

## تأثیر هندسه و سیال داخل جداره بر عملکرد حرارتی - هیدرولیکی یک کانال موجی شکل در جریان مغشوش

علی صالحین<sup>۱</sup> و آرش میرعبداله لواسانی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: پذیرش مقاله:	
<b>واژگان کلیدی:</b> تغییر شکل هندسه، نانوسیال، دی اکسید تیتانیوم- آب، جریان مغشوش، ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی.	هدف از این مطالعه عددی بررسی تأثیر هندسه و نوع سیال داخل جداره بر افزایش عملکرد حرارتی- هیدرولیکی یک کانال موجی شکل در جریان مغشوش است. کانال شامل دو ناحیه است. ناحیه اول سیال عبوری از کانال و ناحیه دوم سیال ساکن در بین جداره های کانال است. برای سیال ناحیه اول و دوم، هوا و نانو سیال دی اکسید تیتانیوم- آب انتخاب شده است. نانوسیال بصورت همگن، تک فاز و غلظت حجمی یک درصد در نظر گرفته شده است. صفحات بالا و پایین کانال تحت شار حرارتی ثابت ۶۱۶ وات بر مترمربع است. عدد رینولدز جریان سیال داخل کانال بین ۳۷۰۰ تا ۴۰۰۰۰ است. جریان سیال مغشوش در ناحیه اول به کمک مدل k-ε استاندارد شبیه سازی شده است. اثر استفاده از نوع سیال داخل جداره کانال، زاویه و ارتفاع موج بررسی شده است. نتایج نشان می دهد اگر نانوسیال دی اکسید تیتانیوم- آب در ناحیه دوم و هوا در ناحیه اول باشد کانال بهترین عملکرد را خواهد داشت. زاویه ۳۵ درجه به عنوان زاویه بهینه موج با بیشترین ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در رینولدز های ۱۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ حاصل شد. با افزایش ارتفاع موج از ۴ به ۶ میلی متر ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی حدوداً ۶۵ تا ۱۱۰ درصد افزایش می یابد. اثر ارتفاع موج بر افزایش ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی نسبت به تغییر زاویه موج بیشتر قابل توجه است. بیشترین ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در رینولدزهای پایین تر، زاویه موج کمتر و ارتفاع موج بیشتر حاصل شد، استفاده از کانال موجی شکل در این شرایط کارآمد ترمی باشد.

### ۱-مقدمه

سیال پایه حرکت ندارند. در این حالت معادلات حاکم بر یک سیال معمولی برای نانوسیال نیز کاربرد دارد. در دیدگاه دوم، نانوسیال به عنوان یک سیال دوفازی (مایع و جامد) فرض شده و در این حالت نانوذرات در اثر نیروهای وارد بر آنها امکان لغزش نسبت به سیال پایه را دارند. موضوع افزایش انتقال حرارت در سیالات با اضافه کردن مواد جامد فلزی در اندازه میلی متر و میکرومتر برای اولین بار در سال ۱۹۵۴ توسط مکسول [۱] مطرح شد که با مشکلات

تلاش محققان در سالهای اخیر بر این بوده است که راندمان تجهیزات را افزایش دهند، از اتلافات انرژی جلوگیری کنند، هزینه ها را کاهش دهند و بر عمر قطعات بیافزایند. افزایش انتقال حرارت به کمک نانوسیالها بحث مهم و کاربردی است. انتقال حرارت در نانوسیالها تاکنون از دو دیدگاه کلی مورد بررسی قرار گرفته است. در یک دیدگاه سیال پایه و نانوذرات، یک سیال همگن فرض شده و نانوذرات نسبت به

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: arashLavasani@iauctb.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی  
۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

می‌یابد. عباسیان ارانی و همکاران [۷] در سال ۱۳۹۶ جریان سیال، انتقال حرارت و تولید آنتروپی در جابه‌جایی توام نانوسیال آب- اتیلن گلیکول- اکسید آلومینیم با خواص متغیر در محفظه‌ی "I" شکل به صورت عددی بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد در همه اعداد ریچاردسون تغییرات آنتروپی کل و آنتروپی تولیدی ناشی از حرارت با افزایش کسر حجمی رفتاری مشابه عدد ناسلت دارد. گورکی و بیکی [۸] در سال ۱۳۹۷ انتقال حرارت نانوسیالات از سطح کروی را مطالعه عددی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیالات موجب بهبود انتقال حرارت در کانال پر شده می‌شود. شریفی اصل و همکاران [۹] در سال ۱۳۹۷ انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان مغشوش یک نانوسیال غیرنیوتنی درون لوله ای افقی و مدور را بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که میزان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی و ناسلت موضعی در نانوسیال غیرنیوتنی بیش از سیال غیرنیوتنی پایه است. خراسانی‌زاده و همکاران [۱۰] در سال ۱۳۹۵ جریان سیال انتقال حرارت و تولید آنتروپی در جابه‌جایی توام نانوسیال آب- اکسید آلومینیم با خواص متغیر در محفظه‌ای با دو منبع گرم دایره‌ای به صورت عددی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که آنتروپی کل با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. ضیائی راد و الیاسی [۱۱] در سال ۱۳۹۵ اثر فرکانس نوسانات، عدد رینولدز، دامنه نوسانات و همچنین اثر کسر حجمی نانوذرات را بر روی سرعت افقی، افت فشار و عدد ناسلت در کانال مستطیلی در حالت غیر دائم به صورت عددی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش دامنه نوسان عدد ناسلت افزایش می‌یابد و افزایش فرکانس نوسانات تاثیر محسوسی بر افزایش عدد ناسلت نمی‌گذارد. حسینی راد و هرمزی [۱۲] در سال ۲۰۱۸ شدت انتقال حرارت و مشخصات جریان تولیدی گردابه در کانال کوچک بررسی عددی کردند. آنها برای بهینه‌سازی تولیدی گردابه از روش سطح پاسخ استفاده کردند. محبی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۸ انتقال حرارت جابه‌جایی در کانال با سطح گسترده با استفاده از سه نانوسیال مختلف با روش لیتیس بولتزمن شبیه‌سازی عددی کردند. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از سطوح گسترده برای آرایشات خاص نرخ انتقال حرارت را می‌تواند افزایش دهد. رستمی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ انتقال حرارت نانوسیال در میکروکانال موجی شکل را مطالعه کردند آنها یافتند که

فراوانی از جمله گرفتگی مجرای، ته‌نشین‌شدن مواد جامد فلزی، فرسایش، افت فشار بالا، پایداری ضعیف و معلق شدن ضعیف همراه بود. سپس این مشکلات توسط محققان دیگر و پیشرفت علم نانو برطرف شد. در سال‌های اخیر مطالعاتی در خصوص تاثیر نانوسیال در کانال‌ها انجام شده است. کومار و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۷ انتقال حرارت در جریان مغشوش نانوسیال در گذرگاه مربعی با دندان در جریان رینولدز ۴۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ با غلظت حجمی ۱ تا ۴ درصد برای سه نانوذره دی اکسید آلومینیم، اکسید مس و اکسید روی مطالعه عددی و آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد نانوسیال دی کسید آلومینیم بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط در مقایسه با نانوسیالات دیگر دارد. جاب و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۷ اثر زمان، هندسه شیار، شعاع سیلندر، سطح شیار، عدد رینولدز، عدد گرافش، عدد هارتمن و کسر حجمی ذرات بر جریان مخلوط نانوسیال و انتقال حرارت در کانال شیاردار افقی با دوسیلندر جامد تولید حرارت در وسط کانال بررسی کردند. پرسی مهر و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۷ اثر زاویه حمله دندان مستطیلی ( صفر تا ۱۸۰ درجه )، عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ( صفر تا ۴ درصد ) بر افزایش انتقال حرارت در جریان آشفته نانوسیال آب- دی اکسید آلومینیم در کانال مستطیلی به کمک روش عددی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند در زاویه حمله ۶۰ درجه بیشترین نرخ افزایش انتقال حرارت انجام می‌شود. عباسیان ارانی و همکاران [۵] اثر اشکال مختلف نانوذرات (کروی، بیضوی، پلاکتی، تیغه ای، استوانه ای و آجری) بر عملکرد حرارتی- هیدرولیکی بررسی کردند. در این مطالعه عدد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰، نانوسیال آلومینیم بوهیمت- آب اتیلن گلیکول (۵۰-۵۰) با کسر حجمی نانوذرات صفر تا ۴ درصد در نظر گرفته شد مینی کانال موج سینوسی با تغییر فاز و طول موج متغیر انتخاب شده بود. آنها نتیجه گرفتند که عملکرد حرارتی- هیدرولیکی مینی کانال تا حد زیادی تحت تاثیر شکل نانوذرات می‌باشد و با استفاده از نانوذرات کروی و بیضوی عملکرد مینی کانال بهبود می‌یابد. شیخ‌الاسلامی و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۷ جریان نانوسیال بین دو سیلندر دایروی تحت میدان مغناطیسی مطالعه کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش عدد هارتمن و عدد اکرت گرادیان دما افزایش می‌یابد اما با زیاد شدن عدد رینولدز گرادیان دما کاهش

۲-۱- خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال

نانوسیال بصورت همگن ( پراکندگی یکنواخت نانوذرات در سیال پایه) فرض شده است. خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال شامل چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، رسانایی حرارتی و ویسکوزیته [۱۵] از روابط زیر حاصل شده است.

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

$$C_{nf} = \frac{\phi \rho_p C_p + (1 - \phi)\rho_{bf} C_{bf}}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$K_{nf} = \frac{K_p + 2K_{bf} + 2\phi(K_p - K_{bf})}{K_p + 2K_{bf} - \phi(K_p - K_{bf})} K_{bf} \quad (3)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (4)$$

$\phi$  غلظت حجمی نانوذرات،  $\rho$  چگالی،  $C$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $k$  رسانایی حرارتی،  $\mu$  لزجت دینامیکی و زیرنویس های  $nf$ ،  $bf$  و  $p$  به ترتیب نانوسیال، سیال پایه و نانوذرات است.

۳- معادلات حاکم بر مساله

در این مطالعه غلظت ذرات نانو در نانوسیال یک درصد در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در غلظت‌های پایین نانوذرات مدل تک فاز، دو فاز مخلوط و دو فاز اویلر لاگرانژی نتایج یکسان و انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

[۲-۴]، به دلیل هزینه محاسباتی کمتر نانوسیال را به صورت یک سیال تک فاز در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم جریان یک سیال تک فاز نیوتنی، مغشوش، سه بعدی، تراکم ناپذیر با ویسکوزیته ثابت در سیستم مختصات کارترین پس از متوسط گیری به صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (6)$$

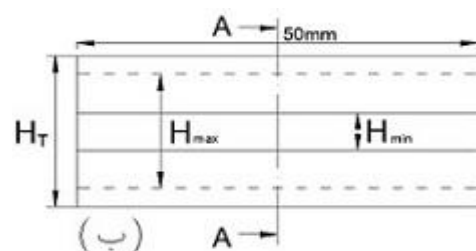
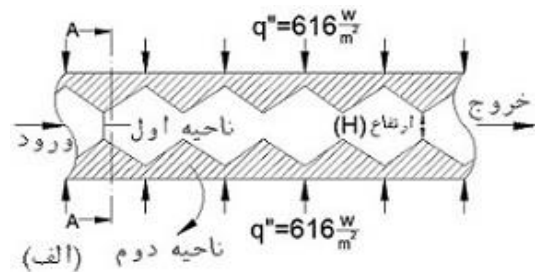
$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{K}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_j T}) \quad (7)$$

در معادلات فوق  $T$ ،  $P$  و  $u$  به ترتیب دما، فشار و مولفه سرعت است.

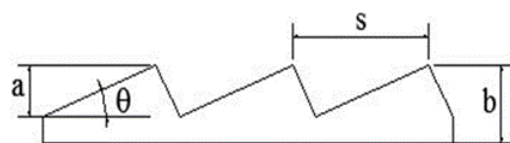
عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی و کاهش قطر ذرات افزایش می‌یابد که این مقدار برای نانوسیال در میکروکانال موجی شکل ۳ برابر بزرگتر از آب در میکروکانال صاف است. با توجه به مطالعات انجام شده مشخص است تاثیر هندسه و همچنین نوع سیال داخل جداره کانال موجی شکل تاکنون بررسی نشده است. بنابراین هدف در این مطالعه تاثیر دو پارامتر فوق خواهد بود.

۲- بیان مساله (هندسه محاسباتی)

هندسه کانال مطابق شکل (۱) بصورت موجی شکل می‌باشد. جنس صفحات و کانال از مس و ضخامت صفحات بالایی و پایینی یک میلی متر است. طول کانال ۲۷۸ میلی متر، عرض آن ۵۰ میلی متر و ارتفاع (H<sub>T</sub>)، ۱۸، ۲۰ و ۲۲ میلی متر انتخاب شده است. مطابق شکل ۱ هندسه به دو ناحیه تقسیم شده است. ناحیه اول، ناحیه وسط کانال است که سیال (هوا و یا نانو سیال) از آن عبور می‌کند و ناحیه دوم بین سطوح موجی شکل و صفحات بالا و پایین است که سیال (هوا و یا نانو سیال) در آن حبس می‌شود. مشخصات و ابعاد موج در شکل (۲) مشخص شده است. هندسه ها به صورت سه بعدی در نرم افزار گمبیت تولید و شبکه بندی شده است.



شکل ۱- ساختار هندسه کانال موجی شکل و صفحات مونتاژ شده بر آن (الف) نمای قائم برش خورده (ب) نمای جانبی



شکل ۲- نمای موج های کانال

جوابها مستقل از تعداد شبکه می‌شود و برای کاهش زمان محاسبات و حافظه کامپیوتر از تعداد شبکه بندی ۷۶۰۱۰۰ در این مطالعه استفاده شده است. در دیواره کانال موجی شکل از لایه مرزی برای در نظر گرفتن محدوده زیر لایه آرام استفاده شده است و مقدار  $Y^+$  که مشخص کننده صحت شبکه بندی است برای تمامی اشکال کمتر از ۴ می‌باشد (شکل ۳).

سیال با سرعت یکنواخت و دمای ثابت وارد کانال می‌شود بنابراین از شرط مرزی سرعت ورودی استفاده شده است. عدد رینولدز بین ۳۷۰۰ تا ۴۰۰۰۰ است. دمای ورودی سیال ۲۸۸ کلوین و شدت اغتشاش در مرز ورودی یک درصد در نظر گرفته شده است. صفحات بالا و پایین تحت شار حرارتی ثابت ۶۱۶ وات بر متر مربع قرار گرفته است. برای خروجی از شرط مرزی جریان خروجی استفاده شده است. مدل آشفتگی (k-ε standard) مدل نسبتاً کاملی است که از نظر پایداری، اقتصادی، دقت، مدت زمان همگرایی برای طیف گسترده‌ای از جریان های مغشوش قابل قبول است و معمولاً هنگامیکه فرض جریان مغشوش کامل است و اثر لزجت مولکولی قابل چشم پوشی است این مدل معتبر می باشد. همچنین با توجه به مطالعه نادی و چاتپاهی [۱۹] که تغییرات محوری عدد ناسلت در طول دندان و شیار را با ۴ مدل چهار مدل اغتشاشی k-ε (standard)، (k-ω standard)، (k-ω standard) و (k-ω standard) بررسی کردند، مشخص گردید که مدل اغتشاشی (SST) (k-ε standard) می تواند تغییرات محوری عدد ناسلت در طول دندان و شیارها را با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل های اغتشاشی و با انحراف ۶٪ از داده های آزمایشگاهی پیش بینی کند. همچنین در مقالات متشابه [۲۰-۲۲] نیز از مدل (k-ε standard) استفاده شده است. بنابراین از این مدل در این مطالعه استفاده گردید.

لازم بذکر است این مدل در پیش بینی جریان های غیر محصور، در بخش وسیعی از فواره های تقارن محوری با اطراف ساکن، در جریان هایی که نرخ تولید انرژی جنبشی آشفته خیلی کمتر از نرخ استهلاک است، لایه های برشی ضعیف (دور از دنباله ها)، جریان های چرخشی همراه با کرنش های بزرگ، سریع و اضافی (لایه های مرزی قوس دار و یا گذرگاه های واگرا) ناتوان بوده است [۲۳]. برای گسسته سازی ترم های جابه جایی و پخش از روش مرتبه دوم بالادست و برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار از

عدد ناسلت متوسط در جریان داخلی ( ناحیه اول) به کمک رابطه زیر محاسبه شده است.

$$Nu_{av} = \frac{h_{f(x)} D_h}{K_{f(x)}} \quad (8)$$

$D_h$  قطر هیدرولیکی است و با کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶].

$$D_h = \frac{4A}{P_h} = (H_{min} + H_{max}) \quad (9)$$

$H_{min}$  و  $H_{max}$  به ترتیب فاصله قله و تورفتگی موج های صفحات موجی شکل بالایی و پایینی است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

ضریب انتقال حرارت جابه جایی نیز به کمک رابطه زیر محاسبه شده است.

$$h_{f(x)} = \frac{\dot{q}}{T_{w(x)} - T_{av}} \quad (10)$$

در معادله فوق  $q$  انتقال حرارت تبادل شده،  $T_{w(x)}$  و  $T_{av}$  به ترتیب دمای سطح دیواره موجی شکل و دمای متوسط سیال است.

همچنین عدد رینولدز (Re) از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$Re = \frac{v D_h}{\nu} \quad (11)$$

در رابطه فوق  $v$  و  $V$  به ترتیب سرعت و لزجت سینماتیکی است. ضریب اصطکاک نیز به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$f = \frac{-\frac{dP}{dx} D_h}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (12)$$

معیار ارزیابی عملکرد افزایش انتقال حرارت (ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی) در کانال موجی شکل طبق معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۷-۱۸].

$$PEC = \frac{\left(\frac{Nu_{av}}{Nu_{av,s}}\right) \left(\frac{f}{f_s}\right)^{\frac{1}{3}}}{1} \quad (13)$$

که  $Nu_{av}$  و  $Nu_{av,s}$  به ترتیب عدد ناسلت متوسط در کانال موجی شکل و کانال صاف است. همچنین  $f$  و  $f_s$  به ترتیب ضریب اصطکاک در کانال موجی شکل و کانال صاف است.

#### ۴- شرایط مرزی و روش حل عددی

در هندسه مطالعه از شبکه بندی سازمان یافته حجمی کوپر و مربعی استفاده شده است. از شبکه بندی ۷۶۰۱۰۰ به بالا

جدول ۱ ساختار هندسی دیواره های موجدار

مشخصات موج	S (mm)	a (mm)	B (mm)	$\theta(^{\circ})$	H (mm)
هندسه ۱	۱۵	۵	۷,۵	۲۲	۵
هندسه ۲	۱۰	۵	۷,۵	۵۰	۵

### ۵-۲- تاثیر سیال داخل جداره و کانال بر انتقال حرارت

تاثیر سیال داخل جداره و کانال بر انتقال حرارت برای سه حالت سیال ناحیه اول و دوم برای هندسه ۲ مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ حالت‌های مختلف سیال ناحیه اول و دوم برای هندسه ۲

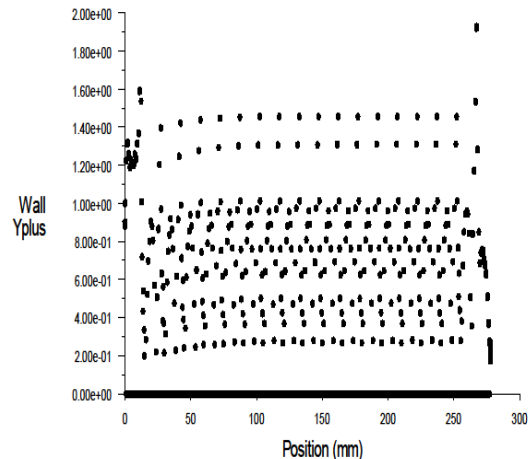
حالت	ناحیه اول	ناحیه دوم
۱	هوا	هوا
۲	هوا	نانوسیال دی اکسید تیتانیوم-آب با $\phi = 1\%$
۳	نانوسیال دی اکسید تیتانیوم-آب با $\phi = 1\%$	هوا

در شکل (۵) تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز نشان داده شده است. اگر هوا از داخل کانال بگذرد به دلیل چگالی و لزجت کمتر هوا نسبت به نانوسیال به قدرت فن کمتری نیاز است و زمانی که نانوسیال دی اکسید تیتانیوم-آب از داخل کانال می‌گذرد نیاز به قدرت پمپ بیشتری است. ضریب اصطکاک با تغییرات عدد رینولدز با توجه به افزایش همزمان افت فشار و سرعت، بسیار کم تغییر می‌کند. ضریب اصطکاک در حالتی که نانوسیال دی اکسید تیتانیوم با درصد حجمی یک درصد از وسط کانال موجی شکل

می‌گذرد (حالت ۳) حدود ۳ درصد بیشتر از حالتی است که هوا از وسط کانال موجی شکل می‌گذرد (حالت ۱ و ۲).

تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر حسب عدد  $Re$  شده است زمانی که نانوسیال به جای هوا در ناحیه دوم قرار می‌گیرد به دلیل ضریب هدایت حرارتی موثر بیشتر نانوسیال نسبت به هوا، تاثیر بسزایی در افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گذارد. حالت دوم یعنی نانوسیال دی اکسید تیتانیوم-آب در ناحیه دوم حبس شود و هوا از داخل کانال موجی شکل بگذرد دارای بیشترین ضریب انتقال

الگورتیم سیمپل استفاده شده است. معیار همگرایی در این حل عددی برای معادله پیوستگی  $10^{-4}$  و برای معادله انرژی  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. معادلات به کمک نرم افزار فلونت ۶,۳,۲۶ حل شده است.

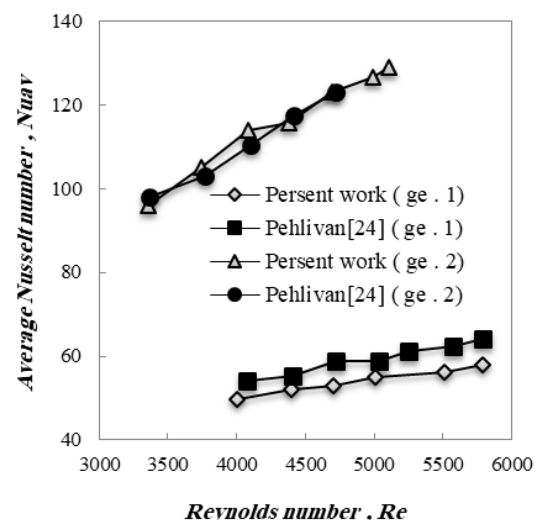


شکل ۳ نمودار  $Y^+$  بر حسب موقعیت برای هندسه ۲

### ۵- بحث و تحلیل نتایج

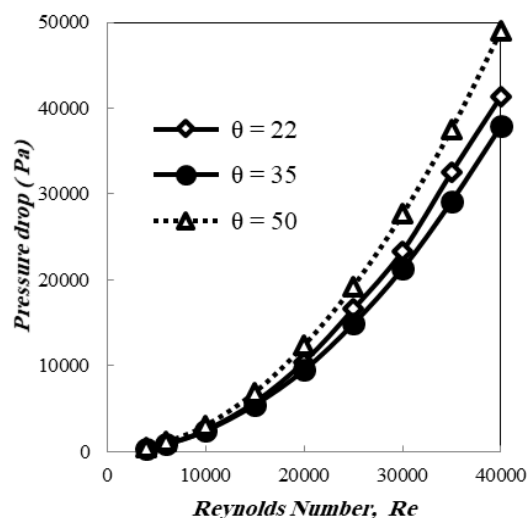
#### ۵-۱- اعتبارسنجی حل عددی

برای صحت سنجی نتایج کار تجربی پهلویان و همکارانش [۲۴] برای دو هندسه که در جدول ۱ نشان داده شده است و حالتی که در هر دو ناحیه هوا باشد با نتایج عددی حاضر در شکل (۴) مقایسه گردید. حل عددی حاضر با کار تجربی پهلویان و همکارانش همخوانی بسیار خوبی دارد. حل عددی با کار تجربی برای هندسه اول کمتر از ۲ درصد و برای هندسه دوم کمتر از ۴ درصد اختلاف دارد. بنابراین نتایج قابل قبول است.



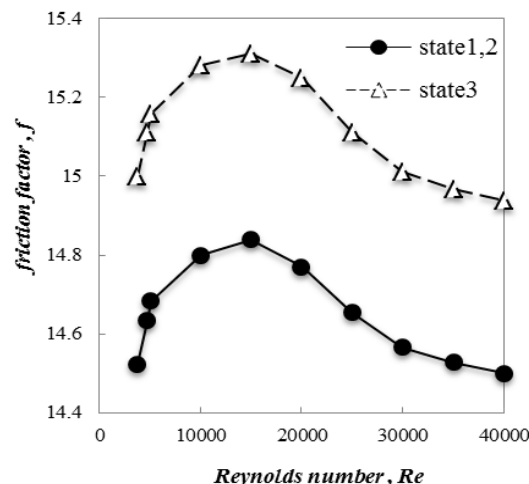
شکل ۴- تاثیر تغییر عدد رینولدز بر عدد ناسلت متوسط در کانال موجی شکل

درصد بیشتر از زاویه موج ۳۵ درجه و ۱۸ تا ۳۲ درصد بیشتر از زاویه موج ۲۲ درجه است. افزایش زاویه موج باعث تغییر الگوی جریان، اختلاط بهتر سیال می‌شود. تا اندازه‌ای با افزایش زاویه موج به علت مغشوش شدن بیشتر جریان انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌شود و با افزایش بیشتر زاویه موج به علت شکل نامناسب گردابه‌ها انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. بیشترین عدد ناسلت متوسط در رینولدزهای کمتر از ۱۵۰۰۰ در زاویه موج ۲۲ درجه و در رینولدزهای بیشتر از ۱۵۰۰۰ در زاویه موج ۳۵ مشاهده می‌شود. طبق تعریف معیار ارزیابی عملکرد، افزایش انتقال حرارت زمانی که مقدار این ضریب بیشتر از یک است اصطکاک غلبه دارد. اثر زاویه موج بر ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در شکل (۹) نشان داده شده است. با افزایش عدد رینولدز ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی کاهش می‌یابد که دلیل اصلی آن افزایش قابل توجه ضریب اصطکاک است. مقدار ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی برای زاویه موج ۵۰ درجه در رینولدزهای ۲۵۰۰۰ به بالا کوچکتر از یک شد. بدین معنی که کانال موجی شکل در این حالت کارآمد نمی‌باشد. ماکزیمم ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در زاویه موج ۲۲ درجه و رینولدز ۴۰۰۰ بدست آمد. در رینولدزهای کمتر از ۱۲۰۰۰ ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی زاویه موج ۲۲ درجه بهتر و با افزایش عدد رینولدز ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی زاویه موج ۳۵ درجه بهتر می‌شود. و انتخاب زاویه موج مناسب بسته به محدوده رینولدز می‌باشد.

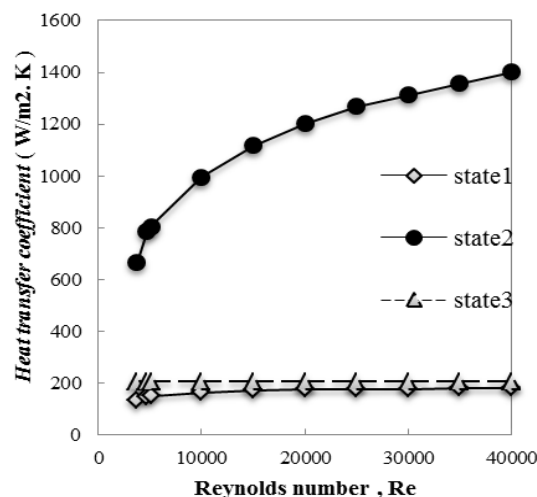


شکل ۷- تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای زاویه موج های مختلف

حرارت است بطوریکه بین ۴ تا ۶/۶۴ برابر از حالت اول و بین ۲/۲۱ تا ۵/۷۴ برابر بیشتر از حالت سوم است.



شکل ۵- تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای سه حالت هندسه دو



شکل ۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر حسب عدد رینولدز برای سه حالت هندسه دو

### ۵-۳- تاثیر تغییر زاویه موج

تاثیر تغییر زاویه موج در حالت دوم جدول ۲ (بهترین حالت) در سه زاویه موج (جدول ۳) بررسی شد.

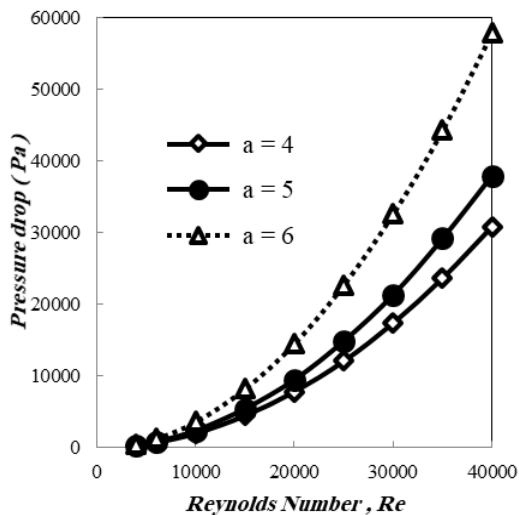
جدول ۳ ساختار هندسی دیوار موجدار با زاویه موج مختلف

Hr (mm)	H (mm)	θ(°)	B (mm)	a (mm)	S (mm)
۲۰	۵	۵۰،۳۵،۲۲	۷،۵	۵	۱۵

در شکل (۷) تا (۸) تاثیر تغییر زاویه موج بر افت فشار، عدد ناسلت متوسط نشان داده شده است. بیشترین افت فشار در زاویه موج ۵۰ درجه و کمترین افت فشار در زاویه موج ۳۵ درجه می‌باشد. افت فشار در زاویه موج ۵۰ درجه ۲۹ تا ۳۴

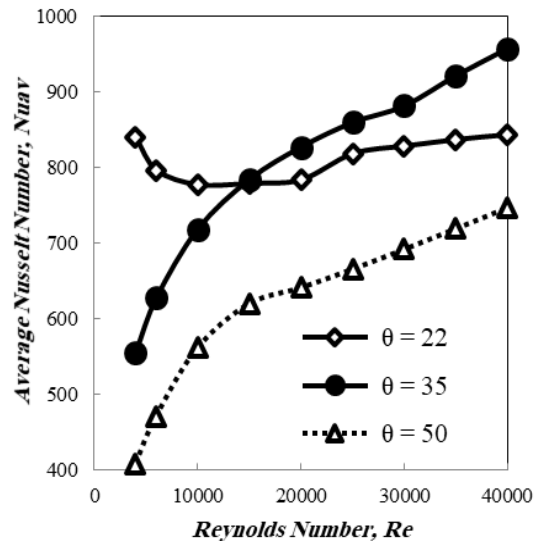


در شکل‌های (۱۰) تا (۱۱) تاثیر ارتفاع موج بر افت فشار، عدد ناسلت متوسط نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است در هر سه ارتفاع موج با افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش سرعت، شدت اغتشاشات، برخورد سریع مولکول‌ها به یکدیگر و نیز کاهش زمان برخورد مولکول‌های هوا با دیواره کانال موجی شکل، تبادل حرارت با سطوح زیاد شده، در نتیجه عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. افت فشار نیز در هر سه ارتفاع موج با افزایش عدد رینولدز که منتج به افزایش سرعت و ممنوم سیال شده، افزایش می‌یابد. و اثر افزایش عدد رینولدز بر عدد ناسلت متوسط و افت فشار بسیار زیاد می‌باشد. از طرفی با افزایش ارتفاع موج عدد ناسلت متوسط به دلیل رشد سریعتر لایه مرزی و اختلاط بیشتر جریان افزایش می‌یابد. بعلاوه افت فشار نیز با افزایش ارتفاع موج به واسطه افزایش تنش برشی در دیواره افزایش می‌یابد. و با کار احمد و همکارانش [۲۵]- [۲۶] در جریان آرام و محمد و همکارانش [۲۷] در جریان مغشوش همخوانی دارد. افت فشار در ارتفاع موج ۶ میلی متر به ترتیب حدوداً ۵۰ و ۸۰ درصد بیشتر از ارتفاع موج ۵ و ۴ میلی متر است. عدد ناسلت متوسط برای ارتفاع موج ۶ میلی متر به ترتیب بین ۹۲ تا ۱۴۰ درصد بیشتر از ارتفاع موج ۵ میلی متر و بین ۱۶۰ تا ۲۳۸ درصد بیشتر از ارتفاع موج ۴ میلی متر است.

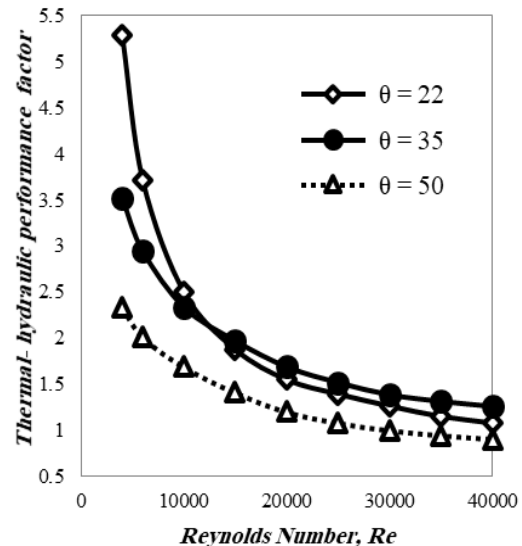


شکل ۱۰ تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای ارتفاع موج های مختلف

اثر ارتفاع موج بر ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. عملکرد کانال موجی شکل در هر سه ارتفاع موج به دلیل تولید جریان گردابی،



شکل ۸- تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای زاویه موج های مختلف



شکل ۹- تغییرات ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی بر حسب عدد رینولدز برای زاویه موج های مختلف

#### ۴-۵- تاثیر تغییر ارتفاع موج

تاثیر تغییر ارتفاع موج در حالت دوم جدول ۲ در (بهترین حالت) با غلظت یک درصد برای زاویه موج ۳۵ درجه (در رینولدزهای بالاتر از ۱۲۰۰۰ ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی بهتری داشت) در سه ارتفاع موج در جدول ۴ بررسی شد.

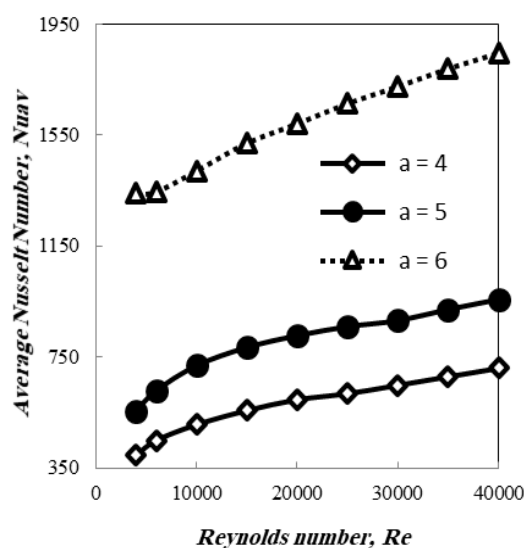
جدول ۴ ساختار هندسی دیوار موجدار با ارتفاع موج مختلف

Hr (mm)	H (mm)	$\theta$ (°)	b (mm)	a (mm)	S (mm)
۲۲,۲۰,۱۸	۵	۳۵	۸,۵, ۷,۵, ۶,۵	۶,۵,۴	۱۵

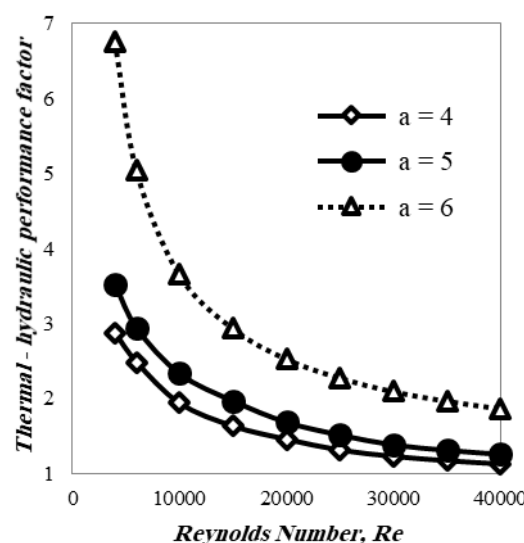
### ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه اثر وجود نانو سیال دی اکسید تیتانیوم- آب در کانالهای موجی شکل و جداره‌های آن به همراه اثر تغییر هندسه کانال (تغییر زاویه و ارتفاع موج) بر افت فشار و انتقال حرارت مطالعه عددی شده است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در حالتی که نانوسیال دی اکسید تیتانیوم - آب در جداره‌های کانال و هوا از وسط کانال بگذرد، بین ۲/۲۱ تا ۵/۷۴ برابر بیشتر از حالتی که هوا در جداره‌های کانال و نانوسیال از وسط کانال بگذرد، و بین ۴ تا ۶/۶۴ برابر بیشتر از حالتی که هوا هم در جداره‌ها و هم از وسط کانال بگذرد، است. عملکرد زاویه موج‌های مختلف به عدد رینولدز و اغتشاشات وابسته است به طوری که در رینولدزهای کمتر از ۱۲۰۰۰ ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی زاویه موج ۲۲ درجه بهتر است و ماکزیمم مقدار آن ۵/۲۹ در رینولدز ۴۰۰۰ است. با افزایش عدد رینولدز از ۱۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی زاویه موج ۳۵ درجه بهتر می‌شود. افزایش زاویه موج تا حدی مناسب می‌باشد. زاویه ۳۵ درجه به عنوان زاویه بهینه انتخاب شد. با افزایش ارتفاع موج از ۴ به ۶ میلی متر ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی حدوداً ۶۵ تا ۱۱۰ درصد افزایش می‌یابد. افزایش انتقال حرارت در اعداد رینولدز پایین در کانال موجی شکل بسیار کارآمد می‌باشد و از دیدگاه اقتصادی و مهندسی منطقی و توجیح پذیر است اما استفاده از کانال موجی شکل در رینولدزهای بالا توصیه نمی‌شود.

مناسب تر از کانال صاف می‌باشد. در رینولدزهای بالاتر افت فشار در کانال موجی شکل بیشتر از کانال صاف افزایش می‌یابد، در نتیجه با افزایش عدد رینولدز ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی کاهش می‌یابد. ماکزیمم ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در ارتفاع موج ۶ میلی متر در رینولدز ۴۰۰۰ بدست آمد که مقدار آن ۶/۷۶ است. ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در ارتفاع موج ۶ به ترتیب بین ۴۸ تا ۹۲ درصد بیشتر از ارتفاع موج ۵ میلی متر و بین ۶۵ تا ۱۱۳ درصد بیشتر از ارتفاع موج ۴ است. اثر ارتفاع موج بر افزایش ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی نسبت به تغییر زاویه موج بیشتر قابل توجه است.



شکل ۱۱- تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای ارتفاع موج مختلف



شکل ۱۲- تغییرات ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی بر حسب عدد رینولدز برای ارتفاع موج مختلف



۷- فهرست علائم

دما (k)	T		
دمای نوسانات (k)	T'		
مولفه سرعت جریان (m/s)	u	سطح مقطع کانال (mm <sup>2</sup> )	A
سرعت نوسانات (m/s)	u'	ارتفاع موج (mm)	a
سرعت سیال (m/s)	V	ظرفیت گرمایی ویژه ماده (kJ/kgk)	C
جهت مختصات	x	قطر هیدرولیکی کانال (mm)	D <sub>h</sub>
فاصله بدون بعد از مرکز سلول تا نزدیکترین دیواره	Y <sup>+</sup>	ضریب اصطکاک	f
		ارتفاع کانال (mm)	H
		فاصله قله موج های صفحات موجی شکل بالایی و پایینی	H <sub>min</sub>
نرخ اتلافات آشفتگی (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	ε	فاصله تورفتگی موج های صفحات موجی شکل بالایی و پایینی	H <sub>max</sub>
زاویه موج	Θ	ضریب انتقال حرارت جابه جایی (W/m <sup>2</sup> k)	h
لزجت دینامیکی (Pa.s)	μ	رسانایی حرارتی (W/m.k)	K
لزجت سینماتیکی (m <sup>2</sup> /s)	ν	انرژی جنبشی آشفتگی (J/kg)	k
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ρ	عدد ناسلت	Nu
غلظت حجمی نانوسیال	φ	انتقال حرارت تبادل شده (W/m <sup>2</sup> )	q"
		فشار (Pa)	P
متوسط	av	افت فشار (Pa)	dP
سیال پایه	bf	محیط خیس شده (mm)	P <sub>h</sub>
سیال	f(x)	ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی	PEC
نانو سیال	nf	عدد رینولدز	Re
نانوذرات	p	گام موج (mm)	S
صاف	S		
سطح دیواره کانال موجی شکل	w(x)		

علائم یونانی

زیر نویس ها

مراجع

- [1] J.C. Maxwell, "Treatise on Electricity and Magnetism", Vol. 1, New York: Dover, 1954.
- [2] S. Kumar, A. D. Kothiyal, M. S. Bisht, and A. Kumar, "Turbulent heat transfer and nanofluid flow in a protruded ribbed square passage", Results in physics, Vol.7, 2017, pp. 3603-3618.
- [3] V. M.Job, S.R. Gunakala, "Mixed convection nanofluid flows through a grooved channel with internal heat generating solid cylinders in the presence of an applied magnetic field", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.107, 2017, pp.133-145.
- [4] M. Parsaiemehr, F. Pourfattah, O. Ali akbari, D. Toghraie, and G. Sheikhzadeh, "Turbulent flow and heat transfer of Water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid inside a rectangular ribbed channel", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Vol. 96, 2018, pp. 73-84.
- [5] A.A.A. Arani, S. Sadripour, S. Kermani, "Nanoparticle shape effects on thermal-hydraulic performance of boehmite alumina nanofluids in a sinusoidal-wavy mini-channel with phase shift and variable wavelength", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 128, 2017, pp. 550-563.
- [6] M. Sheikholeslami, M. Nimafar, and D. Ganji, "Nanofluid heat transfer between two pipes considering Brownian motion using AGM", Alexandria engineering journal, Vol. 56, 2017, pp. 277-283.
- [7] علی اکبر عباسیان آرانی، حمیدرضا احترام، علیرضا آقایی و زهرا شمس قهفرخی، " بررسی عددی جریان سیال، انتقال حرارت و تولید آنتروپی نانوسیال در جابه جایی توام در محفظه ی "Γ" شکل"، دوره ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۱۳۵-۱۴۷.

- [۸] رضا گورکی و حسین بیکی، " بررسی CFD انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در یک کانال حاوی ذرات کروی شکل"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۲۸-۲۸.
- [۹] محمد شریفی اصل، داود طغرای و احمد رضا عظیمیان، "شبیه سازی عددی انتقال حرارت جابه جایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال در یک لوله افقی مدور"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۰-۱۰.
- [۱۰] حسین خراسانی زاده، علیرضا آقایی، حمیدرضا احترام، "بررسی عددی جریان سیال، انتقال حرارت و تولید انترپوی در جابه جایی توام نانوسیال با خواص متغیر در محفظه ای با دو منبع گرم دایره ای"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۹۹-۲۱۱.
- [۱۱] مسعود ضیایی راد، پیمان الیاسی، "بررسی عددی جریان نوسانی نانوسیال در کانال مستطیلی شکل در حالت غیردائم، نشریه مدل سازی در مهندسی"، دوره ۱۴، شماره ۴۴، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۳۴-۲۱.
- [12] E. Hosseinirad, and F. Hormozi, "Performance intensification of miniature channel using wavy vortex generator and optimization by response surface methodology: MWCNT-H<sub>2</sub>O and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids as coolant fluids", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol.124, 2018, pp. 83-96.
- [13] R. Mohebbi, M.M. Rashidi, M. Izadi, N. A. C. Sidik, and H. W. Xian, "Forced convection of nanofluids in an extended surfaces channel using lattice Boltzmann method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.117, 2018, pp. 1291-1303.
- [14] J. Rostami, A. Abbassi, and J. Harting, "Heat transfer by nanofluids in wavy microchannels", *Advanced Powder Technology*, Vol. 29(4), 2018, pp. 925-933.
- [15] H. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20(4), 1952, pp. 571-571.
- [16] F.P. Incropera, and D.P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 5th edition, John Wiley and Sons, NewYork, 2002.
- [17] P. Li, D. Zhang, and Y. Xie, "Heat transfer and flow analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Water nanofluids in microchannel with dimple and protrusion", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, 2014, pp. 456-467.
- [18] T.K. Nandi, H. Chattopadhyay, "Numerical investigations of developing flow and heat transfer in raccoon type microchannels under inlet pulsation", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 56, 2014, pp. 37-41.
- [19] S. Eiamsa-ard, and P.Promvonge, "Numerical study on heat transfer of turbulent channel flow over periodic grooves", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35(7), 2008, pp. 844-852.
- [20] S. M. Vanaki, and H. Mohammed, "Numerical study of nanofluid forced convection flow in channels using different shaped transverse ribs", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, 2015, pp. 176-188.
- [21] Y.T. Yang, H.W. Tang, B.Y. Zeng, and C. H. Wu, "Numerical simulation and optimization of turbulent nanofluids in a three-dimensional rectangular rib-grooved channel", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, 2015, pp. 71-79.
- [22] A. N. Al-Shamani, K. Sopian, H. Mohammed, S. Mat, M. H. Ruslan, and A. M. Abed, "Enhancement heat transfer characteristics in the channel with Trapezoidal rib-groove using nanofluids", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 5, 2015, pp. 48-58.
- [۲۳] محمد حسن شجاعی فرد، علیرضا نورپور، "دینامیک سیالات محاسباتی"، چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران، ۱۳۹۵.
- [24] H. Pehlivan, I. Taymaz, Y. İslamoğlu, "Experimental study of forced convective heat transfer in a different arranged corrugated channel", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, 2013, pp. 106-111

- [25]M. Ahmed, N. Shuaib, M. Yusoff, "Numerical investigations on the heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55(21-11), 2012, pp. 5891-5898.
- [26]M. Ahmed, M. Yusoff, N. Shuaib, "Effects of geometrical parameters on the flow and heat transfer characteristics in trapezoidal-corrugated channel using nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, 2013, pp. 69-74.
- [27]H. Mohammed, A.K. Abbas, J. Sheriff, "Influence of geometrical parameters and forced convective heat transfer in transversely corrugated circular tubes", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, 2013, pp. 116-126.