تعریف عدد رایلی قابل پیش بینی است. مدلسازی دوفازی نسبت به مدلسازی تک‌فازی نرخ انتقال حرارت کلی بیشتری را پیش بینی می‌نماید. چه در حالت تک‌فازی و چه در حالت دوفازی نرخ انتقال حرارت کلی استوانه‌های غیرهم-مرکز نسبت به استوانه‌های هم‌مرکز بیشتر است.

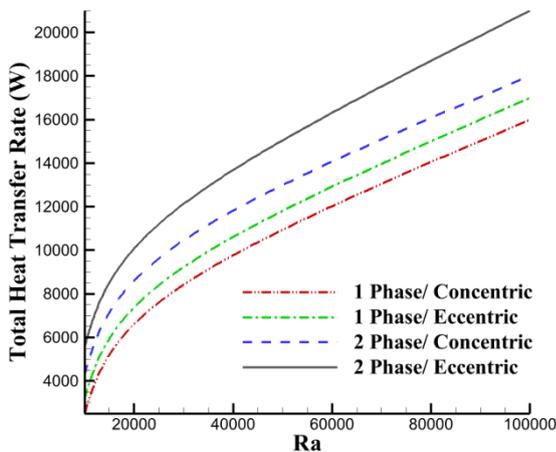


Fig. 4. The effect of Rayleigh number on total heat transfer at $Ha = 0$, $\varphi = 0.01$, $Pr = 6$ and $Re = 50$.

شکل ۴. تاثیر عدد رایلی بر روی نرخ انتقال حرارت کل در $Pr = 6$ ، $\varphi = 0.01$ ، $Ha = 0$ و $Re = 50$.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (22)$$

$$\theta = \frac{T - T_o}{T_i - T_o} \quad (23)$$

شرایط اولیه برای مساله حاضر در $t = 0$ به صورت $V_\theta = 0$ ، $V_r = 0$ و $\theta = 0$ تعریف می‌شود و فرم بی بعد شرایط مرزی هم در $r = R_i$ به صورت $\theta = 0$ ، $V_\theta = 1$ ، $V_r = 0$ و در $r = R_o$ به صورت $\theta = 0$ ، $V_\theta = 0$ ، $V_r = 0$ می‌باشد

۳ مدلسازی و اعتبارسنجی

در این پژوهش به منظور مدلسازی و شبکه‌بندی استوانه‌های هم‌مرکز و غیرهم-مرکز از نرم افزار GAMBIT و جهت بررسی عددی جریان سیال و محاسبه میزان انتقال حرارت مرکب از نرم افزار Ansys Fluent 16 استفاده شده است. به منظور به دست آوردن دقیق ترین نتایج ممکن و شبکه بندی بهینه نتایج استقلال از شبکه در شکل (۲) دیده می‌شود. شبکه بندی با ابعاد 28000 سلول مورد استفاده قرار گرفت.

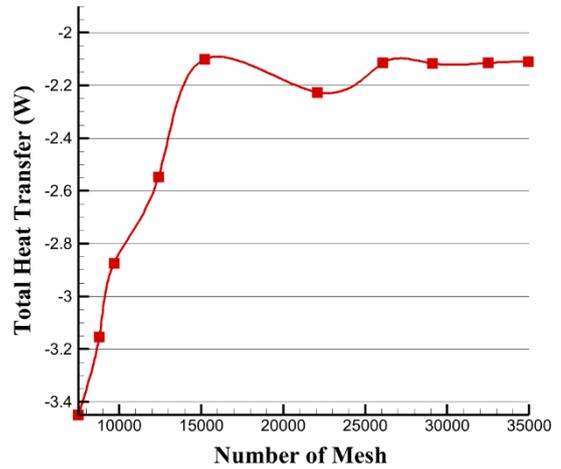


Fig. 2. Mesh independency diagram $Re = 50$ and $Ra = 100000$.

شکل ۲. نمودار بررسی استقلال از شبکه در $Re = 50$ و $Ra = 100000$.

به منظور اعتبارسنجی پژوهش حاضر نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تحقیق یو [۲۸] مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید این نتایج از شباهت نزدیکی برخوردارند.

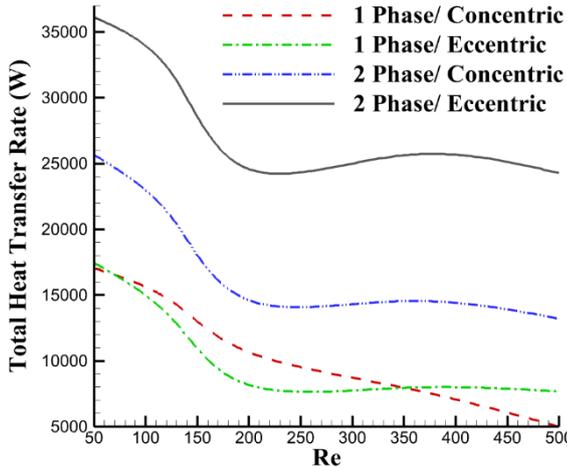


Fig. 6. The effect of Reynolds number on total heat transfer at $Ha = 0$, $Ra = 100000$, $Pr = 6$ and $\phi = 0.05$.

شکل ۶. تاثیر عدد رینولدز بر روی نرخ انتقال حرارت کل در $Ra = 100000$ ، $Ha = 0$ و $Pr = 6$ و $\phi = 0.05$.

۴-۴- بررسی تاثیر عدد هارتمن بر نرخ انتقال حرارت

برای بررسی تاثیر عدد هارتمن بر نرخ انتقال حرارت کلی مقادیر کسر حجمی 0.05 درصد و عدد رینولدز 500 و عدد رایلی 100000 به عنوان مبنای برای ارائه نتایج در نظر گرفته شده اند و با اعمال یک میدان مغناطیسی یکنواخت در سه زاویه 0، 45 و 90 درجه بررسی تاثیر عدد هارتمن بر خطوط جریان و هم‌دما در مقادیر 0، 20 و 75 انجام شد. نتایج در قالب شکل‌های (۷) تا (۱۴) برای خطوط جریان و خطوط دما ثابت و برای استوانه‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز ارائه شده است. با مراجعه به شکل‌های مذکور می‌توان دریافت که در غیاب میدان مغناطیسی ($Ha=0$) سرعت محیطی و توزیع دما به خصوص در نزدیکی استوانه سرد بیرونی داری دامنه‌ای با گرادینان بالا هستند. با افزایش میدان مغناطیسی تغییرات در میدان سیال و دما یکنواخت تر از قبل شده است و این ناشی از سرکوب جابه‌جایی به وسیله میدان مغناطیسی است. ملاحظه می‌شود خطوط جریان و هم‌دما با تغییر زاویه اعمال میدان مغناطیسی تغییر می‌کنند به نحوی که در بیشترین عدد هارتمن با تغییر زاویه اعمال میدان مغناطیسی از 0 به 90 درجه، کانتورهای جریان و هم‌دما تبدیل به دایره متحدالمرکزی می‌شوند که در حالت‌های تک‌فازی و دوفازی قابل مشاهده هستند. همچنین نتایج مربوط به تغییرات عدد هارتمن بر روی نرخ انتقال حرارت کل در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) ارائه شده است.

۲-۴- بررسی تاثیر کسر حجمی بر نرخ انتقال حرارت

تاثیر تغییرات کسر حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت کلی برای استوانه‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز با هر دو حالت تک فاز و دوفاز در شکل (۵) نشان داده شده است. افزایش کسر حجمی نانوذرات منجر به افزایش انتقال حرارت کلی شده است. دیدگاه دوفازی انتقال حرارت بیشتری را نسبت به حالت تک‌فازی پیش بینی می‌کند. در مدلسازی با هر دو دیدگاه نرخ انتقال حرارت کلی در کره‌های غیرهم‌مرکز نسبت به کره‌های هم‌مرکز بیشتر است. البته در دیدگاه تک‌فازی این اختلاف کمتر اما در دیدگاه دوفازی این اختلاف از 25 درصد هم تجاوز می‌کند.

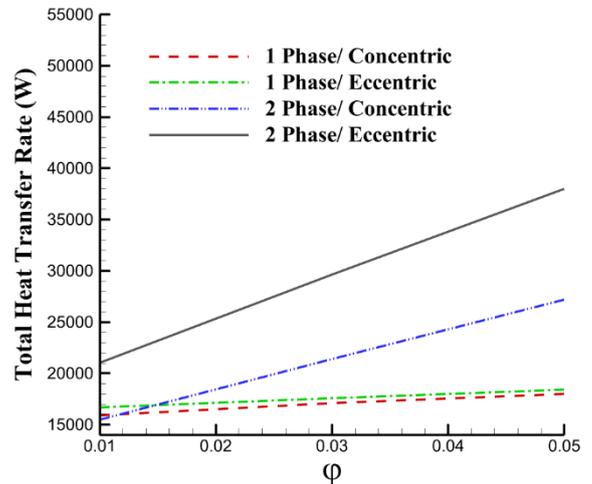


Fig. 5. The effect of friction volume on total heat transfer at $Ha = 0$, $Ra = 100000$, $Pr = 6$ and $Re = 50$.

شکل ۵. تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر روی نرخ انتقال حرارت کل در $Ha = 0$ ، $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 100000$.

۳-۴- بررسی تاثیر عدد رینولدز بر نرخ انتقال حرارت

بررسی تاثیر عدد رینولدز بر نرخ انتقال حرارت کلی برای استوانه‌های هم‌مرکز و غیر-هم‌مرکز در شکل (۶) نشان داده شده است. با تغییر سرعت زاویه ای استوانه دوار می‌توان عدد رینولدز را تغییر داد. ابتدا با افزایش عدد رینولدز کاهش در روند انتقال حرارت ملاحظه می‌شود که نشان از غلبه نیروهای اینرسی بر نیروهای شناوری و در نهایت کاهش انتقال حرارت جابه‌جایی مرکب است. اما از محدوده عدد رینولدز بزرگ تر از 200 نیروهای اینرسی خود عاملی برای انتقال حرارت به صورت جا به جایی اجباری هستند و لذا روند کاهشی انتقال حرارت کلی متوقف می‌شود. در شکل (۶) نیز همانند شکل‌های (۴) و (۵) چه برای استوانه‌های هم‌مرکز و چه برای استوانه‌های غیرهم‌مرکز، دیدگاه دوفازی نرخ انتقال حرارت کلی بزرگتری را نسبت دیدگاه تک‌فازی پیش بینی می‌کند. نرخ انتقال حرارت کلی در استوانه‌های غیرهم‌مرکز نسبت به استوانه‌های هم‌مرکز در هر دو دیدگاه تک‌فازی و دوفازی بیشتر است، البته این اختلاف در دیدگاه تک‌فازی کمتر و در دیدگاه دوفازی تا 28 درصد نیز می‌رسد.

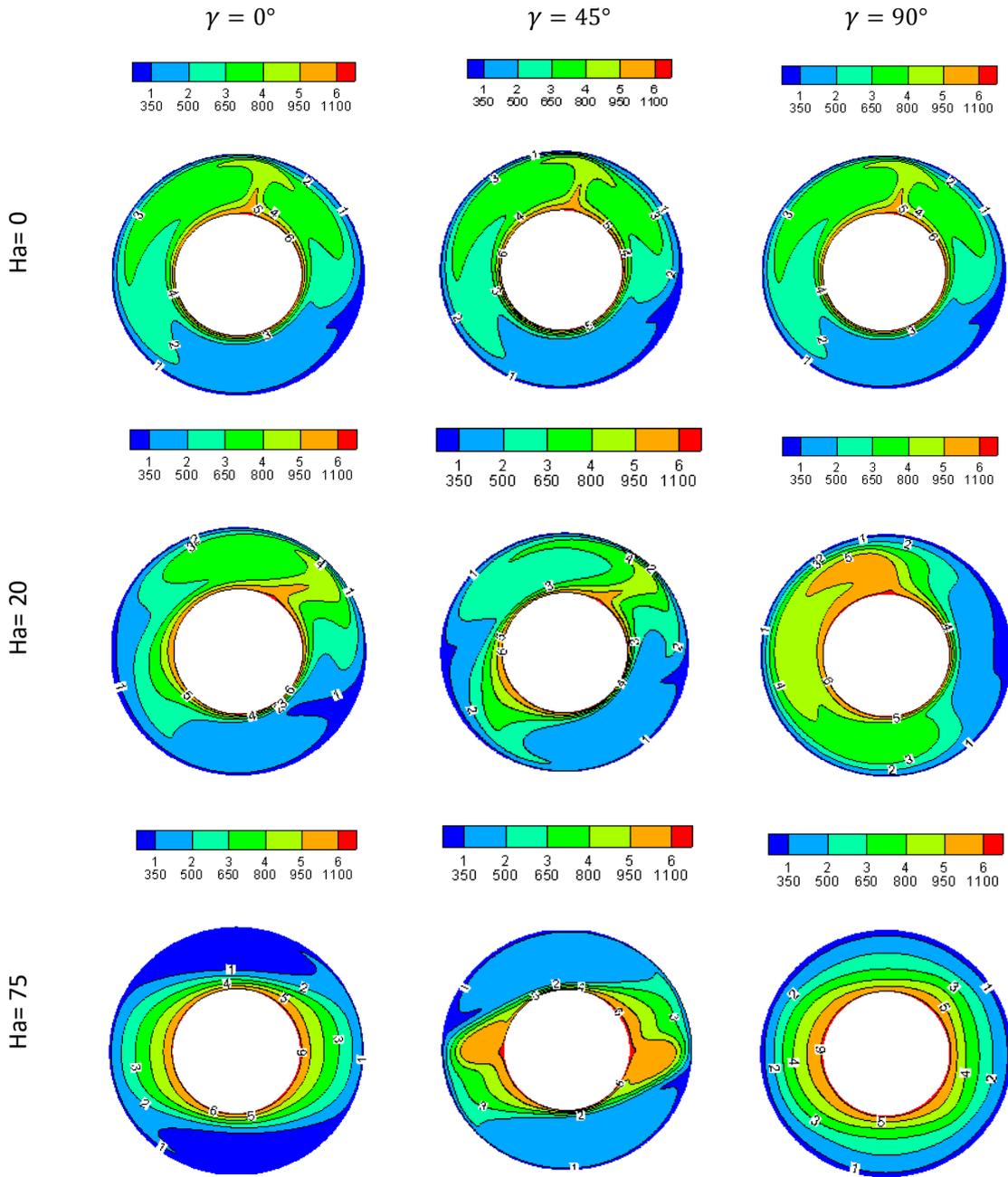


Fig. 7. The effects of increasing the Hartman number and changing the orientation of magnetic field on isothermal contours in concentric cylinder and single-phase mood at $Re = 50$, $Ra = 100,000$ and $Pr = 6$.

شکل ۷. تاثیر افزایش عدد هارتمن و تغییر زاویه میدان مغناطیسی بر روی خطوط هم‌دما در استوانه‌های هم‌مرکز و حالت تک‌فازی در $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 10^5$.

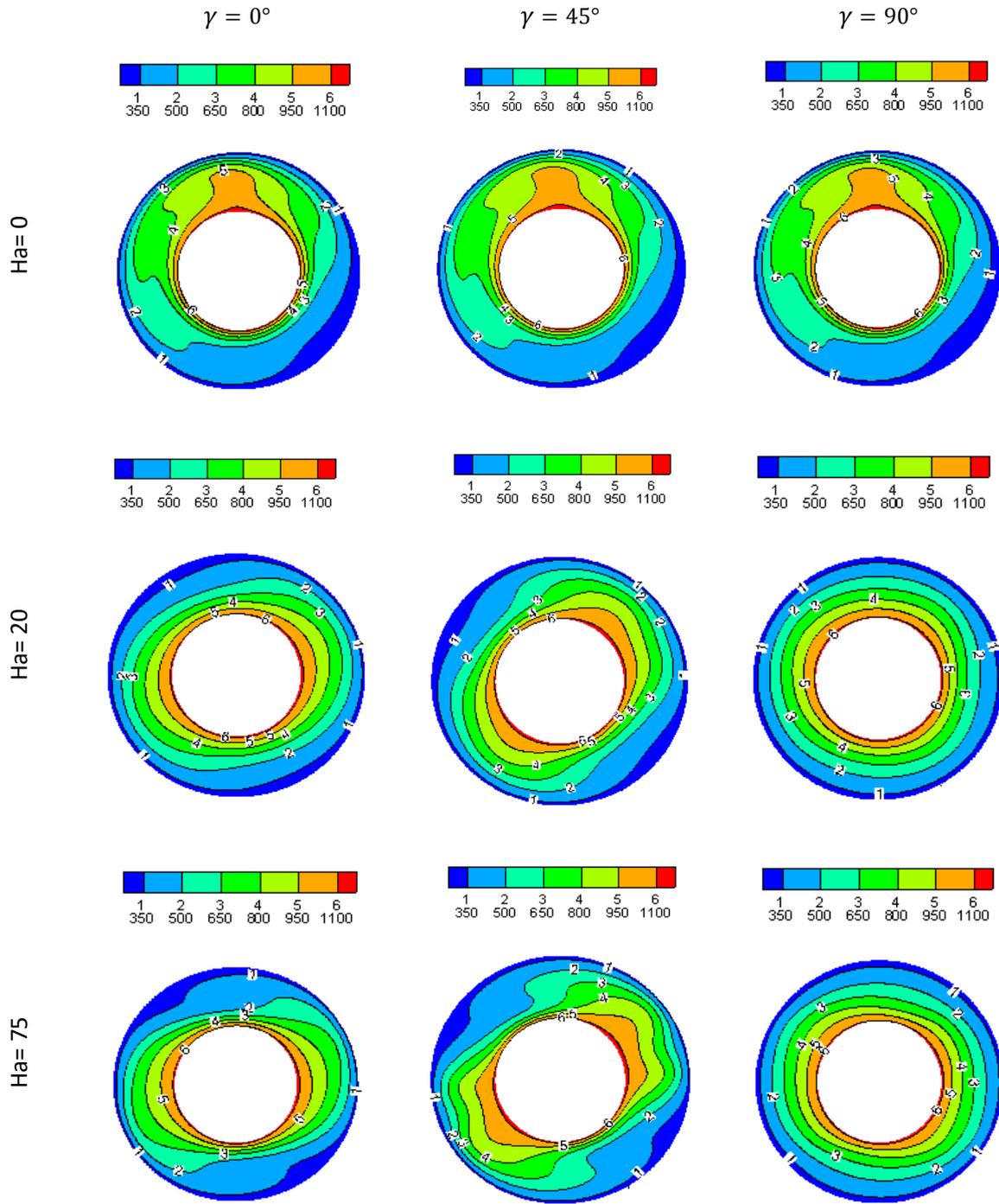


Fig. 8. The effects of increasing the Hartman number and changing the orientation of magnetic field on isothermal contours in concentric cylinder and two-phase mood at $Re = 50$, $Ra = 100,000$ and $Pr = 6$.

شکل ۸. تاثیر افزایش عدد هارتمن و تغییر زاویه میدان مغناطیسی بر روی خطوط هم‌دما در استوانه‌های هم‌مرکز و حالت دوفازی در $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 10^5$.

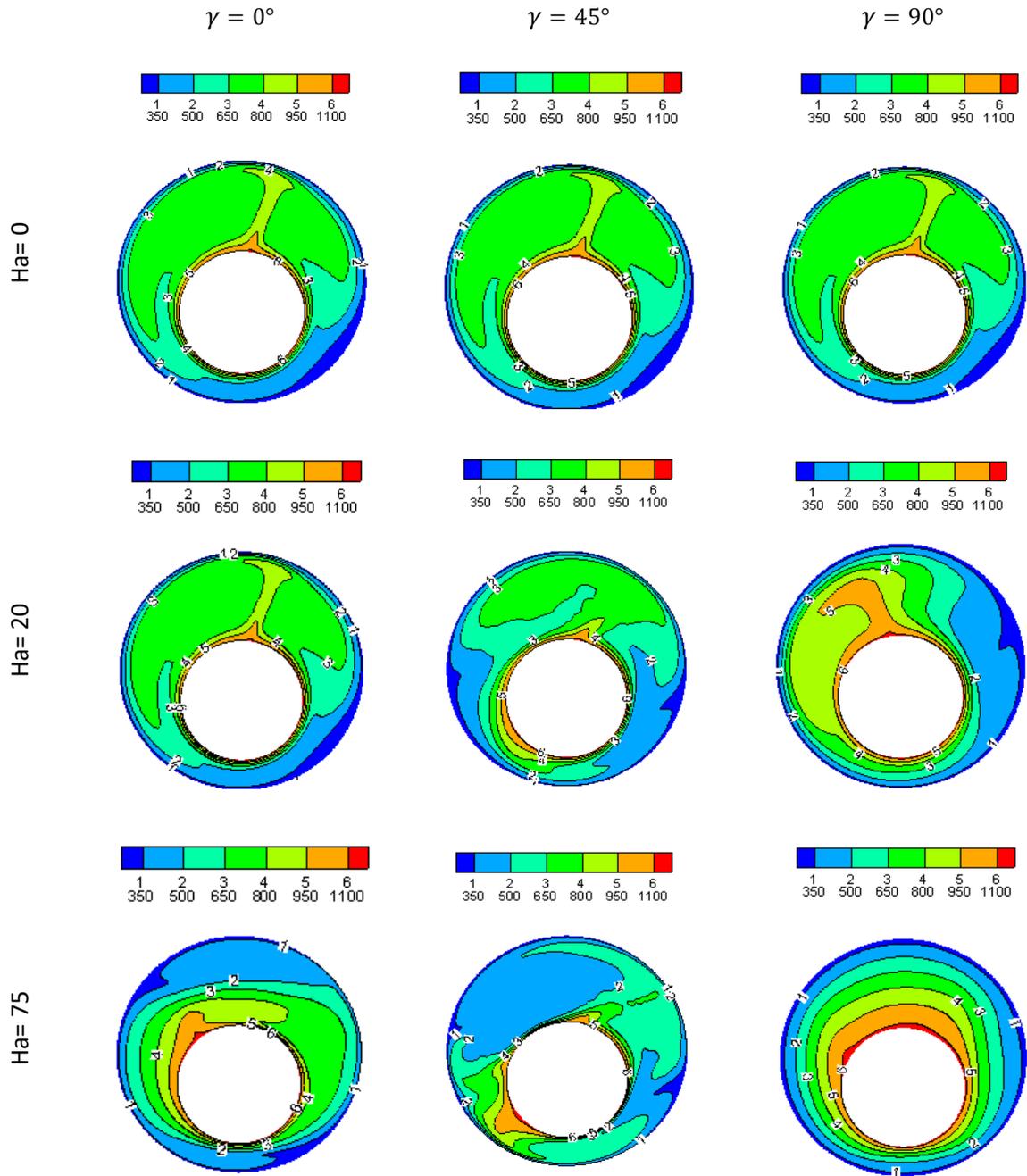


Fig. 9. The effects of increasing the Hartman number and changing the orientation of magnetic field on isothermal contours in non-concentric cylinder and single-phase mood at $Re = 50$, $Ra = 100,000$ and $Pr = 6$.

شکل ۹. تاثیر افزایش عدد هارتمن و تغییر زاویه میدان مغناطیسی بر روی خطوط هم‌دما در استوانه‌های غیرهم‌مرکز و حالت تک‌فازی در $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 10^5$.

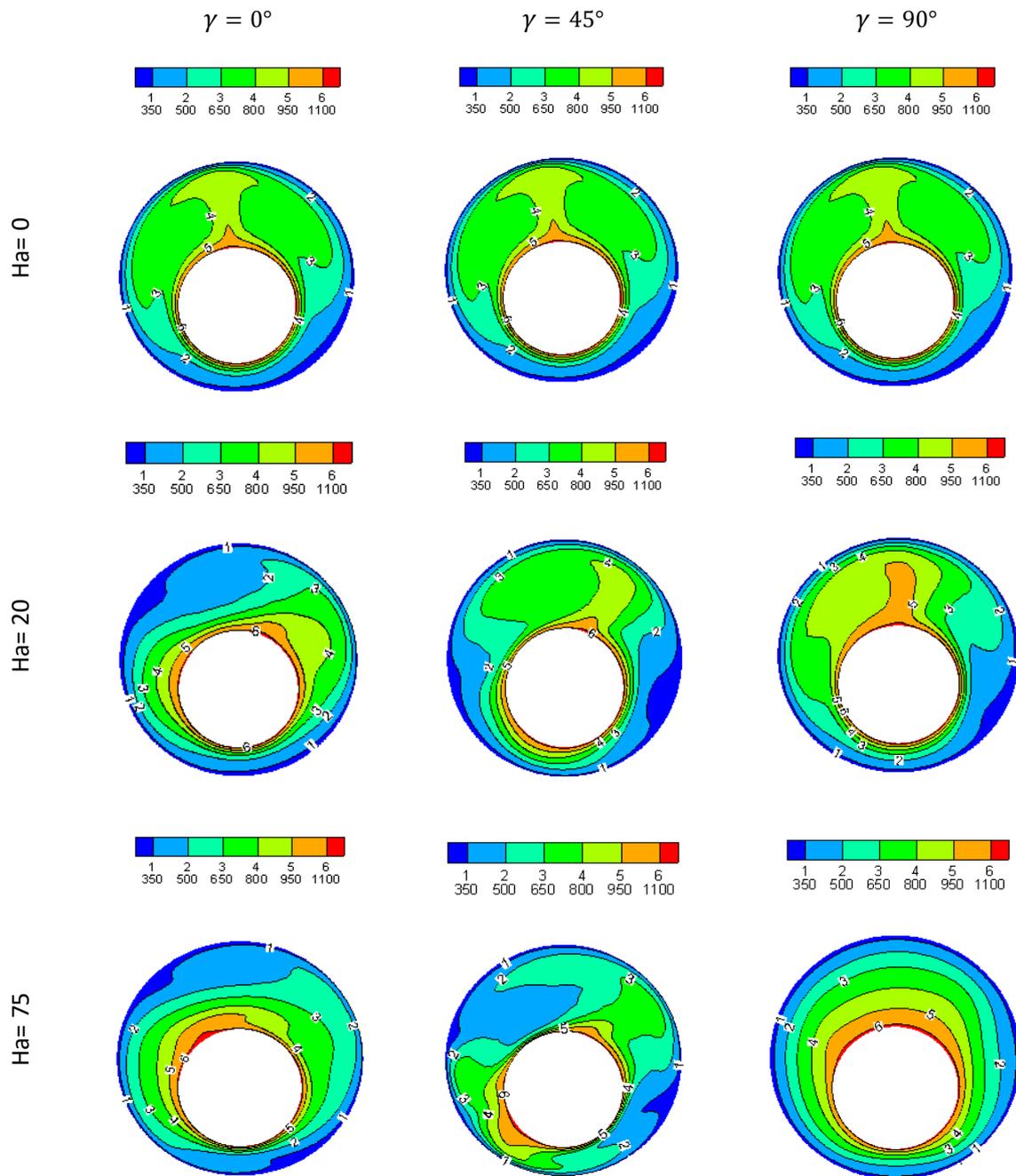


Fig. 10. The effects of increasing the Hartman number and changing the orientation of magnetic field on isothermal contours in non-concentric cylinder and two-phase mood at $Re = 50$, $Ra = 100,000$ and $Pr = 6$.

شکل ۱۰. تاثیر افزایش عدد هارتمن و تغییر زاویه میدان مغناطیسی بر روی خطوط هم‌دما در استوانه‌های غیرهم‌مرکز و حالت دوفازی در $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 10^5$.

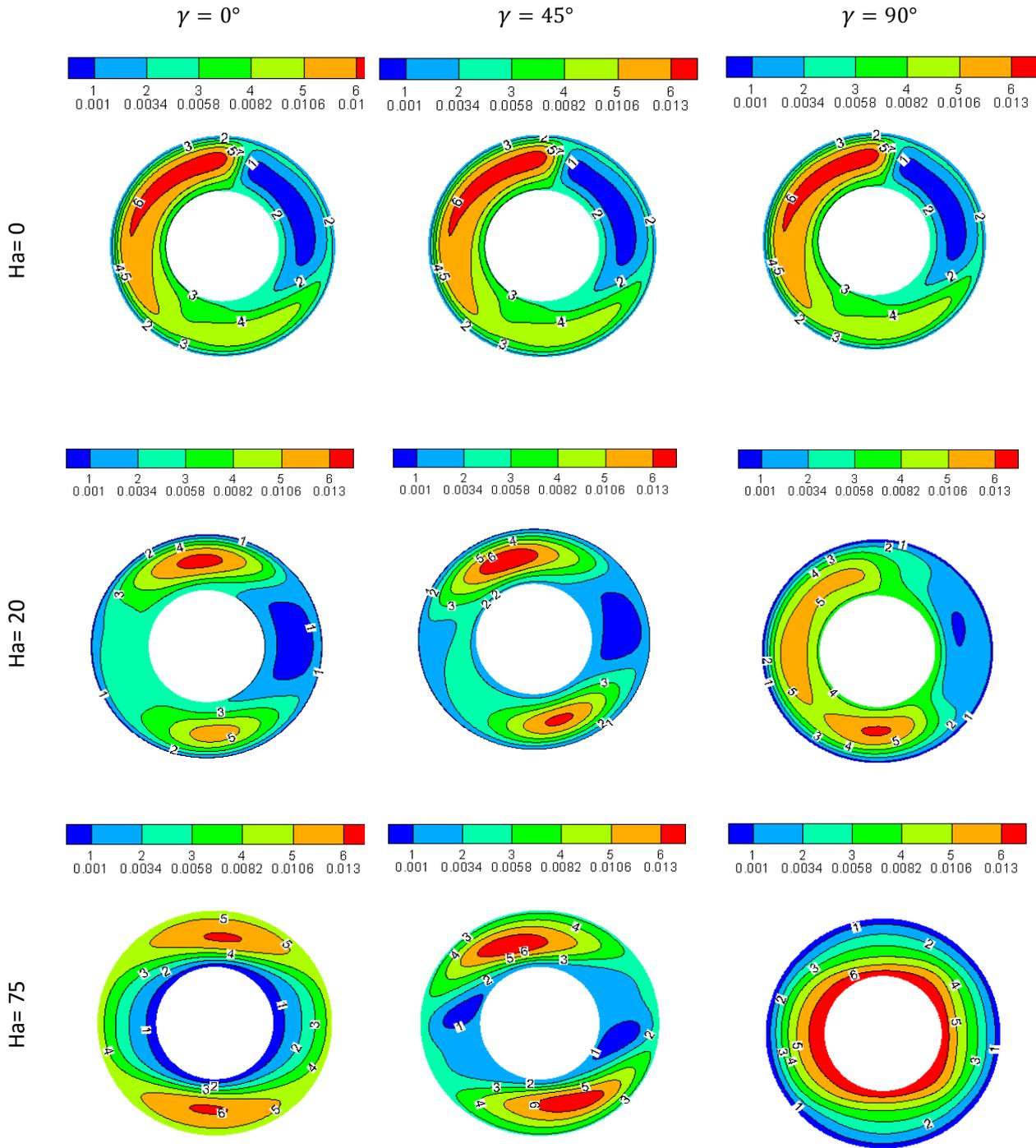


Fig. 11. The effects of increasing the Hartman number and changing the orientation of magnetic field on flow contours in concentric cylinder and single-phase mood at $Re = 50$, $Ra = 100,000$ and $Pr = 6$.

شکل ۱۱. تاثیر افزایش عدد هارتمن و تغییر زاویه میدان مغناطیسی بر روی خطوط جریان در استوانه‌های هم‌مرکز و حالت تک‌فازی در $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 10^5$.

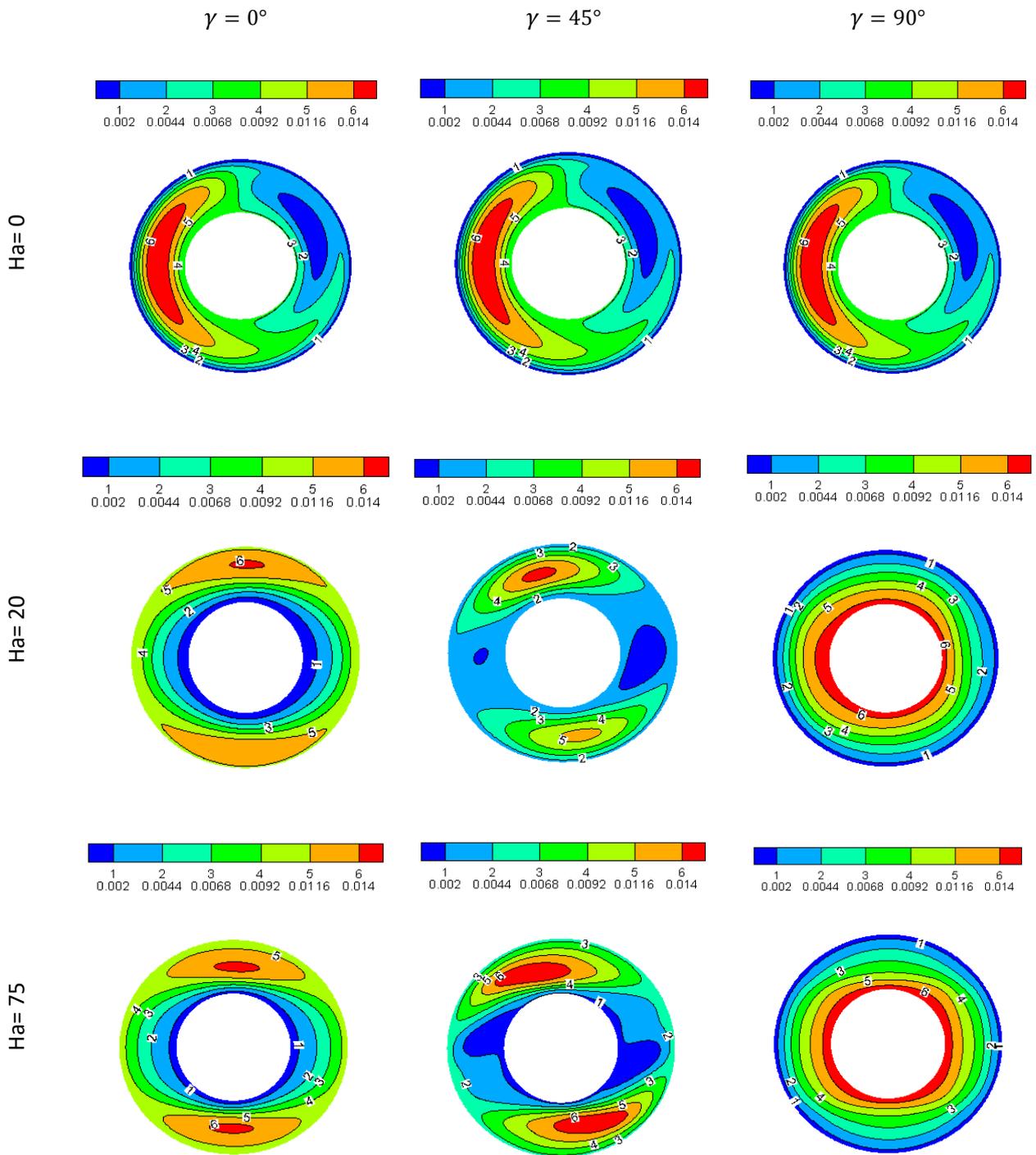


Fig. 12. The effects of increasing the Hartman number and changing the orientation of magnetic field on flow contours in concentric cylinder and two-phase mood at $Re = 50$, $Ra = 100,000$ and $Pr = 6$.

شکل ۱۲. تاثیر افزایش عدد هارتمن و تغییر زاویه میدان مغناطیسی بر روی خطوط جریان در استوانه‌های هم‌مرکز و حالت دوفازی در $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 10^5$.

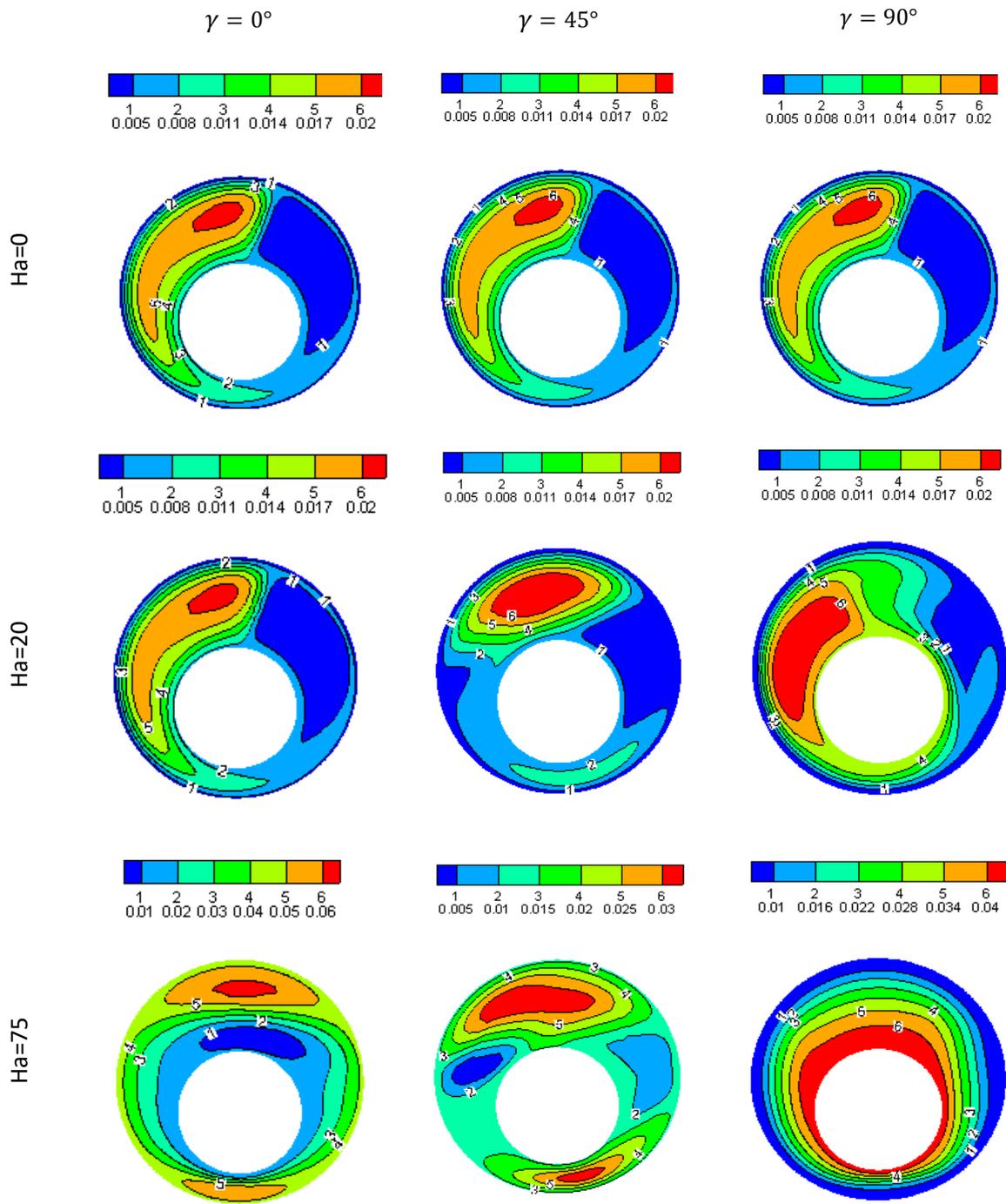


Fig. 13. The effects of increasing the Hartman number and changing the orientation of magnetic field on flow contours in non-concentric cylinder and single-phase mood at $Re = 50$, $Ra = 100,000$ and $Pr = 6$.

شکل ۱۳. تاثیر افزایش عدد هارتمن و تغییر زاویه میدان مغناطیسی بر روی خطوط جریان در استوانه‌های غیرهم‌مرکز و حالت تک‌فازی در $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 10^5$.

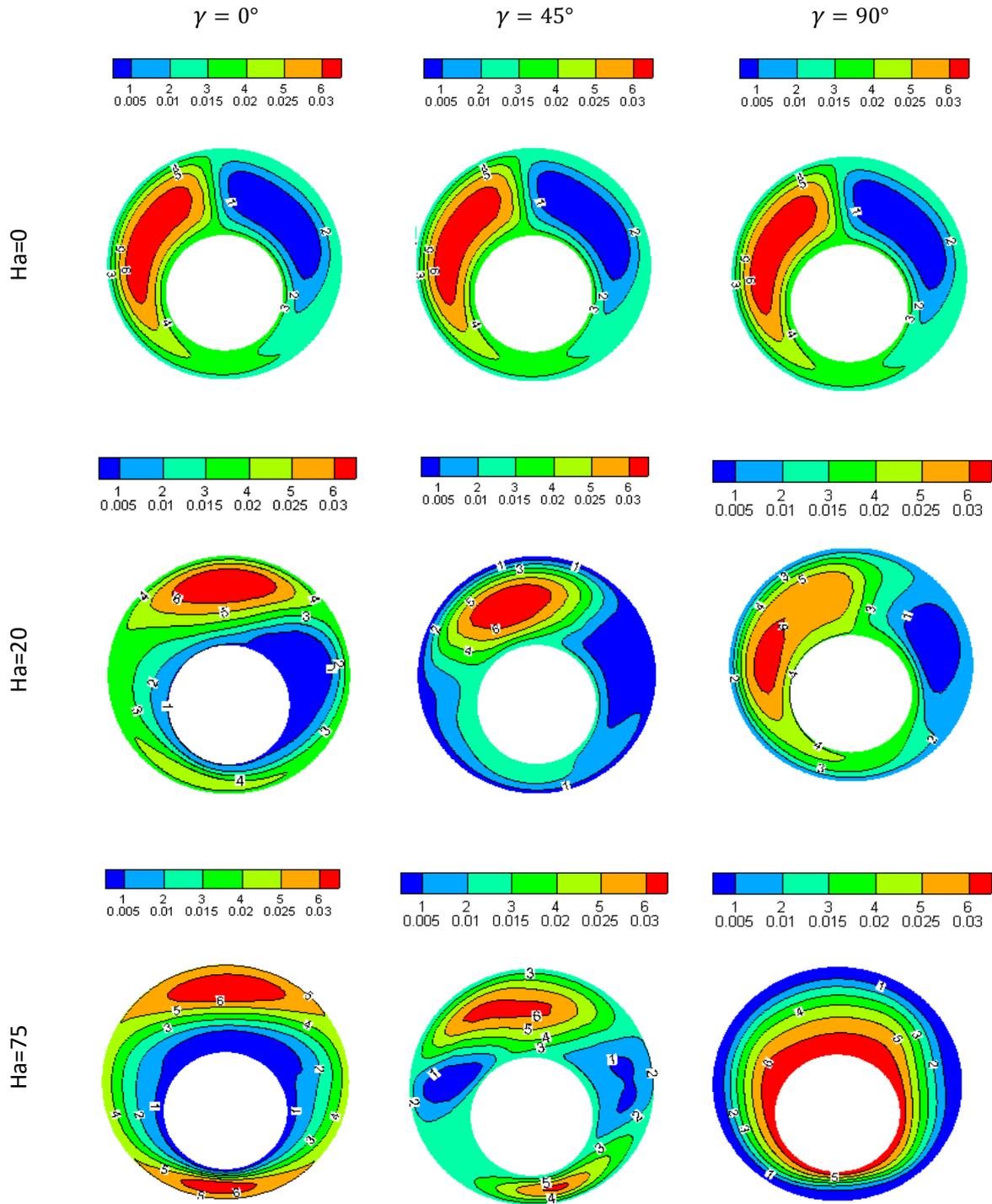


Fig. 14. The effects of increasing the Hartman number and changing the orientation of magnetic field on flow contours in non-concentric cylinder and two-phase mood at $Re = 50$, $Ra = 100,000$ and $Pr = 6$.

شکل ۱۴. تاثیر افزایش عدد هارتمن و تغییر زاویه میدان مغناطیسی بر روی خطوط جریان در استوانه‌های غیرمركز و حالت دوفازی در $Re = 50$ و $Pr = 6$ ، $Ra = 10^5$.

در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نرخ انتقال حرارت کل از دیواره استوانه‌های هم-مرکز و غیرهم‌مرکز در حالت دوفازی نمایش داده شده است. دوفازی در نظر گرفتن نانوسیال به دلیل مطرح کردن حرکت جامد بین ملکول‌های مایع دیدگاه بهتری نسبت به تک‌فازی در نظر گرفتن برای مطالعه جریان نانوسیال است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است در حالت‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز افزایش عدد هارتمن در بازه 0 تا 20 باعث کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود که مقدار آن متناسب با زاویه اعمال میدان مغناطیسی متفاوت است. با خروج از بازه مذکور پارامتر مورد بررسی در هر دو حالت روندی افزایشی دارد به این صورت که با افزایش عدد هارتمن از 20 تا 75 نرخ انتقال حرارت کل نیز افزایش پیدا می‌کند اما همان‌طور که در نمودارها مشخص است نرخ رشد انتقال حرارت برای استوانه‌های غیرهم‌مرکز بسیار بیشتر از استوانه‌های هم‌مرکز می‌باشد. همچنین مشابه با نتایج ارائه شده برای حالت تک‌فازی، در حالت دوفازی نیز کمترین کاهش میزان انتقال حرارت مربوط به زوایای 45 درجه می‌باشد اما بیشترین نرخ کاهش انتقال حرارت مربوط به زاویه 0 درجه می‌باشد. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت که بیشترین رشد انتقال حرارت در استوانه‌های غیرهم‌مرکز رخ داده است که مقدار آن تقریباً 51000 وات می‌باشد. این مقدار در عدد هارتمن 75 و زاویه 45 درجه رخ داده است. با مراجعه به نمودارها می‌توان دریافت که در بازه 0 تا 20 از اعداد هارتمن نمودار مربوط به انتقال حرارت در زاویه 90 درجه از تشابه و نزدیکی قابل قبولی با نمودار مربوط به زاویه 45 درجه برخوردار است.

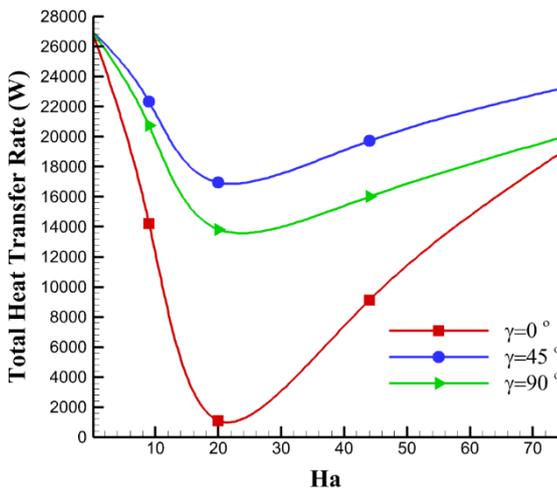


Fig. 17. Comparing the effect of changing the Hartman number on total heat transfer rate in three orientations for concentric cylinders at two-phases condition.

شکل ۱۷. مقایسه تاثیر تغییرات عدد هارتمن روی نرخ انتقال حرارت کل از دیواره در سه راستای مختلف برای استوانه‌های هم‌مرکز در حالت دوفازی.

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نرخ انتقال حرارت کل از دیواره استوانه‌های هم-مرکز و غیرهم‌مرکز در حالت تک‌فازی نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها قابل مشاهده است با افزایش عدد هارتمن از 0 تا 20، نرخ انتقال حرارت روندی کاهشی دارد که این موضوع در استوانه‌های غیرهم‌مرکز مشهودتر می‌باشد. با خروج از بازه مذکور شیب نمودار انتقال حرارت در استوانه‌های غیرهم‌مرکز کاسته می‌شود اما همچنان در هر دو حالت هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز روند کاهشی انتقال حرارت ادامه دارد. همچنین با توجه به نمودارهای ارائه شده در سه زاویه 0، 45 و 90 درجه می‌توان دریافت که اعمال میدان مغناطیسی در زوایای 45 و 90 درجه به ترتیب کمترین و بیشترین کاهش در نرخ انتقال حرارت را به همراه دارند. علاوه بر زوایای مذکور، اعمال میدان مغناطیسی در زاویه 0 درجه متناسب به موقعیت استوانه‌ها روند کاهشی شدید یا کم از خود نشان می‌دهد به نحوی که در استوانه‌های هم‌مرکز با افزایش عدد هارتمن در زاویه صفر درجه نرخ انتقال حرارت کاهش شدیدی را تجربه می‌کند این در حالی است که در استوانه‌های غیرهم‌مرکز این کاهش اندک است.

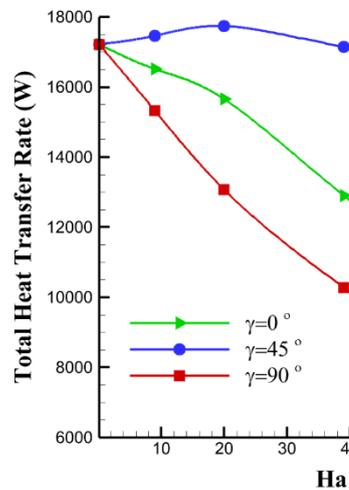


Fig. 15. Comparing the effect of changing the Hartman number on total heat transfer rate in three orientations for concentric cylinders at single-phase condition.

شکل ۱۵. مقایسه تاثیر تغییرات عدد هارتمن روی نرخ انتقال حرارت کل از دیواره در سه راستای مختلف برای استوانه‌های هم‌مرکز در حالت تک‌فازی.

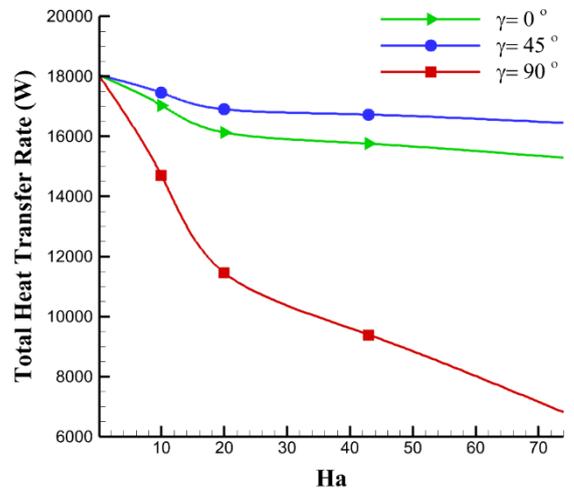


Fig. 16. Comparing the effect of changing the Hartman number on total heat transfer rate in three orientations for non-concentric cylinders at single-phase condition.

شکل ۱۶. مقایسه تاثیر تغییرات عدد هارتمن روی نرخ انتقال حرارت کل از دیواره در سه راستای مختلف برای استوانه‌های غیرهم‌مرکز در حالت تک‌فازی.

P	فشار (Pa)
Pr	عدد پرانتل
r	مختصه شعاعی سامانه استوانه‌ای
R	شعاع استوانه (m)
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
T	دما (K)
T ₀	دما مرجع (K)
\vec{V}	سرعت (ms ⁻¹)
\vec{v}	سرعت نانو ذره (ms ⁻¹)

حروف یونانی

α	ضریب پخش حرارتی (m ² s ⁻¹)
β	ضریب انبساط حجمی (K ⁻¹)
γ	زاویه اعمال میدان مغناطیسی (deg)
θ	دما یی بعد
μ	لزجت دینامیکی (kg m ⁻¹ s ⁻¹)
ν	لزجت سینماتیکی (m ² s ⁻¹)
ρ	چگالی (kgm ⁻³)
ρ_0	چگالی در دمای مرجع (kgm ⁻³)
τ	تنش برشی (N m ⁻²)
ϕ	مختصه زاویه‌ای سامانه استوانه‌ای
φ	کسر حجمی نانو ذرات
$\vec{\nabla}$	عملگر دل
∇^2	عملگر لاپلاسیان

زیرنویس‌ها

f	سیال
i	استوانه داخلی
nf	نانوسیال
o	استوانه خارجی
P	نانوذره

۷ مراجع

- [1] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Introduction to Heat Transfer", Wiley, 2011.
- [2] H. Ma, Z. Ding, Y. Cao, X. Lv, W. Lu, X. Shen and L. Yin, "Characteristics of the heat transfer from a horizontal rotating cylinder surface", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 66, p. 235–242, 2015.
- [3] H. R. T. Bahrami and H. Safikhani, "Heat transfer enhancement inside an eccentric cylinder with an inner rotating wall using porous media: a numerical study", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 141, p. 1905–1917, 2020.
- [4] M. H. Matin and I. Pop, "Numerical Study of Mixed Convection Heat Transfer of a Nanofluid in an Eccentric Annulus", Numerical Heat Transfer, Vol. 65, No. 1, pp. 84-105, 2013.
- [5] T. NathVerma, P. Nashine, D. V. Singh, T. S. Singh and D. Panwar, "ANN: Prediction of an experimental heat transfer analysis of concentric tube heat exchanger with corrugated inner tubes", Applied Thermal Engineering, Vol. 120, pp. 219-227, 2017.
- [6] C. Qi, T. Luo, M. Liu, F. Fan and Y. Yan, "Experimental study on the flow and heat transfer characteristics of nanofluids in double-tube heat exchangers based on

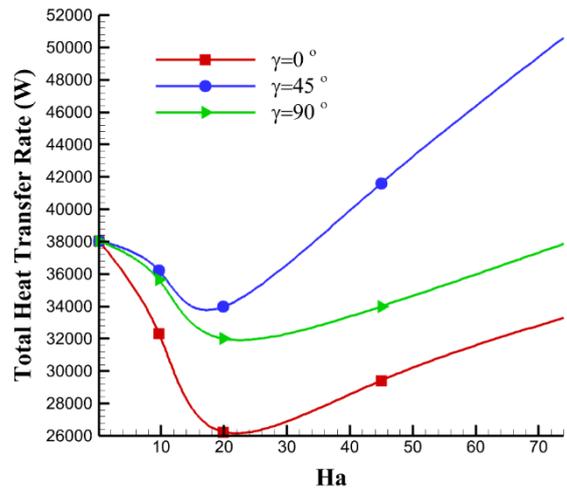


Fig. 18. Comparing the effect of changing the Hartman number on total heat transfer rate in three orientations for non-concentric cylinders at two-phase condition.

شکل ۱۸. مقایسه تاثیر تغییرات عدد هارتمن روی نرخ انتقال حرارت کل از دیواره در سه راستای مختلف برای استوانه‌های غیرهم‌مرکز در حالت دوفازی.

۵ نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر اعداد بدون بعد هارتمن، رایلی، رینولدز و همچنین کسر حجمی نانو ذرات بر روی جریان و انتقال حرارت مرکب نانوسیال (آلومینیوم اکسید/آب) محبوس در فضای بین دو استوانه هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز دوار به کمک شبیه سازی در نرم افزار Fluent مورد بررسی عددی قرار گرفت که نتایج آن به شرح زیر است:

- ❖ پارامترهای عدد رایلی و کسر حجمی نانو ذرات با نرخ انتقال حرارت رابطه مسقیم دارند به نحوی که افزایش این مقادیر باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. این درحالی است که افزایش عدد رینولدز باعث کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود.
- ❖ افزایش شدت میدان مغناطیسی (افزایش عدد هارتمن) در حالت تک-فازی برای استوانه‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز باعث سرکوب الگوهای جریان و در نتیجه کاهش میزان انتقال حرارت می‌شود. اگرچه افزایش این پارامتر در حالت دوفازی برای استوانه‌های مذکور در ابتدا کاهش و سپس افزایش نرخ انتقال حرارت را به همراه داشت. همچنین مشخص شد میزان انتقال حرارت در استوانه‌های غیرهم‌مرکز در مقایسه با استوانه‌های هم‌مرکز در حضور میدان مغناطیسی بیشتر است.

۶ فهرست علائم

B ₀	شدت میدان مغناطیسی (K)
c _p	ظرفیت گرمایی ویژه (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)
D	اختلاف شعاع دو استوانه (m)
D _B	ضریب پخش براونی (m ² s ⁻¹)
d _p	قطر نانو ذره (nm)
D _T	ضریب پخش حرارتی (m ² s ⁻¹)
e	بردار یکه
ec	خروج از مرکزی (%)
g	شتاب گرانش (ms ⁻²)
Ha	عدد هارتمن
k	هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
k _B	ثابت بولتزمان (m ² Kgs ⁻² K ⁻¹)
n	ضریب شکل
p	فشار یی بعد

- magnetic nanofluids under alternating magnetic field*", International Journal of Thermal Sciences, 2021.
- [20] A. H. Pordanjani and S. Aghakhani, "Numerical Investigation of Natural Convection and Irreversibilities between Two Inclined Concentric Cylinders in Presence of Uniform Magnetic Field and Radiation", Heat Transfer Engineering, Vol. 43, No. 11, pp. 937-957, 2022.
- [21] H. R. Mozayyeni and A. B. Rahimi, "Mixed convection in cylindrical annulus with rotating outer cylinder and constant magnetic field with an effect in the radial direction", Scientia Iranica, Vol. 19, No. 1, pp. 91-105, 2011.
- [22] M. Sheikholeslami and M. Shamlooei, "Magnetic source influence on nanofluid flow in porous medium considering shape factor effect", Physics Letters A, Vol. 381, No. 36, pp. 3071-3078, 2017.
- [23] J. Sodagar-Abardeh, P. Nasery, A. Arabkoohsar and M. Farzaneh-Gord, "Numerical Study of Magnetic Field Influence on Three-Dimensional Flow Regime and Combined-Convection Heat Exchange Within Concentric and Eccentric Rotating Cylinders", energy resources technology, Vol. 142, No. 11, pp. 112-115, 2020.
- [24] A. Sadeghianjahromi and C. C. Wang, "Heat transfer enhancement in fin-and-tube heat exchangers – A review on different mechanisms", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020.
- [25] B. C. Pak and Y. I. Cho, "hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion, 2007.
- [26] E. J. Wasp, J. P. Kenny and R. L. Gandhi, "Solid-liquid Flow Slurry Pipeline Transportation", 1977.
- [27] H. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", The Journal of chemical physics, 1952.
- [28] J. s. Yoo, "Mixed convection of air between two horizontal concentric cylinders with a cooled rotating outer cylinder", International journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 2, pp. 293-302, 1997.
- thermal efficiency assessment*", Energy Conversion and Management, 2019.
- [7] S. Aghakhani, B. Ghasemi, A. H. Pordanjani, S. Wongwises and M. Afrand, "Effect of replacing nanofluid instead of water on heat transfer in a channel with extended surfaces under a magnetic field", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2018.
- [8] R. Sureshkumar, S. TharvesMohideen and N. Nethaji, "Heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.
- [9] M. Elias, M. Miqdad, I. M. Mahbulbul, R. Saidur, M. Kamalisarvestani, M. Sohel, ArifHepbasli, N. Rahim and M. Amalina, "Effect of nanoparticle shape on the heat transfer and thermodynamic performance of a shell and tube heat exchanger", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 93-99, 2013.
- [10] M. Zheng, D. Han, F. Asif and Z. Si, "Effect of Al₂O₃/water nanofluid on heat transfer of turbulent flow in the inner pipe of a double-pipe heat exchanger", Heat and Mass Transfer, Vol. 56, pp. 1127–1140, 2020.
- [11] S. Z. Heris, M. N. Esfahany and S. Etemad, "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 203–210, pp. 28, 2006.
- [12] C. T. Nguyen, G. Roy, C. Gauthier and N. Galanis, "Heat transfer enhancement using Al₂O₃-water nanofluid for an electronic liquid cooling system", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 1501–1506, 2006.
- [13] D. Mansoury, F. I. Doshmanziari, A. Kiani, A. J. Chamkha and M. Sharifpur, "Heat transfer and flow characteristics of Al₂O₃/water nanofluid in various heat exchangers: Experiments on counter flow", Heat Transfer Engineering, Vol. 41, pp. 220-234, 2018.
- [14] W. M. El-Maghlany and M. M. AboElazm, "Influence of nanoparticles on mixed convection heat transfer in an eccentric horizontal annulus with rotating inner cylinder", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 63, pp. 259-270, 2016.
- [15] S. O. Giwa, M. Sharifpur, M. H. Ahmadi and J. P. Meyer, "A review of magnetic field influence on natural convection heat transfer performance of nanofluids in square cavities", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020.
- [16] G. Wang, Z. Zhang, R. Wang and Z. Zhu, "A Review on Heat Transfer of Nanofluids by Applied Electric Field or Magnetic Field", nanomaterials, Vol. 10, No. 12, 2020.
- [17] A. Malvandi, S. Moshizi and D. Ganji, "Effect of magnetic fields on heat convection inside a concentric annulus filled with Al₂O₃-water nanofluid", Advanced Powder Technology, Vol. 25, No. 6, pp. 1817-1824, 2014.
- [18] B. Sun, Y. Guo, D. Yang and H. Li, "The effect of constant magnetic field on convective heat transfer of Fe₃O₄/water magnetic nanofluid in horizontal circular tubes", Applied Thermal Engineering, Vol. 171, pp. 114920, 2020.
- [19] X. Zhang and Y. Zhang, "Experimental study on enhanced heat transfer and flow performance of