

## اثرات تابش گرمایی بر جریان همرفت اجباری نانو سیال آب-اکسید مس در یک محفظه دوزنقه‌ای شکل در حضور حرکت براونی

**میثم آتش افروز\*** دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران، m.atashafrooz@sirjantech.ac.ir  
**یعقوب دکمایی** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران، yaghoob.dackmaei@yahoo.com  
**طاہرہ اسدی** استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران، t.asadi@sirjantech.ac.ir

### چکیده

در پژوهش حاضر، اثرات تابش گرمایی بر جریان همرفت اجباری نانو سیال در یک محفظه دوزنقه‌ای شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این محفظه دارای دو دیوار جانبی شیبدار و دو مجرای ورودی و خروجی مستقل است. برای مدل سازی دیوارهای شیبدار این محفظه، روش بسیار دقیق و کارآمد انسداد بهبود یافته بکار گرفته می‌شود. معادله انرژی در این مطالعه، شامل هر سه مکانیزم انتقال گرمای رسانی، همرفتی و تابشی است. برای محاسبه اثرات مکانیزم انتقال گرمای تابشی در این معادله، از تقریب روزلند استفاده می‌شود. نانو سیال مورد مطالعه در این تحقیق، نانو سیال آب-اکسید مس بوده که برای محاسبه خواص ترمو فیزیکی آن، اثرات حرکت براونی نیز در نظر گرفته شده است. اثرات متقابل پارامتر تابش و درصد حجمی نانو ذرات اکسید مس بر رفتارهای گرمایی جریان سیال با رسم نمودارهای دمای بی بعد در محفظه و توزیع عددهای ناسلت همرفتی، تابشی و کل روی دیوار پایینی آن، مورد بررسی قرار می‌گیرند. از نتایج این پژوهش به‌خوبی مشخص است که بیشترین مقدار آهنگ انتقال گرمای کل روی دیوار پایینی محفظه مورد مطالعه، مربوط به حالت  $Rd = 1$  و  $\phi = 0.06$  است.

**واژه‌های کلیدی:** تابش گرمایی، همرفت اجباری، تقریب روزلند، نانو سیال، حرکت براونی، محفظه دوزنقه‌ای شکل.

### Influences of Thermal Radiation on Forced Convection Flow of Water-Copper Oxide Nanofluid in a Trapezoidal Enclosure in the Presence of Brownian Motion

**M. Atashafrooz** Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran  
**Y. Dackmaei** Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran  
**T. Asadi** Department of Chemical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

#### Abstract

In the present research, the effects of thermal radiation on forced convection flow of nanofluid in a trapezoidal enclosure are investigated. This enclosure has two inclined side walls and two independent inlet and outlet ducts. For modeling the inclined walls of this enclosure, the modified blocked-off method is employed. Energy equation in this study involves all three conductive, convective and radiative heat transfer mechanisms. To calculate the impacts of radiative heat transfer mechanism in this equation, the Rosseland approximation is utilized. The nanofluid studied in this research is water-copper oxide nanofluid, which to calculate its thermo-physical properties, the effects of Brownian motion have also been considered. Interacting influences of radiative parameter and concentrations of copper oxide nanoparticles on thermal behaviors of fluid flow are investigated by plotting the dimensionless temperature profiles in the enclosure and the distributions of convective, radiative and total Nusselt numbers on its bottom wall. It is clear from the results of this research that the highest value of the total heat transfer rate on the enclosure bottom wall is related to the case of  $Rd = 1$  and  $\phi = 0.06$ .

**Keywords:** Thermal radiation, Forced convection, Rosseland approximation, Nanofluid, Brownian motion, Trapezoidal enclosure.

[۶] به بررسی عددی تاثیر دیوارهای متحرک مختلف بر جریان همرفت سیال در یک محفظه مربعی شکل دارای محیط متخلخل پرداختند. از نتایج این تحقیق به‌خوبی مشخص است که عددهای گراشف و دارسی تاثیر مهمی در تعیین رفتارهای هیدرودینامیکی و گرمایی جریان دارند. در تحقیقی دیگر، مسعود و همکاران [۷]، تاثیر نیروی شناوری بر جریان همرفت سیال در محفظه‌های دارای شکل‌های مختلف را بطور عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهد که مقادیر آهنگ انتقال گرما روی دیوارهای داغ محفظه‌ها بطور قابل توجهی با افزایش عددهای رینولدز و گراشف افزایش می‌یابند. توران و

#### ۱- مقدمه

محفظه‌های دارای شکل‌های مختلف از مهم‌ترین هندسه‌هایی هستند که در طراحی بسیاری از تجهیزات گرمایی و صنایع مهندسی، کاربردهای فراوانی دارند. مبادله‌کن‌های گرمایی، حوضچه‌های خورشیدی، تجهیزات هسته‌ای و سیستم‌های خنک کن وسایل الکترونیکی از مهمترین این تجهیزات و صنایع هستند. از این رو، مطالعه جریان همرفت در این محفظه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است [۱-۵]. از میان مطالعات انجام شده در این زمینه، روی و همکاران

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.atashafrooz@sirjantech.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۲/۱۲

همکاران [۹-۸]، به مطالعه عددی جریان همرفت سیالات غیر نیوتنی در یک محفظه استوانه‌ای شکل دارای یک دیوار گرم متحرک پرداختند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که عددهای رایلی، رینولدز و پرانتل تاثیر چشمگیری بر مقادیر آهنگ انتقال گرما روی دیوارهای محفظه دارند. در تحقیقاتی دیگر، سجادی و همکاران [۱۰] و دسوکی و همکاران [۱۱] به بررسی عددی تاثیر نیروی لورنتز<sup>۱</sup> بر جریان همرفت سیال در محفظه‌های سه بعدی و دو بعدی پرداختند. از نتایج این مطالعات به خوبی مشخص است که مقدار نیروی لورنتز نقش مهمی در تعیین مقادیر آهنگ انتقال گرما در محفظه‌های مختلف دارد.

کنترل آهنگ انتقال گرما در تجهیزات و سیستم‌های مهندسی، یکی دیگر از مهمترین دغدغه‌های محققین علوم گرمایی در طراحی بهینه این سیستم‌ها است. تاکنون مطالعات فراوانی از سوی محققین مختلفی در این زمینه انجام شده است. در این تحقیقات، تکنیک‌ها و روش‌های متعددی جهت پیش بینی و کنترل رفتارهای گرمایی جریان سیال در هندسه‌های مختلف ارائه شده است. یکی از روش‌های کاربردی و مفید ارائه شده در این زمینه، تکنیک اضافه نمودن نانو ذرات جامد<sup>۲</sup> دارای رسانایی گرمایی بالا به سیالات پایه دارای رسانایی گرمایی پایین و تشکیل نانو سیالات است [۱۳-۱۲]. در حقیقت، با اضافه نمودن غلظت مشخصی از نانو ذرات جامد به سیالات پایه، می‌توان آهنگ انتقال گرما در سیستم‌های مهندسی را تا حد قابل توجه و مشخصی افزایش داد [۱۶-۱۴].

با توجه به اهمیت نانو سیالات در کنترل آهنگ انتقال گرما در سیستم‌های مهندسی، محققین متعددی به بررسی تجربی و عددی اثرات نانو ذرات جامد بر جریان همرفت سیال در محفظه‌های مختلف پرداخته‌اند [۲۱-۱۷]. از میان این تحقیقات، احمد و همکاران [۲۲] به بررسی عددی اثرات نانو ذرات مختلف نظیر نقره، مس، اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم بر رفتارهای گرمایی جریان سیال در یک محفظه دارای دو دیوار متحرک پرداختند. سجادی و همکاران [۲۳] به مطالعه عددی اثرات متقابل نانو ذرات جامد و میدان مغناطیسی بر جریان همرفت ترکیبی در یک محفظه مکعبی شکل پرداختند. معادلات حاکم در این تحقیق، با بکارگیری یک روش شبکه بولتزمن توسعه یافته حل شده‌اند. در یک تحقیق جامع و مروری، ایزدی و همکاران [۲۴] به بررسی مطالعات عددی و تجربی گذشته پیرامون تاثیر نانو سیالات مختلف بر رفتارهای هیدروپدینامیکی و گرمایی جریان همرفت ترکیبی در محفظه‌های مختلف پرداختند. محمد و همکاران [۲۵]، جریان همرفت ترکیبی نانو سیال نقره- اتلین گلیکول در یک محفظه دارای یک گرم کن را بطور عددی مورد بررسی قرار دادند. از نتایج این پژوهش مشخص است که غلظت نانو ذرات نقره و قدرت گرم کن اثرات چشمگیری بر رفتارهای گرمایی جریان سیال در محفظه مورد مطالعه دارند. در یکی از آخرین تحقیقات، یان و همکاران [۲۶] به بررسی عددی اثرات درصد حجمی نانو ذرات جامد و عدد ریچاردسون بر مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیوارهای یک محفظه دارای جریان همرفت ترکیبی پرداختند. در این تحقیق گزارش شده است که با افزایش عدد ریچاردسون و غلظت نانو ذرات جامد، مقادیر آهنگ انتقال

گرما بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

یکی دیگر از دغدغه‌های محققین علوم گرمایی، شبیه سازی دقیق سیستم‌های گرمایی است. با در نظر گرفتن اثرات مکانیزم انتقال گرمایی تابشی در کنار مکانیزم‌های انتقال گرمایی رسانشی و همرفتی می‌توان به نتایج دقیقتری در شبیه سازی سیستم‌های گرمایی دست یافت [۳۰-۲۷]. تاکنون، محققین متعددی به بررسی عددی اثرات متقابل مکانیزم‌های انتقال گرمایی تابشی و همرفتی در سیستم‌های گرمایی پرداخته‌اند [۳۳-۳۱]. تعدادی از این تحقیقات مربوط به جریان همرفت نانو سیالات در هندسه‌های مختلف و از جمله هندسه محفظه بوده است [۴۰-۳۴]. از میان این مطالعات، صفایی و همکاران [۴۱] به بررسی عددی انتقال گرمایی مرکب همرفتی و تابشی در یک محفظه مربعی شکل پر شده با نانو سیالات پرداختند. برای حل عددی معادلات حاکم در این تحقیق، از روش شبکه بولتزمن استفاده شده است. از نتایج این تحقیق مشخص است که رفتارهای هیدروپدینامیکی و گرمایی جریان سیال در محفظه بطور چشمگیری وابسته به مقادیر پارامتر تابش و غلظت نانو ذرات جامد هستند. در تحقیقاتی دیگر، شیخ الاسلامی و همکاران [۴۴-۴۲] به مطالعه عددی اثرات متقابل نانو ذرات جامد و تابش گرمایی بر جریان همرفت ترکیبی در یک محفظه دارای محیط متخلخل<sup>۳</sup> در حضور میدان مغناطیسی پرداختند. در این تحقیقات گزارش شده است که غلظت نانو ذرات جامد، پارامتر تابش، عدد دارسی و عدد هارتمن تاثیر بسزایی بر مقادیر آهنگ انتقال گرما روی دیوارهای محفظه دارند.

اگرچه تاکنون تحقیقات متعددی برای مطالعه انتقال گرمایی مرکب تابشی- همرفتی در هندسه‌های مختلف در حضور و عدم حضور نانو سیالات انجام شده است؛ اما بر اساس اطلاعات نویسندگان، تاثیر تابش گرمایی بر جریان همرفت اجباری نانو سیالات در حضور حرکت براونی<sup>۴</sup> در یک محفظه دوزنقه‌ای شکل<sup>۵</sup> که دارای دو مجرای ورودی و خروجی مستقل است، توسط محققین دیگر مورد مطالعه و آنالیز قرار نگرفته است. بنابراین، در این تحقیق تلاش می‌شود تا برای اولین بار، اثرات متقابل تابش گرمایی و غلظت نانو ذرات جامد اکسید مس (در حضور حرکت براونی) بر رفتارهای گرمایی جریان سیال در این نوع محفظه‌ها که نقش مهمی در طراحی سیستم‌های گرمایی دارند، بطور عددی مورد بررسی قرار گیرد. لازم بذکر است، برای مدل سازی دیوارهای شیبدار محفظه دوزنقه‌ای شکل، از روش بسیار دقیق و کارآمد انسداد بهبود یافته استفاده می‌شود. همچنین، با توجه به هندسه پیچیده محفظه و شرایط بکار گرفته شده در این مطالعه، می‌توان انتظار داشت که نتایج ارائه شده در این هندسه به عنوان یک هندسه معیار برای معتبرسازی نتایج تحقیقات دیگر مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲- شرح مسئله و بیان شرایط مرزی

مسئله مورد مطالعه در این تحقیق به صورت یک محفظه دوزنقه‌ای شکل دارای دو مجرای ورودی و خروجی مستقل است. هندسه این محفظه در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>3</sup> Porous media

<sup>4</sup> Brownian motion

<sup>5</sup> Trapezoidal enclosure

<sup>1</sup> Lorentz force

<sup>2</sup> Solid nanoparticles

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_f \quad (5)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} + \mu_{Brownian} \quad (6)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{3 \left( \frac{k_s}{k_f} - 1 \right) \phi}{\left( \frac{k_s}{k_f} + 2 \right) - \left( \frac{k_s}{k_f} - 1 \right) \phi} + k_{Brownian} \quad (7)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_s + (1 - \phi) (\rho C_p)_f \quad (8)$$

زیر نویسهای  $s, f$  و  $nf$  در روابط بالا، به ترتیب نشان دهنده خواص آب، نانو ذرات اکسید مس و نانو سیال آب-اکسید مس و متغیر  $\phi$  نشان دهنده غلظت نانو ذرات اکسید مس است. همچنین، عبارات  $\mu_{Brownian}$  و  $k_{Brownian}$  در این معادلات، مربوط به تاثیر حرکت براونی بر خواص ترموفیزیکی نانوسیال بوده که با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند [۱۹ و ۴۴]:

$$\mu_{Brownian} = \frac{k_{Brownian}}{k_f} \times \frac{k_f}{C_{pf}} \quad (9)$$

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \times \sqrt{\frac{k_b T}{\rho_s d_s}} \times \phi (\rho C_p)_f \times \Psi(T, \phi, d_s) \quad (10)$$

عبارات  $k_b$  و  $d_s$  در رابطه (۱۰) به ترتیب نشان دهنده ثابت بولتزمن و قطر نانو ذرات اکسید مس هستند. همچنین، در این معادلات [۱۹ و ۴۴]:

$$\Psi(T, \phi, d_s) = A \ln(T) + B \quad (11)$$

$$A = A_1 + A_2 \ln(d_s) + A_3 \ln(\phi) + A_4 \ln(d_s) \ln(\phi) + A_5 \ln(d_s)^2 \quad (12)$$

$$B = B_1 + B_2 \ln(d_s) + B_3 \ln(\phi) + B_4 \ln(d_s) \ln(\phi) + B_5 \ln(d_s)^2 \quad (13)$$

مقادیر ثابت‌های  $A_i$  و  $B_i$  در جدول ۲ ارائه شده‌اند [۱۹].

جدول ۲- مقادیر ثابت‌های  $A_i$  و  $B_i$  در معادلات (۱۲) و (۱۳)

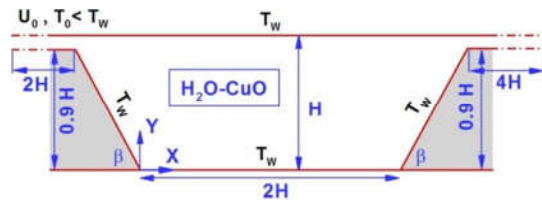
$A_1$	-۲۶/۵۹۳۳۱۰۸۴۶	$B_1$	۴۸/۴۰۳۳۶۹۵۵
$A_2$	-۰/۴۰۳۸۱۸۳۳۳	$B_2$	-۹/۷۸۷۷۵۶۶۸۳
$A_3$	-۳۳/۳۵۱۶۸۰۵	$B_3$	۱۹۰/۲۴۵۶۱۰۰۰۹
$A_4$	-۱/۹۱۵۸۲۵۵۹۱	$B_4$	۱۰/۹۲۸۵۳۸۶۵۶۵
$A_5$	۰/۰۶۴۲۱۸۵۸۴۶۶۵۸	$B_5$	-۰/۷۲۰۰۹۹۸۳۶۶۴

لازم بذکر است که روابط ارائه شده برای محاسبه خواص نانو سیال در مواردی که غلظت نانو ذرات کمتر از ۶ درصد است، بسیار دقیق و قابل قبول هستند [۱۹، ۲۳، ۳۶ و ۴۳-۴۴].

همچنین، عبارت  $\nabla \cdot \vec{q}_r$  در معادله انرژی نشان دهنده دیورژانس شار تابشی است. بر اساس تقریب روزلند<sup>۲</sup>، شار تابشی برای سیال مورد استفاده در این تحقیق به صورت زیر قابل بیان است [۳۴]:

$$\vec{q}_r = \frac{-4C_{SB}}{3C_a} \frac{\partial T^4}{\partial x} \vec{i} + \frac{-4C_{SB}}{3C_a} \frac{\partial T^4}{\partial y} \vec{j} \quad (14)$$

بنابراین، دیورژانس شار تابشی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۴]:



شکل ۱- هندسه محفظه دوزنقه‌ای شکل مورد مطالعه

بر اساس این شکل، شیب دیوارهای جانبی محفظه نسبت به محور افقی برابر با  $\beta = 60^\circ$  در نظر گرفته شده است. ارتفاع محفظه و طول دیوار پایینی آن به ترتیب برابر با  $H$  و  $2H$  انتخاب شده‌اند. همچنین، طول مجراهای ورودی و خروجی جریان به ترتیب برابر با  $2H$  و  $4H$  بوده، در حالیکه ارتفاع این دو مجرا یکسان و برابر با  $0.1H$  است. این محفظه با نانو سیال آب-اکسید مس ( $H_2O - CuO$ ) پر شده است. خواص ترموفیزیکی<sup>۱</sup> اجزای سازنده این نانو سیال شامل آب و نانو ذرات اکسید مس در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب و نانو ذرات اکسید مس [۱۹]

خاصیت	اکسید مس	آب
$\rho (kg/m^3)$	۶۵۰۰	۹۹۷/۱
$\mu (kg/m.s)$	-	۰/۰۰۱۰۰۳
$k (W/m.K)$	۱۸	۰/۶۱۳
$C_p (J/kg.K)$	۵۴۰	۴۱۷۹

## ۱-۲- شرایط مرزی

تمام دیوارهای محفظه و دیوارهای دو مجرای ورودی و خروجی صلب بوده و اصل عدم لغزش روی آنها برقرار است ( $u = v = 0$ ). بعلاوه، تمامی این دیوارها گرم و دارای دمای  $T_w$  فرض شده‌اند. همچنین، جریان با سرعت یکنواخت ( $u = U_0, v = 0$ ) و دمای سرد ( $T_0 < T_w$ ) وارد مجرای ورودی شده و با شرایط توسعه یافتگی هیدرودینامیکی ( $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$ ) و گرمایی ( $\frac{\partial T}{\partial x} = Cte$ ) از مجرای خروجی خارج می‌شود.

## ۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله مورد مطالعه در این تحقیق، به صورت زیر

بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho_{nf} C_{p_{nf}} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \nabla \cdot \vec{q}_r \quad (4)$$

در این معادلات، عبارات  $C_{p_{nf}}, \mu_{nf}, \rho_{nf}$  به ترتیب نشان دهنده چگالی، لزجت دینامیکی، رسانایی گرمایی و گرمای ویژه نانو سیال بوده و از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۲ و ۱۹]:

<sup>2</sup> Rosseland approximation

<sup>1</sup> Thermophysical properties

$$Nu_t(X) = Nu_c(X) + Nu_r(X) = -\left(\frac{k_{nf}}{k_f} + \frac{4}{3}Rd\right) \frac{1}{\theta_w - \theta_b} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (24)$$

در روابط بالا، عبارت  $\theta_b$  معرف دمای متوسط توده‌ای<sup>۲</sup> بوده و به- صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_b = \frac{\int_0^1 U \theta dY}{\int_0^1 U dY} \quad (25)$$

همچنین مقادیر عددهای ناسلت همرفتی متوسط ( $\overline{Nu}_c$ )، تابشی متوسط ( $\overline{Nu}_r$ ) و کل متوسط ( $\overline{Nu}_t$ ) روی دیوار پایینی محفظه به- صورت قابل محاسبه هستند:

$$\overline{Nu}_c = \frac{1}{2} \int_0^2 \left( -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{1}{\theta_w - \theta_b} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \right) dX \quad (26)$$

$$\overline{Nu}_r = \frac{1}{2} \int_0^2 \left( -\left(\frac{4}{3}Rd\right) \frac{1}{\theta_w - \theta_b} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \right) dX \quad (27)$$

$$\overline{Nu}_t = \frac{1}{2} \times \int_0^2 \left( -\left(\frac{k_{nf}}{k_f} + \frac{4}{3}Rd\right) \frac{1}{\theta_w - \theta_b} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \right) dX \quad (28)$$

#### ۴- حل عددی معادلات حاکم

برای بدست آوردن میدان‌های بی بعد سرعت ( $U, V$ ) و دما ( $\theta$ ) در محفظه مورد مطالعه، ابتدا شکل بدون بعد معادلات حاکم (معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی) با بکارگیری روش حجم محدود (انتگرال گیری روی حجم هر المان) گسسته می‌شوند. سپس این معادلات گسسته شده با استفاده از یک روش هیبریدی و با بکارگیری الگوریتم-های SIMPLE [۴۵] و ماتریس سه قطری به‌صورت تکراری حل شده تا معیارهای همگرایی بصورت زیر ارضا شوند:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\Pi^\lambda(m, n) - \Pi^{\lambda-1}(m, n)| \leq 10^{-5} \quad (29)$$

$$\text{Max} \left| \frac{\Pi^\lambda(m, n) - \Pi^{\lambda-1}(m, n)}{\Pi^\lambda(m, n)} \right| \leq 10^{-5} \quad (30)$$

در این روابط، عبارت  $\lambda$  نشان دهنده مرحله تکرار و متغیر  $\Pi$  بیان کننده میدان‌های فشار بی بعد ( $P$ )، سرعت بی بعد ( $U, V$ ) و دمای بی بعد ( $\theta$ ) است. همچنین، عبارات  $M$  و  $N$  به ترتیب معرف تعداد حجم کنترل‌ها در راستای محورهای  $X$  و  $Y$  هستند. لازم بذکر است که برای اجرای الگوریتم عددی ارائه شده و انجام کلیه محاسبات، از یک برنامه کامپیوتری نوشته شده به زبان فورترن ۹۰ استفاده می‌شود.

#### ۴-۱- ایجاد شبکه و روش انسداد بهبود یافته

اولین قدم در حل عددی معادلات حاکم، ایجاد شبکه است. در تحقیق حاضر، تعداد تقسیمات  $420 \times 80$  در جهت  $X \times Y$  به عنوان شبکه بهینه بدست آمده است. لازم بذکر است که در انتخاب این شبکه، کلیه اصول لازم از جمله بررسی نتایج استقلال از شبکه، لحاظ شده است (به جدول ۳ رجوع شود). همچنین، ذکر این نکته ضروری است که برای داشتن نتایج دقیقتر، این شبکه در نزدیکی دیوارهای محفظه، متراکم‌تر و ریزتر است.

$$\nabla \cdot \vec{q}_r = \frac{-16(T_0)^3 C_{SB}}{3C_a} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (15)$$

لازم بذکر است برای تقریب عبارت  $T^4$  در معادله (۱۴)، از سری تیلور<sup>۱</sup> به شرح زیر استفاده شده است:

$$T^4 = 4(T_0)^3 T - 3(T_0)^4 \quad (16)$$

همچنین، عبارت‌های  $C_a$  و  $C_{SB}$  در معادلات (۱۴) و (۱۵) به ترتیب ثابت استفان بولتزمن  $\left(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}\right)$  و ضریب جذب میانگین<sup>۲</sup> نانوسیال هستند.

#### ۳-۱- معادلات حاکم بدون بعد

با بکارگیری عبارات بی بعد زیر، می‌توان شکل بدون بعد معادلات حاکم بر مسئله مورد مطالعه در این تحقیق را بدست آورد:

$$\begin{aligned} (X, Y) &= \left( \frac{x}{H}, \frac{y}{H} \right) & P &= \frac{p}{\rho U_0^2} & Re &= \frac{\rho_f U_0 H}{\mu_f} \\ (U, V) &= \left( \frac{u}{U_0}, \frac{v}{U_0} \right) & Pr &= \frac{\mu_f C_{pf}}{k_f} & \theta &= \frac{T - T_0}{T_w - T_0} \end{aligned} \quad (17)$$

$$Rd = \frac{4(T_0)^3 C_{SB}}{k_f C_a}$$

بر این اساس، شکل‌های بدون بعد معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی بصورت زیر قابل ارائه هستند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \left( U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \left( U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{(\rho C_p)_{nf}}{(\rho C_p)_f} \left( U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) &= \frac{1}{Re Pr} \frac{k_{nf}}{k_f} \times \\ &\left( 1 + \frac{4}{3} Rd \left( \frac{k_{nf}}{k_f} \right)^{-1} \right) \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

#### ۳-۲- متغیرهای مورد بررسی

در سیستم‌های گرمایی همرفتی-تابشی، انتقال گرما بین یک دیوار و جریان سیال از دو طریق زیر صورت می‌گیرد:

۱- گزادیان دما روی دیوار

۲- آهنگ خالص شار تابشی مبادله شده بین دیوار و جریان سیال

در حقیقت، شار گرمایی کل خروجی ( $q_t$ ) از یک دیوار برابر با مجموع شارهای گرمایی همرفتی ( $q_c$ ) و تابشی ( $q_r$ ) است. بنابراین، می‌توان گفت که عدد ناسلت کل ( $Nu_t$ ) روی یک دیوار نیز برابر با مجموع عددهای ناسلت همرفتی ( $Nu_c$ ) و تابشی ( $Nu_r$ ) است. بهرحال، مقادیر این عددها روی دیوار پایینی محفظه مورد مطالعه به‌صورت زیر قابل محاسبه هستند [۳۶]:

$$Nu_c(X) = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{1}{\theta_w - \theta_b} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (22)$$

$$Nu_r(X) = -\left(\frac{4}{3}Rd\right) \frac{1}{\theta_w - \theta_b} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (23)$$

<sup>1</sup> Taylor series

<sup>2</sup> Mean absorption coefficient

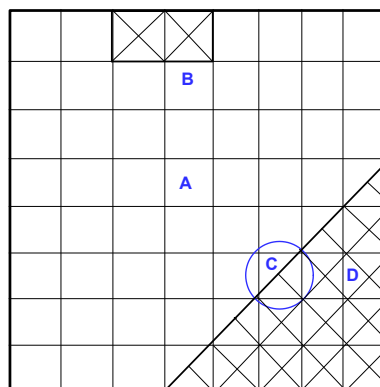
<sup>3</sup> Mean bulk temperature

جدول ۳- انتخاب شبکه بهینه برای حل عددی معادلات حاکم  
( $Rd = 0.5, \phi = 0.02$ )

اندازه شبکه	عدد ناسلت کل متوسط روی دیوار پایینی محفظه
۳۰۰×۵۰	۵/۳۴۱
۳۲۰×۶۰	۵/۷۸۳
۳۶۰×۷۰	۶/۰۱۲
۴۲۰×۸۰	۶/۴۷۵
۴۶۰×۹۰	۶/۴۹۶

بعلاوه، برای شبیه سازی سطوح مورب محفظه دوزنقه‌ای شکل، از روش بسیار دقیق و کارآمد انسداد بهبود یافته<sup>۱</sup> استفاده شده است [۲۸ و ۳۰]. این روش تقریباً مشابه با روش انسداد معمولی است. در حقیقت، تفاوت این دو روش مربوط به نحوه شبیه سازی دیوارهای شیبدار یا منحنی است. روش انسداد بهبود یافته شامل ترسیم یک دامنه اسمی در اطراف دامنه اصلی (فیزیکی یا واقعی) است. به بیان دیگر در این روش، برای ایجاد تمایز بین سلول‌ها در مناطق فعال و غیر فعال، یک فایل دامنه برای هر هندسه ایجاد می‌شود. در شکل ۲، طرحی از نحوه مدل سازی سطوح شیبدار در مختصات دکارتی با استفاده از روش انسداد بهبود یافته، نشان داده شده است.

در این شکل، سلول‌های A و D به ترتیب سلول‌های فعال و غیر فعال هستند. علاوه بر این، محل مرزهای داخلی در دامنه اسمی تنظیم شده و یک فایل شرط مرزی برای این مرزها تعریف می‌شود. برای آن دسته از مرزهای داخلی که موازی با محور مختصات هستند، فایل شرط مرزی شامل آن دسته از حجم‌های کنترل در دامنه فیزیکی است که نزدیک به مرزهای داخلی هستند (سلول B). اما، برای مرزهای داخلی منحنی و شیبدار، فایل شرط مرزی شامل سلول‌هایی است که با مرز داخلی تقاطع دارند (سلول C). لازم به ذکر است که با استفاده از روش انسداد بهبود یافته، سطوح شیبدار یا منحنی، دقیقاً مشابه سطوح نامنظم واقعی مدل سازی می‌شوند. جزئیات بیشتر این مدل سازی در مراجع [۲۸ و ۳۰] بطور کامل شرح داده شده است، بنابراین برای پرهیز از تکرار، این توضیحات اینجا ارائه نمی‌گردند.



شکل ۲- طرحی از شبیه سازی سطوح شیبدار در مختصات دکارتی با استفاده از روش انسداد بهبود یافته [۲۸ و ۳۰]

<sup>1</sup> Modified blocked-off method

#### ۴-۲- اعتبار سنجی نتایج

برای اطمینان از صحت و دقت محاسبات عددی انجام شده در مطالعه حاضر، نتایج حاصل از برنامه کامپیوتری نوشته شده در این تحقیق با نتایج ارائه شده در مراجع [۲۲]، [۲۶] و [۴۶] مقایسه شده‌اند. هندسه‌های مورد مطالعه در این مراجع به صورت محفظه‌های مربعی شکل با شرایط مرزی مختلف هستند. این مقایسه‌ها برای جریان همرفت ترکیبی سیال در حضور و عدم حضور نانو ذرات جامد انجام شده است. بهرحال، نتایج و اطلاعات مربوط به این مقایسه‌ها با ارائه مقادیر عدد ناسلت متوسط در جداول ۴ و ۵ آورده شده است. همانطور که از این جداول به‌خوبی مشخص است، الگوریتم عددی بکار گرفته شده در این تحقیق، دارای دقت بسیار بالا و قابل قبولی است.

جدول ۴- مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیوار بالایی یک محفظه

مطالعه حاضر	مرجع [۲۲]	عدد رینولدز
۱/۹۶	۱/۹۳	۱۰۰
۳/۹۳	۳/۹۱	۴۰۰
۶/۳۴	۶/۳۱	۱۰۰۰

جدول ۵- مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیوار پایینی یک محفظه

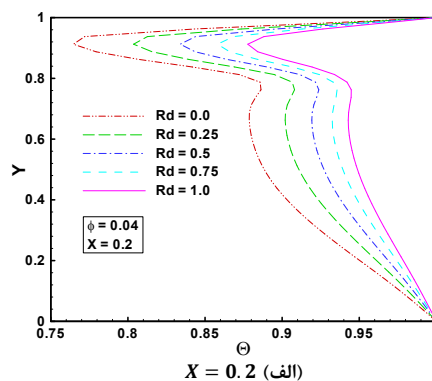
مطالعه حاضر	مرجع [۲۶]	مرجع [۴۶]	عدد ریچاردسون
۰/۰۱	۰	۰	غلظت نانو ذرات جامد
۱/۸۷	۱/۶۵	۴/۸۶	مرجع [۲۶]
۱/۹۵	۱/۶۸	۴/۹۴	مرجع [۴۶]
۱/۹۱	۱/۶۷	۴/۸۹	مطالعه حاضر

#### ۵- نتایج و بحث

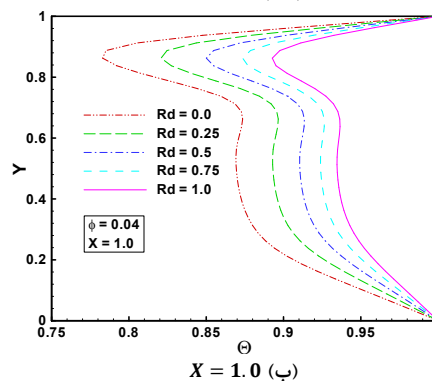
برای بررسی تاثیر پارامتر تابش بر رفتارهای گرمایی جریان نانو سیال در محفظه مورد مطالعه، نمودارهای دمای بی‌بعد جریان ( $\theta$ ) بر حسب محور عمودی ( $Y$ ) در سه مقطع طولی ( $X$ ) مختلف، در شکل‌های ۳ (الف) تا (ج) ارائه شده‌اند. بررسی نتایج ارائه شده در این شکل‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که تابش گرمایی تاثیر چشمگیری بر مقادیر دمای بی‌بعد در محفظه مورد مطالعه دارد. در حقیقت، با افزایش پارامتر تابش از  $Rd = 0.0$  تا  $Rd = 1.0$  و در نتیجه افزایش سهم مکانیزم انتقال گرمای تابشی، مقادیر دمای بی‌بعد جریان در تمامی مقاطع، بطور قابل توجهی افزایش یافته و به مقادیر دمای دیوارهای گرم بالایی و پایینی محفظه نزدیک می‌شوند. به بیان دیگر، از شکل‌های ۳ (الف) تا (ج) به‌خوبی مشاهده می‌شود که با افزایش سهم مکانیزم انتقال گرمای تابشی، مقادیر گرادیان‌های دما روی هر دو دیوار بالایی و پایینی محفظه کاهش می‌یابند.

برای درک بیشتر از تاثیر مکانیزم انتقال گرمای تابشی بر رفتارهای گرمایی جریان نانو سیال، توزیع دمای متوسط توده‌ای در محفظه مورد مطالعه برای پنج مقدار مختلف پارامتر تابش در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل نمایان است هر افزایشی در مقادیر پارامتر تابش منجر به افزایش مقادیر دمای متوسط توده‌ای در محفظه می‌شود. در حقیقت این افزایش به‌علت افزایش شار گرمایی تابشی و در

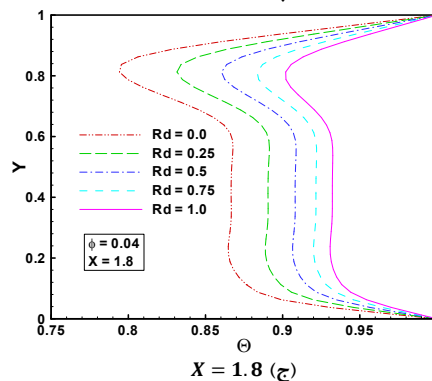
نتیجه افزایش شار گرمایی کل رو دیوارهای بالایی و پایینی محفظه است.



(الف)  $X = 0.2$

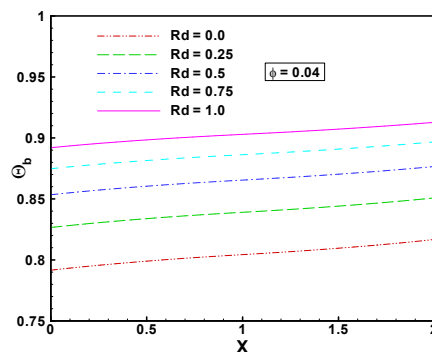


(ب)  $X = 1.0$



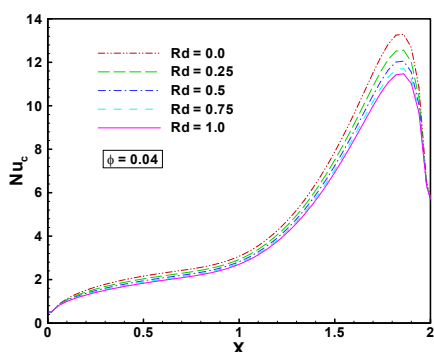
(ج)  $X = 1.8$

شکل ۳- تاثیر تابش گرمایی بر توزیع دمای بی بعد جریان نانو سیال در سه مقطع طولی مختلف

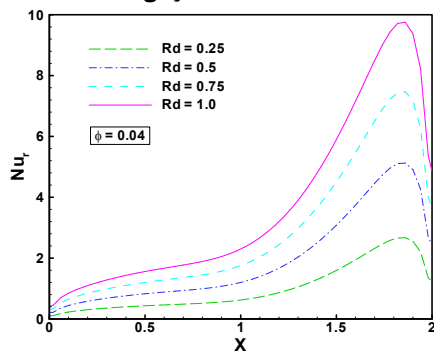


شکل ۴- تاثیر تابش گرمایی بر توزیع دمای متوسط توده‌ای در محفظه مورد مطالعه

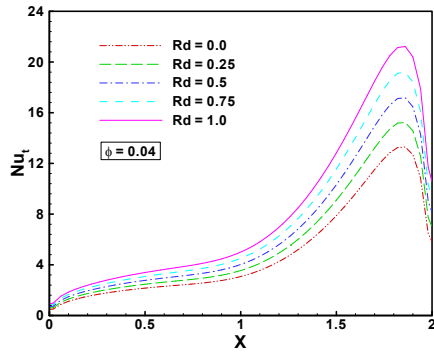
با توجه به اینکه، مقادیر دمای متوسط توده‌ای در محفظه و همچنین مقادیر گرادیان‌های دما روی دیوارهای آن، بطور قابل توجهی وابسته به مقادیر پارامتر تابش هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تابش گرمایی تاثیر بسزایی بر مقادیر آهنگ انتقال گرما روی دیوارهای محفظه دارد. برای بررسی این موضوع، شکل‌های ۵ (الف) تا (ج) ارائه شده‌اند. در این شکل‌ها، توزیع عددهای ناسلت همرفتی، تابشی و کل روی دیوار پایینی محفظه مورد مطالعه برای پنج مقدار مختلف پارامتر تابش رسم شده‌اند.



(الف) عدد ناسلت همرفتی



(ب) عدد ناسلت تابشی

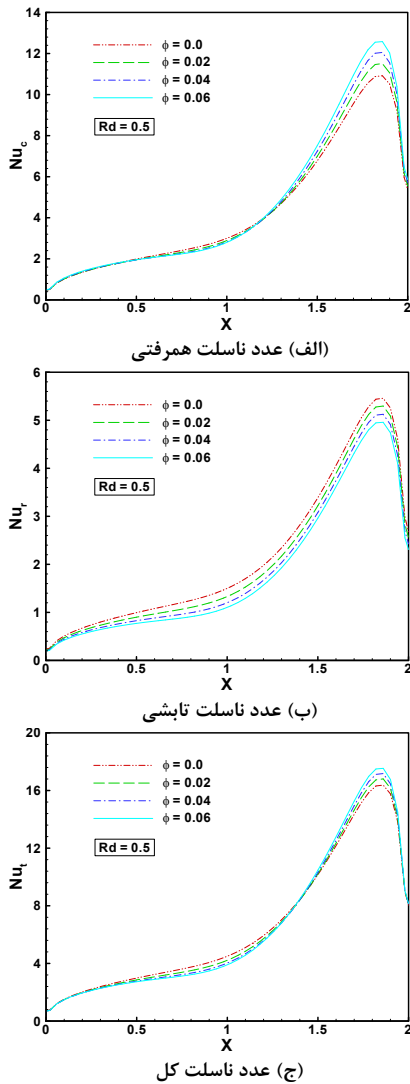


(ج) عدد ناسلت کل

شکل ۵- تاثیر تابش گرمایی بر توزیع عددهای ناسلت روی دیوار پایینی محفظه

مقایسه و بررسی دقیق نتایج ارائه شده در شکل‌های ۵ (الف) و (ب) به‌وضوح نشان می‌دهد که پارامتر تابش اثرات متفاوتی بر مقادیر عددهای ناسلت همرفتی و تابشی دارد. در حقیقت، با افزایش این پارامتر از  $Rd = 0.0$  تا  $Rd = 1.0$ ، مقادیر عددهای ناسلت همرفتی و

ذرات اکسید مس دارد. در حقیقت، این رفتار چندگانه به علت متفاوت بودن تغییرات مقادیر دما بر حسب غلظت نانو ذرات اکسید مس است.

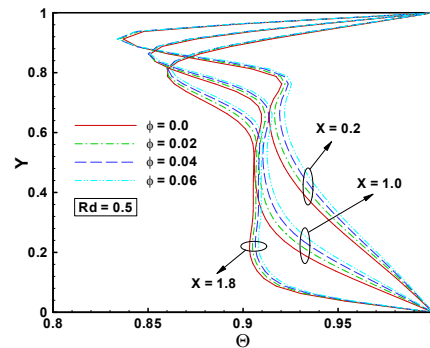


شکل ۷- تاثیر درصد حجمی نانو ذرات اکسید مس بر توزیع عددی ناسلت روی دیوار پایینی محفظه

بر اساس این شکل، تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس بر مقادیر آهنگ انتقال گرمای همرفتی در نواحی نزدیک به دیوار سمت راست محفظه خیلی بیشتر از سایر نواحی است. در هر حقیقت، در این نواحی با افزایش درصد حجمی نانو ذرات اکسید مس، افزایش ضریب رسانایی گرمایی نانو سیال در مقایسه با کاهش مقادیر گرادیان‌های دما روی دیوار پایینی محفظه بیشتر بوده و در نتیجه، مقادیر عدد ناسلت همرفتی افزایش قابل توجهی می‌یابند. از شکل ۷ (ب) نیز به خوبی نمایان است که تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس بر مقادیر آهنگ انتقال گرمای تابشی معکوس است. به بیان دیگر، با افزایش غلظت نانو ذرات اکسید مس از  $\phi = 0$  تا  $\phi = 0.06$  و در نتیجه کاهش مقادیر گرادیان‌های دما روی دیوار پایینی محفظه، مقادیر عدد ناسلت تابشی روی این دیوار کاهش می‌یابند. مقایسه مقادیر عددی ناسلت همرفتی

تابشی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. بر اساس روابط مربوط به تعریف عددهای ناسلت همرفتی و تابشی و با توجه به آنچه در شکل‌های ۳ و ۴ بیان شد، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش عدد ناسلت همرفتی با افزایش پارامتر تابش، به دلیل کاهش گرادیان‌های دما روی دیوار پایینی محفظه است. همچنین، افزایش عدد ناسلت تابشی با افزایش پارامتر تابش، به دلیل افزایش دمای متوسط توده‌ای در محفظه و تاثیر مستقیم پارامتر تابش در تعریف عدد ناسلت تابشی است. نکته قابل توجه دیگری که از مقایسه شکل‌های ۵ (الف) و (ب) مشخص می‌شود این است که تاثیر پارامتر تابش بر آهنگ افزایش مقادیر عدد ناسلت تابشی خیلی بیشتر از تاثیر آن بر آهنگ کاهش مقادیر عدد ناسلت همرفتی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر پارامتر تابش بر مقادیر عدد ناسلت کل مشابه با تاثیر آن بر مقادیر عدد ناسلت تابشی است. به بیان دیگر، هر افزایشی در مقادیر پارامتر تابش منجر به یک افزایش قابل توجه در مقادیر عدد ناسلت کل می‌گردد. این نتیجه به- وضوح از شکل ۵ (ج) مشخص است.

به منظور مطالعه اثرات غلظت نانو ذرات اکسید مس بر رفتارهای گرمایی جریان سیال تحت تاثیر مکانیزم تابش، نمودارهای دمای بی بعد در سه مقطع طولی مختلف در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. همانطور که از این شکل مشخص است غلظت نانو ذرات اکسید مس تاثیر دو گانه‌ای بر مقادیر توزیع دما دارد. در حقیقت، در نواحی نزدیک به دیوار بالایی محفظه، با افزایش غلظت نانو ذرات اکسید مس، مقادیر دمای بی بعد با آهنگ بسیار کوچک و ناچیزی کاهش می‌یابند. درحالی‌که در سایر نواحی و به خصوص در نواحی میانی محفظه، هر افزایشی در مقادیر درصد حجمی نانو ذرات اکسید مس منجر به افزایش مقادیر دمای بی بعد می‌شود. علاوه بر آنچه ذکر شد، از مقایسه نتایج شکل ۶ با نتایج ارائه شده در شکل‌های ۳ (الف) تا (ج)، به وضوح مشخص است که تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس بر مقادیر دما و گرادیان‌های آن بسیار کمتر از تاثیر پارامتر تابش بر این مقادیر است.



شکل ۶- تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس بر توزیع دمای بی بعد جریان در سه مقطع طولی مختلف

برای درک بیشتر از تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس بر رفتارهای گرمایی جریان سیال تحت تاثیر مکانیزم تابش، توزیع عددهای ناسلت همرفتی، تابشی و کل روی دیوار پایینی محفظه مورد مطالعه به ترتیب در شکل‌های ۷ (الف) تا (ج) رسم شده‌اند. مقایسه و بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۷ (الف) نشان می‌دهد که توزیع عدد ناسلت همرفتی روی دیوار پایینی محفظه یک رفتار چندگانه بر حسب تغییرات غلظت نانو

و تابشی ارائه شده در شکل‌های ۷ (الف) و (ب) به‌وضوح نشان می‌دهد که مقادیر عددهای ناسلت همرفتی بسیار بزرگتر از مقادیر عددهای ناسلت تابشی هستند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس بر عددهای ناسلت کل مشابه با تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس بر عددهای ناسلت همرفتی باشد. این نتیجه به‌خوبی از شکل ۷ (ج) نمایان است. در حقیقت، این شکل نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانو ذرات اکسید مس، بیشینه عدد ناسلت کل روی دیوار پایینی محفظه افزایش می‌یابد.

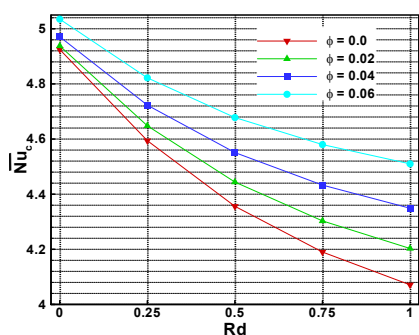
برای بررسی اثرات متقابل تابش گرمایی و درصد حجمی نانو ذرات جامد بر مقادیر آهنگ انتقال گرمای کل روی دیوار پایینی محفظه مورد مطالعه، جدول ۶ ارائه شده است. در این جدول، مقادیر عدد ناسلت کل متوسط روی دیوار پایینی محفظه برای پنج مقدار مختلف پارامتر تابش و چهار مقدار مختلف غلظت نانو ذرات اکسید مس بیان شده‌اند. بررسی نتایج ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر تابش و غلظت نانو ذرات اکسید مس، مقادیر عدد ناسلت کل متوسط افزایش می‌یابند. البته باید توجه شود که افزایش عدد ناسلت کل متوسط با افزایش پارامتر تابش، چشمگیر و قابل ملاحظه است؛ درحالی‌که تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس روی افزایش مقادیر این عدد خیلی کوچک است. در حقیقت، از جدول ۶ به‌وضوح مشخص است که بیشترین آهنگ انتقال گرمای کل روی دیوار پایینی محفظه، مربوط به حالت  $Rd = 1$  و  $\phi = 0.06$  است.

جدول ۶- اثرات متقابل پارامتر تابش و غلظت نانو ذرات اکسید مس بر مقادیر عدد ناسلت کل متوسط روی دیوار پایینی محفظه

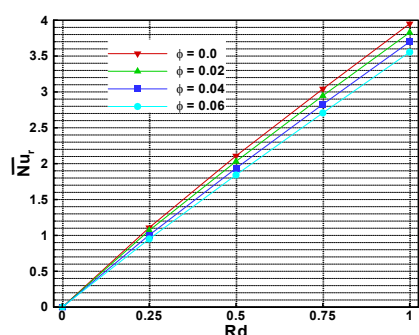
پارامتر تابش	درصد حجمی نانو ذرات اکسید مس			
	۰/۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶
۰/۰	۴/۹۲۵	۴/۹۳۸	۴/۹۷۱	۵/۰۳۳
۰/۲۵	۵/۷۰۲	۵/۷۱۷	۵/۷۲۸	۵/۷۷۲
۰/۵	۶/۴۶۴	۶/۴۷۵	۶/۴۸۶	۶/۵۲۲
۰/۷۵	۷/۲۳۳	۷/۲۵۰	۷/۲۶۱	۷/۲۸۷
۱/۰	۸/۰۲۰	۸/۰۳۱	۸/۰۴۷	۸/۰۶۵

برای درک بهتر این نتایج، مقادیر عددهای ناسلت همرفتی متوسط و تابشی متوسط روی دیوار پایینی محفظه بر حسب مقادیر مختلف پارامتر تابش و غلظت نانو ذرات اکسید مس در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده‌اند. بررسی نتایج ارائه شده در این دو شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که پارامتر تابش و غلظت نانو ذرات اکسید مس اثرات متفاوت و دوگانه‌ای بر مقادیر عددهای ناسلت همرفتی و تابشی متوسط دارند. در حقیقت، با افزایش پارامتر تابش و افزایش سهم انتقال گرمای تابشی، مقادیر عددهای ناسلت همرفتی و تابشی به‌ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. البته باید توجه داشت که آهنگ افزایش مقادیر عدد ناسلت تابشی متوسط بسیار بیشتر از آهنگ کاهش مقادیر عدد ناسلت همرفتی متوسط است. بنابراین می‌توان گفت که افزایش مقادیر عدد ناسلت کل متوسط با افزایش پارامتر تابش، به دلیل افزایش عدد ناسلت تابشی متوسط بر حسب این پارامتر است. بعلاوه، از شکل‌های ۸ و ۹ به‌خوبی نمایان است که هر افزایشی در مقادیر غلظت نانو ذرات اکسید مس به‌ترتیب منجر به یک افزایش و کاهش در مقادیر عددهای ناسلت

همرفتی متوسط و تابشی متوسط می‌شود. البته این افزایش و کاهش به‌گونه است که تاثیر غلظت نانو ذرات اکسید مس بر مقادیر عددهای ناسلت کل متوسط خیلی کوچک و افزایشی است.



شکل ۸- اثرات متقابل پارامتر تابش و غلظت نانو ذرات اکسید مس بر مقادیر عدد ناسلت همرفتی متوسط روی دیوار پایینی محفظه



شکل ۹- اثرات متقابل پارامتر تابش و غلظت نانو ذرات اکسید مس بر مقادیر عدد ناسلت تابشی متوسط روی دیوار پایینی محفظه

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی اثرات پارامتر تابش و درصد حجمی نانو ذرات اکسید مس بر رفتارهای گرمایی جریان همرفت اجباری سیال در یک محفظه دوزنقه‌ای شکل دارای دو مجرای ورودی و خروجی مستقل و در حضور حرکت براونی پرداخته شده است. برای مدل سازی دیوارهای شیبدار این محفظه، از روش انسداد بهبود یافته استفاده شده است. همچنین، برای محاسبه دیورژانس شار تابشی در معادله انرژی، تقریب روزلند بکار گرفته شده است. خلاصه نتایج این مطالعه به شرح زیر بیان می‌شوند:

- با افزایش پارامتر تابش، مقادیر دمای متوسط توده‌ای در محفظه افزایش می‌یابند؛ در حالی‌که هر افزایشی در مقادیر این پارامتر منجر به یک کاهش قابل ملاحظه در مقادیر گرادیان‌های دما روی دیوارهای گرم بالایی و پایینی محفظه می‌شود.
- هر افزایشی در مقادیر پارامتر تابش منجر به افزایش قابل توجه مقادیر عددهای ناسلت تابشی و کل روی دیوار پایینی محفظه می‌گردد؛ در حالی‌که، مقادیر عدد ناسلت همرفتی با افزایش این پارامتر کاهش می‌یابند.
- غلظت نانو ذرات اکسید مس اثرات دوگانه‌ای بر توزیع دما در محفظه مورد مطالعه دارد. در حقیقت، در نواحی نزدیک به دیوار بالایی محفظه، این تاثیر بسیار کوچک و ناچیز است؛ در حالی‌که



- Enclosures with Heated Rotating Top Wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 124, pp. 885-899, 2018.
- [9] Turan O. and Chakraborty N., The Effects of Bottom Wall Heating on Mixed Convection of Yield Stress Fluids in Cylindrical Enclosures with a Rotating End Wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 121, pp. 759-774, 2018.
- [10] Sajjadi H., Delouei A.A., Sheikholeslami M., Atashafrooz M. and Succi S., Simulation of Three Dimensional MHD Natural Convection using Double MRT Lattice Boltzmann Method, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 515, pp. 474-496, 2019.
- [11] Desouky A.A.E., Ismail H.N.A., Abourabia A.M. and Ahmed N.A., Numerical Simulation of MHD Flow and Heat Transfer Inside T-Shaped Cavity by the Parallel Walls Motion, *SN Applied Sciences*, Vol.2, No. 4, pp. 1-18, 2020.
- [12] Atashafrooz M., The Effects of Buoyancy Force on Mixed Convection Heat Transfer of MHD Nanofluid Flow and Entropy Generation in an Inclined Duct with Separation Considering Brownian Motion Effects, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 138, No. 5, pp. 3109-3126, 2019.
- [13] Fu C., Rahmani A., Suksatan W., Alizadeh S.M., Zarringhalam M., Chupradit S. and Toghraie D., Comprehensive Investigations of Mixed Convection of Fe-Ethylene-Glycol Nanofluid inside an Enclosure with Different Obstacles using Lattice Boltzmann Method, *Scientific Reports*, Vol.11, No. 1, pp.1-16, 2021.
- [۱۴] منگلی زاده م، محمدیون م، و مهدویان م، مطالعه آزمایشگاهی افزایش انتقال گرما درون مبادله کن‌های گرمایی با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینا و کوپل سیمی در رژیم‌های جریان متغوات، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۲، ص. ۳۳۹-۳۴۷، ۱۳۹۷.
- [15] Gouran S., Mohsenian S. and Ghasemi S.E., Theoretical Analysis on MHD Nanofluid Flow between Two Concentric Cylinders using Efficient Computational Techniques, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 61, No. 4, pp. 3237-3248, 2022.
- [16] Rostami A.K., Hosseinzadeh K. and Ganji D.D., Hydrothermal Analysis of Ethylene Glycol Nanofluid in a Porous Enclosure with Complex Snowflake Shaped Inner Wall, *Waves in Random and Complex Media*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-18, 2022.
- [۱۷] منصوری مهران س، صفاریان م، نمازبان ف، و مرادی کشکولی ف، مطالعه عددی جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی در حفره لوزوی پر شده با نانوسیال آب-مس با جذب/تولید گرما، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۴، ص. ۲۸۹-۲۹۸، ۱۳۹۷.
- [18] Izadi M., Mohebbi R. Delouei A.A. and Sajjadi H., Natural Convection of a Magnetizable Hybrid Nanofluid Inside a Porous Enclosure Subjected to Two Variable Magnetic Fields, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 151, pp. 154-169, 2019.
- [19] Atashafrooz M., Sajjadi H. and Delouei A.A., Interacting Influences of Lorentz Force and Bleeding on the Hydrothermal Behaviors of Nanofluid Flow in a Trapezoidal Recess with the Second Law of Thermodynamics Analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 110, Article Number: 104411, 2020.
- [۲۰] داودی چمرینی م، قاسمی ب، و رئیسی ا، انتقال گرمای ترکیبی جابجایی آزاد و رسانش در محفظه ای حاوی نانوسیال و سیال خالص جدا شده با یک مانع، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۱، ص. ۸۷-۹۶، ۱۴۰۰.
- [21] Hamzah H.K., Ali F.H. and Hatami M., MHD Mixed Convection and Entropy Generation of CNT-Water
- در سایر نواحی و به‌خصوص در نواحی میانی محفظه، افزایش مقادیر غلظت نانو ذرات اکسید مس منجر به افزایش مقادیر دما می‌شود.
- تاثیر درصد حجمی نانو ذرات اکسید مس بر مقادیر دما و گرادیان‌های آن بسیار کمتر از تاثیر پارامتر تابش بر این مقادیر است.
  - با افزایش مقادیر درصد حجمی نانو ذرات اکسید مس، مقادیر آهنگ انتقال گرمای همرفتی و تابشی به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. همچنین، تاثیر این پارامتر بر مقادیر آهنگ انتقال گرمای کل بسیار کوچک و افزایشی است.
- ۶-۱- پیشنهادات برای تحقیقات آینده**
- به‌منظور توسعه این پژوهش، موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:
- ارزیابی ترمو-هیدرودینامیکی و بررسی میزان بازگشت ناپذیری جریان برای مسئله مورد مطالعه، انجام شود.
  - تاثیر حرکت ترموفروتیک نانو ذرات و میدان مغناطیسی بر رفتارهای هیدرودینامیکی و گرمایی جریان سیال در مسئله مورد مطالعه، بررسی شود.
  - از مدل‌های دیگر نظیر مدل اولبری-لاگرانژی برای شبیه سازی حرکت براونی نانو ذرات استفاده شود.
- ۷- مراجع**
- [1] Mahmoodabadi M.J., Mahmoodabadi F. and Atashafrooz M., Development of the Meshless Local Petrov-Galerkin Method to Analyze Three-Dimensional Transient Incompressible Laminar Fluid Flow, *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, Vol. 12, No. 2, pp. 128-152, 2018.
- [2] Loenko D.S., Shenoy A. and Sheremet M.A., Effect of Time-Dependent Wall Temperature on Natural Convection of a Non-Newtonian Fluid in an Enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 166, Article Number: 106973, 2021.
- [3] Bhowmick S., Xu F., Molla M.M. and Saha S.C., Chaotic Phenomena of Natural Convection for Water in a V-Shaped Enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 176, Article Number: 107526, 2022.
- [4] Sanga P.J., Kumar A. and Mishra S.K., Numerical Investigation of Turbulent Forced Convection Flow in a Two-Dimensional Curved Surface Cavity, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 16, No. 1, pp. 359-373, 2022.
- [۵] خدادادی ر، رئیسی ا، و قاسمی ب، بررسی عددی انتقال گرمایی جابجایی طبیعی سیال غیرنیوتنی قانون توانی درون محفظه مثلث شکل حاوی یک منبع گرمایی همدم، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۲، ش. ۱، ص. ۱۱۹-۱۲۸، ۱۴۰۱.
- [6] Roy M., Roy S. and Basak T., Finite Element Simulations on Heatline Trajectories for Mixed Convection in Porous Square Enclosures: Effects of Various Moving Walls, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 59, pp.140-160, 2016.
- [7] Messaoud H., Bachir M. and Djamel S., Numerical Study of Mixed Convection and Flow Pattern in Various Across-Shape Concave Enclosures, *Internal Journal of Heat and Technology*, Vol. 35, pp. 567-575, 2017.
- [8] Turan O., Yigit S., Liang R. and Chakraborty N., Laminar Mixed Convection of Power-Law Fluids in Cylindrical

- [34] Ghalambaz M., Sabour M. and Pop I., Free Convection in a Square Cavity Filled by a Porous Medium Saturated by a Nanofluid: Viscous Dissipation and Radiation Effects, *Engineering Science and Technology, An International Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 1244-1253, 2016.
- [35] Ali M., Khan W.A., Sultan F. and Shahzad M., Numerical Investigation on Thermally Radiative Time-Dependent Sisko Nanofluid Flow for Curved Surface, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 550, Article Number: 124012, 2020.
- [36] Atashafrooz M., Influence of Radiative Heat Transfer on the Thermal Characteristics of Nanofluid Flow over an Inclined Step in the Presence of an Axial Magnetic Field, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 139, No. 5, pp. 3345-3360, 2020.
- [37] Muhammad T., Waqas H., Khan S.A., Ellahi R. and Sait S.M., Significance of Nonlinear Thermal Radiation in 3D Eyring-Powell Nanofluid Flow with Arrhenius Activation Energy, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 143, No. 2, pp. 929-944, 2021.
- [38] Shah Z., Kumam P., Selim M.M. and Alshehri A., Impact of Nanoparticles Shape and Radiation on the Behavior of Nanofluid under the Lorentz Forces, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 26, Article Number: 101161, 2021.
- [39] Lv Y.P., Shaheen N., Ramzan M., Mursaleen M., Nisar K.S. and Malik M.Y., Chemical Reaction and Thermal Radiation Impact on a Nanofluid Flow in a Rotating Channel with Hall Current, *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, pp.1-17, 2021.
- [40] Farooq U., Waqas H., Muhammad T., Imran M. and Alshomrani A.S., Computation of Nonlinear Thermal Radiation in Magnetized Nanofluid Flow with Entropy Generation, *Applied Mathematics and Computation*, Article Number: 126900, 2022.
- [41] Safaei M.R., Karimipour A., Abdollahi A. and Nguyen, T.K., The Investigation of Thermal Radiation and Free Convection Heat Transfer Mechanisms of Nanofluid Inside a Shallow Cavity by Lattice Boltzmann Method, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 509, pp. 515-535, 2018.
- [42] Sheikholeslami M. and Shehzad S.A., Thermal Radiation of Ferrofluid in Existence of Lorentz Forces Considering Variable Viscosity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 82-92, 2017.
- [43] Sheikholeslami M. and Rokni H.B., Numerical Simulation for Impact of Coulomb Force on Nanofluid Heat Transfer in a Porous Enclosure in Presence of Thermal Radiation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 118, pp. 823-831, 2018.
- [44] Sheikholeslami M., Sajjadi H., Delouei A.A., Atashafrooz M. and Li Z., Magnetic Force and Radiation Influences on Nanofluid Transportation through a Permeable Media Considering  $Al_2O_3$  Nanoparticles, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 136, No. 6, pp. 2477-2485, 2019.
- [45] Patankar S.V. and Spalding D.B., A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, No. 10, p. 1787-1806, 1972.
- [46] Chamkha A.J. and Abu-Nada E., Mixed Convection Flow in Single-and Double-Lid Driven Square Cavities Filled with Water- $Al_2O_3$  Nanofluid: Effect of Viscosity Models, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 36, pp. 82-96, 2012.
- Nanofluid in a Wavy Lid-Driven Porous Enclosure at Different Boundary Conditions, *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1, pp.1-27, 2022.
- [22] Ahmed S.E., Mansour M.A., Hussein A.K. and Sivasankaran S., Mixed Convection From a Discrete Heat Source in Enclosures with Two Adjacent Moving Walls and Filled with Micropolar Nanofluids, *Engineering Science and Technology, An International Journal*, Vol. 19, No. 1, pp. 364-376, 2016.
- [23] Sajjadi H., Delouei A.A., Atashafrooz M. and Sheikholeslami M., Double MRT Lattice Boltzmann Simulation of 3-D MHD Natural Convection in a Cubic Cavity with Sinusoidal Temperature Distribution Utilizing Nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 489-503, 2018.
- [24] Izadi S., Armaghani T., Ghasemiasl R., Chamkha A.J. and Molana M., A Comprehensive Review on Mixed Convection of Nanofluids in Various Shapes of Enclosures, *Powder Technology*, Vol. 343, pp. 880-907, 2019.
- [25] Muhammad N., Nadeem S. and Issakhov A., Finite Volume Method for Mixed Convection Flow of Ag-Ethylene Glycol Nanofluid Flow in a Cavity Having Thin Central Heater, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 537, Article Number: 122738, 2020.
- [26] Yan S.R., Kalbasi R., Parvin A., Tian X.X. and Karimipour A., Comparison of Nusselt Number and Stream Function in Tall and Narrow Enclosures in the Mixed Convection of Hybrid Nanofluid, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 143, No. 2, pp.1599-1609, 2021.
- [۲۷] آتش افروز م. و گنجعلیخان نسب س. اثرات غیر خاکستری گازهای تایشی بر انتقال گرمای جابجایی ترکیبی در یک کانال شش‌پدار و دارای جدایش جریان، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۴، ص. ۱-۱۰، ۱۳۹۷.
- [28] Zabihi M., Lari K. and Amiri H., Coupled Radiative-Conductive Heat Transfer Problems in Complex Geometries using Embedded Boundary Method, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, No. 7, pp. 2847-2864, 2017.
- [29] Sukumar S. and Kar S.P., A Combined Conduction-Radiation Model for Analyzing the Role of Radiation on Freezing of a Biological Tissue, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 12, No. 1, Article Number: 011015, 2020.
- [30] Li Z.H., Li X.L., Xia X.L. and Sun C., A Hybrid Strategy for Solving Radiation-Conduction in Irregular Geometries Filled with Gray Semitransparent Medium using Monte Carlo Method Combined with Blocked-off and Embedded Boundary Treatments, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, Vol. 77, No. 1, pp. 22-41, 2020.
- [31] Jarray K., Mazgar A. and Ben Nejma F., Effect of Combined Natural Convection and Non-Gray Gas Radiation on Entropy Generation in a Circular Enclosure with Partial Heating, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 12, pp. 1-15, 2019.
- [32] Atashafrooz M., Asadi T. and Yan W.M., Numerical Study on Forced Convection in the Exhaust Problem using the Spectral Line-Based Weighted Sum of Gray Gases Model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 156, Article Number: 119837, 2020.
- [33] El Moutaouakil L., Boukendil M., Zrikem Z. and Abdelbaki A., Natural Convection and Radiation in a Cavity with a Partially Heated Cylinder, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 35, No. 2, pp. 312-322, 2021.