



## بررسی عددی و بهینه سازی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی در محفظه مربعی با درپوش متحرک

کامل میلانی شیروان<sup>1</sup>، مجتبی ماموریان<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 1111-91775، mamourian@um.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 اردیبهشت 1394

پذیرش: 11 خرداد 1394

ارائه در سایت: 03 تیر 1394

کلید واژگان:

نانو سیال آب - مس

جابجایی ترکیبی

بهینه سازی

تاگوچی

محفظه با درپوش متحرک

روش تاگوچی از سال 1980 به عنوان یک روش مؤثر به منظور بهینه سازی فرآیند طراحی نمونه‌های مهندسی به کار می‌رود. در این مقاله با استفاده از روش تاگوچی شرایط بهینه در انتقال حرارت و تولید آنتروپی جابجایی ترکیبی نانو سیال آب - مس در یک محفظه مربعی مورد بررسی عددی قرار گرفته است. بدین منظور از یک آرایه متعامد  $L_{16}(4^3)$  جهت تحلیل تاگوچی استفاده شده است. همچنین معادلات حاکم به روش حجم کنترل جبری شده و توسط الگوریتم سیمپل بطور همزمان حل شده‌اند. پارامترهای عدد ریچاردسون (0/1-100)، کسر حجمی نانوذرات مس (0-10%) و طول موج سطح موجدار (0-1) به عنوان سه فاکتور مؤثر مورد نظر جهت تحلیل در چهار سطح در نظر گرفته شده‌اند. این تحلیل برای عدد گراشوف ثابت  $10^4$  انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد ریچاردسون، کسر حجمی نانوذرات مس و طول موج سطح موجدار کاهش می‌یابد. با کمک تحلیل تاگوچی مشخص شد که دیواره تخت (با طول موج سطح موجدار صفر) در عدد ریچاردسون 0/1 و کسر حجمی 0% حالت بهینه طراحی برای انتقال حرارت می‌باشد. در حالیکه هندسه با  $\phi=5\%$ ،  $Ri=100$  و  $\lambda=0/25$  حالت بهینه طراحی برای تولید آنتروپی می‌باشد. نهایتاً برای انتقال حرارت بیشینه و تولید آنتروپی کمینه هندسه با  $\phi=0\%$ ،  $Ri=1$  و  $\lambda=0/25$  را می‌توان به عنوان هندسه بهینه انتخاب کرد.

## Numerical Investigation and Optimization of Mixed Convection and Entropy Generation in Square Cavity with Lid-Driven

Kamel Milani Shirvan, Mojtaba Mamourian\*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, mamourian@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 11 May 2015  
Accepted 01 June 2015  
Available Online 24 June 2015

Keywords:  
Cu-water nanofluid  
mixed convection  
optimization  
Taguchi  
Lid-driven cavity

### ABSTRACT

Taguchi method has been used since 1980 as an effective way to optimize the design process engineering tests. In this paper, optimal conditions of the mixed convection and entropy generation in a square cavity filled with Cu-water nanofluid is analyzed using Taguchi method. For this purpose an  $L_{16}(4^3)$  orthogonal Taguchi array is used. Discretization of the governing equations was achieved through a finite volume method and solved with SIMPLE algorithm. The effect of Richardson number (0.1-100), the volume fraction of copper nanoparticles (0-10%) and the wavelength of the wavy surface (0-1) as effective parameters for analysis in four levels are considered. This analysis was performed for fixed Grashof number 1.4. The results show that the mean Nusselt number decreases by increase of the Richardson number, the volume fraction of nanoparticles and the wavelength of the wavy surface. It is found that the Flat plate (for wavy surface with the wavelength 0) and the volume fraction 0% in the Richardson number 0.1 is optimal design for heat transfer while the geometry with  $\Phi=5\%$ ,  $Ri=100$  and  $\lambda=0.25$  is optimal design for entropy generation. Finally for maximum heat transfer and minimum entropy generation the geometry with  $\Phi=0\%$ ,  $Ri=1$  and  $\lambda=0.25$  can be considered as an optimal design.

### 1- مقدمه

نفت و گاز و غیره اشاره نمود [1]. سیالات متداول در کاربردهای تجاری که در محفظه‌های بسته یا باز استفاده می‌شوند (از جمله آب، اتیلن گلاکول، روغن) معمولاً دارای ضریب هدایت حرارتی پایینی می‌باشند. به همین دلیل تلاش‌های فراوانی در جهت بهبود انتقال حرارت توسط این سیالات صورت گرفته است. از جمله این

انتقال حرارت جابجایی در محفظه‌ها، کاربردهای مهندسی فراوانی دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، مبدل‌های حرارتی، انتقال حرارت در حوضچه‌ی خورشیدی، صنایع غذایی و شیمیایی، راکتورهای هسته‌ای، سیستم‌های روغنکاری، کالکتورهای خورشیدی، صنایع

کسر حجمی مشخص نانو سیال با افزایش عدد ریچاردسون، عدد ناسلت افزایش می یابد.

صفائی و گشایشی [10] به مدلسازی جریان انتقال حرارت جابجایی توام آرام و درهم درون یک محفظه مستطیلی با دیواره گرم بالایی پرداخته اند. نتایج حاصل از کار آن ها نشان می دهد هر چه عدد ریچاردسون کمتر باشد، نرخ انتقال حرارت بیشتر است و با افزایش عدد ریچاردسون نرخ انتقال حرارت کاهش می یابد.

کریمی پور و همکارانش [11] جابجایی توأم آزاد و اجباری ناشی از اثرات همزمان انتقال حرارت جابجایی آزاد و اجباری سیال در یک محفظه شیبدار دو بعدی با درپوش متحرک، به کمک روش شبکه بولتزمن و در مقادیر مختلف عدد ریچاردسون، زاویه ی شیب و عدد پرناتل مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی آن ها نشان می دهد که افزایش عدد پرناتل منجر به افزایش نرخ انتقال گرما، به ویژه در مقادیر بالاتر زاویه شیب و عدد ریچاردسون، می شود. همچنین آن ها رابطه ای دقیق برای محاسبه عدد نوسلت متوسط محفظه بر حسب عدد پرناتل، عدد ریچاردسون و زاویه شیب محفظه ارائه می دهند.

آقایی و همکارانش [12] در کاری عددی به بررسی اثر میدان مغناطیسی بر میدان جریان، انتقال حرارت و تولید آنتروپی جابه جایی توام نانو سیال آب-مس با لحاظ کردن اثر حرکت براونی نانوذرات در محفظه ی دوزنقه ای پرداخته اند. دیواره های جانبی هندسه کار آن ها عایق بوده، دیواره ی بالایی سرد و متحرک به سمت راست یا چپ و دیواره ی پایینی گرم می باشد. زاویه ی دیواره های جانبی با افق  $45^\circ$  است. مطالعه آن ها در عدد گراشف  $10^4$ ، برای اعداد رینولدز 30، 100، 300 و 1000، اعداد هارتمن 25، 50، 75 و 100 و کسر حجمی های 0 تا 0/04 از نانوذرات انجام شده است. نتایج آن ها نشان می دهد که در همه ی اعداد رینولدز و کسر حجمی ها با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت متوسط کاهش می یابد. همچنین در تمام حالت های بررسی شده، تغییرات آنتروپی تولیدی کل با عدد هارتمن مشابه تغییرات عدد ناسلت متوسط می باشد.

از جمله کارهای دیگری که محققین در زمینه بهبود انتقال حرارت در محفظه ها انجام داده اند استفاده از هندسه موج دار می باشد از جمله کارهایی که در این زمینه صورت گرفته می توان به کار محمود و همکارانش [13] اشاره نمود. آن ها در این کار به بررسی عددی نرخ انتقال حرارت و ویژگی های جریان سیال داخل محفظه ای با دو دیواره موج دار افقی همدم و دو دیواره عمودی صاف آدیاباتیک پرداخته اند. این شبیه سازی در محدوده طول موج متفاوت 0 تا 0/4 و نسبت منظری 1 و 2 و در محدوده اعداد گراشف  $10^0$  تا  $10^7$  صورت گرفته است. عبدالقادر و همکارانش [14] در کاری عددی به بررسی تأثیر تغییر دامنه سینوسی دیواره پایینی یک محفظه بر نرخ انتقال حرارت پرداخته اند. آن ها در این کار دیواره صاف افقی بالا و دیواره موجی پایینی را همدم و به عنوان دیواره سرد و گرم و دیواره های عمودی صاف چپ و راست را عایق فرض کرده اند. محدوده عدد رایلی آن ها از  $10^3$  تا  $10^6$  و تغییرات دامنه دیواره موجی در چهار مقدار 0، 0/15، 0/25، 0/35 می باشد. وارول و اوزتوپ [15] بر روی نرخ انتقال حرارت جابجایی داخل یک کلکتور خورشیدی بحث کرده اند. آن ها جهت انجام این کار به بررسی عددی دو مدل کلکتور خورشیدی با دیواره جاذب موج دار و دیواره جاذب بدون موج پرداخته اند. آن ها جهت انجام محاسبات، جریان را آرام و دیواره ها را در دمای ثابت و محدوده عدد رایلی را از  $10^3$  تا  $5 \times 10^7$ ، محدوده تغییرات طول موج از 1/33 تا 4 و نسبت منظری از 0 تا 4 فرض کرده اند. نتایج حاصل از تحقیق

تلاش ها می توان به افزودن نانوذرات و استفاده از هندسه موج اشاره نمود. افزودن نانوذراتی مانند مس، اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به سیال اصطلاحاً نانو سیال را ایجاد می کند و باعث بهبود ضریب انتقال حرارت می شود [2].

مسئله انتقال حرارت ترکیبی در یک محفظه مربعی/مستطیلی پر شده با نانو سیالات مختلف در سال های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است.

از جمله این کارها می توان به کار تیواری و داس [3] اشاره نمود. آن ها در کار خود به بررسی مسئله انتقال حرارت ترکیبی در یک محفظه مربعی پر شده با نانو سیال آب-مس پرداخته اند. هندسه محفظه آن ها شامل دو دیواره در دماهای ثابت در سمت راست و چپ محفظه می باشد که در جهت عمودی در حرکت هستند. نتایج تحقیق آن ها نشان می دهد که عدد ریچاردسون و جهت حرکت دیواره ها بر روی میدان جریان و انتقال حرارت تأثیرگذار می باشد. همچنین آن ها نشان داده اند با افزایش کسر حجمی نانوذرات مس در سیال پایه، عملکرد حرارتی بهبود می یابد. نعمتی و همکارانش [4] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در محفظه مربعی با دیواره های عمودی در دماهای مختلف و دیواره بالایی متحرک پر شده با نانو سیالات مختلف را بررسی نموده اند. نتایج تحقیقات آن ها نشان می دهد که انتخاب نانوذرات تأثیر بسزایی بر روی عملکرد حرارتی نانو سیال دارد. عارف منش و محمودی [5] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در یک محفظه مربعی پر شده با نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم که دیواره های کناری و بالایی آن ساکن بوده و در دمای ثابت سرد قرار دارند و دیواره پایینی آن در دمای ثابت گرم و متحرک در جهت افقی است را بررسی نموده اند. آن ها در کار خود جهت تخمین ویسکوزیته نانو سیال از دو مدل برینکمن و مایگا استفاده نموده اند. نتایج تحقیقات آن ها نشان می دهد که استفاده از این دو مدل در تخمین مقدار انتقال حرارت بویژه در مقادیر ریچاردسون پایین و کسر حجمی بالای نانوذرات دارای اختلاف قابل توجهی هستند. منصور و همکارانش [6] مسئله انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در یک محفظه مربعی که از پایین گرما داده می شود را بررسی نموده اند. نتایج تحقیقات آن ها نشان می دهد که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش یافته و با افزایش فاصله از منبع حرارتی کاهش می یابد. ابونادا و چامخا [7] جابجایی ترکیبی در یک محفظه مربعی پر شده با نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم را در حالیکه دیواره بالایی در دمای ثابت گرم بوده و با سرعت ثابت در حال حرکت می باشد و دیواره پایینی ساکن بوده و در دمای ثابت سرد قرار دارد را بررسی نموده اند. نتایج حاصل از تحقیقات آن ها نشان می دهد افزودن نانوذرات به سیال پایه عملکرد حرارتی را بهبود می بخشد. امین الساداتی و همکارانش [8] انتقال حرارت جابجایی اجباری در یک محفظه مربعی پر شده با نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم را در حالی بررسی نمودند که دیواره های بالایی و پایینی محفظه در دماهای مختلف بوده و همجهت و یا در خلاف جهت یکدیگر در حال گردش می باشند. نتایج تحقیق آن ها نشان می دهد که در تمامی مقادیر عدد ریچاردسون زمانی که نسبت منظری کاهش می یابد، نرخ انتقال حرارت بهبود می یابد. عباسیان آرنی و همکارانش [9] در یک بررسی عددی بر روی محفظه دوزنقه ای، جابجایی ترکیبی نانو سیال آب-مس را با منابع حرارتی روی دیواره های جانبی آن بررسی نموده اند. نتایج بررسی آن ها نشان می دهد که نرخ انتقال حرارت در حالتی که دریچه ورودی به دیواره سرد نزدیک تر است بیشتر از حالتی است که به دیواره گرم نزدیکتر است. همچنین نتایج آن ها نشان می دهد که به ازای یک عدد رینولدز و در یک

انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌های مربعی و مستطیلی بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است، ولی در زمینه بهینه سازی در انتقال حرارت ترکیبی در محفظه‌های مربعی جای کار بسیاری باقی مانده است. امروزه طراحی آزمایش برای به دست آوردن شرایط بهینه در مطالعات گوناگون بسیار رواج دارد [24]. از سال 1980 روش تاگوچی در صنایع مکانیک کاربردهای گسترده‌ای داشته است و به عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است [25]. در روش تاگوچی آزمایش‌ها به منظور دستیابی به اهداف، تعیین شرایط بهینه و بررسی تأثیر هر یک از عوامل مؤثر بر روی پاسخ و تخمین پاسخ تحت شرایط بهینه تجزیه و تحلیل می‌شود. همچنین در این روش نتایج ارائه شده به روش تحلیل نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ ) ارزیابی می‌شود. به عبارت دیگر نسبت عوامل ثابت عملیاتی به عوامل ایجاد اغتشاش که قابل کنترل نیستند این نسبت را ایجاد می‌نمایند. همچنین روش تاگوچی از آنوا<sup>1</sup> جهت تحلیل نتایج استفاده می‌نماید. به عبارت دیگر در این روش می‌توان از تحلیل واریانس نیز به منظور بدست آوردن اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر استفاده نمود. نتایج حاصل از این تحلیل معمولاً بصورت نمایش جدولی ارائه می‌شود. که این جدول شامل اطلاعات مفیدی از قبیل: درجه آزادی هر عامل و خطای ناشی از آن، مجموع مربعات، واریانس، درصد تأثیر عوامل در پاسخ می‌باشد [26].

با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که تا کنون بر روی بهینه‌سازی محفظه مربعی با در نظر گرفتن سه پارامتر طول موج سطح موجدار، عدد ریچاردسون و کسر حجمی نانوذرات کار خاصی صورت نگرفته است. در کارهای صورت گرفته عمدتاً تأثیر پارامترهای مؤثر بر انتقال حرارت و تولید آنتروپی بدون بهینه سازی مورد بررسی قرار گرفته است و مطالعه‌ای به منظور بهینه سازی همزمان پارامترها به میان نیامده است.

نوآوری این مقاله نسبت به مطالعات انجام شده قبلی، بررسی عددی جهت بهینه‌سازی نرخ انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی در محفظه مربعی با در نظر گرفتن سه پارامتر مؤثر بر انتقال حرارت بطور همزمان می‌باشد. لذا در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از روش تاگوچی به بررسی سه پارامتر تأثیرگذار بر نرخ انتقال حرارت با توجه به دیدگاه تولید آنتروپی به صورت همزمان پرداخته شود. نهایتاً هندسه بهینه از لحاظ افزایش انتقال حرارت، کاهش تولید آنتروپی و همچنین از لحاظ افزایش انتقال حرارت و کاهش آنتروپی بطور همزمان مشخص شده است.

در این مقاله تأثیر کسر حجمی نانو ذرات مس ( $0-10\%$ )، طول موج دیواره موجدار ( $0-100$ ) در اعداد ریچاردسون مختلف ( $0/1-100$ ) و در عدد گراشهف ثابت  $10^4$  بر روی انتقال حرارت و تولید آنتروپی بر روی دیواره موجدار گرم محفظه مربعی مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- بیان مسئله

هندسه مورد مطالعه در مقاله حاضر در شکل 1 مشاهده می‌شود. همانگونه که مشهود است، این هندسه شامل یک محفظه مربعی با دیواره گرم موجدار تحت شار حرارتی ثابت و دیواره سرد صاف تحت دمای ثابت می‌باشد که دو دیواره صاف بالایی و پایینی آن عایق بوده و دیواره بالایی با سرعت ثابت  $U_0$  حرکت می‌کند.

سطح موجدار توسط معادله بی بعد کسینوسی (1) شبیه سازی شده

است:

آن‌ها نشان می‌دهد نرخ انتقال حرارت در دیواره موجی بیشتر از دیواره جاذب صاف می‌باشد.

رستمی [16] نرخ انتقال حرارت غیرپایا و ویژگی‌های جریان سیال داخل یک محفظه را بررسی نموده است. محفظه مورد بررسی دارای دو دیواره عمودی موجی با تابع کسینوسی و دو دیواره صاف افقی می‌باشد. دیواره بالایی و پایینی آدیاباتیک و دیواره‌های موجی عمودی در دمای ثابت هستند. محدوده تغییرات عدد گراشهف از  $10^3$  تا  $10^6$  و نسبت موج (دامنه به طول موج) از 0 تا 0/35 و نسبت منظری (عرض به طول موج) از 0/5 تا 1 می‌باشد.

اوزتوپ و همکارانش [17] به بررسی نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد محفظه‌ای با منبع گرمایی حجمی و دیواره موجی پرداخته‌اند. در این محفظه دیواره‌های عمودی موج دار و در دمای متفاوت و دیواره‌های صاف افقی بالایی و پایینی آدیاباتیک فرض شده‌اند. هدف از بررسی این مقاله بررسی تأثیر اعداد رایلی داخلی و خارجی و اندازه طول موج دیواره بر نرخ انتقال حرارت بوده است. وانگ و چن [18] به بررسی نرخ انتقال حرارت جریان داخل یک کانال با دیواره سینوسی پرداخته‌اند. هدف از این کار بررسی تأثیر طول موج دیواره بر عدد ناسلت، ضریب اصطکاک، و عدد پرنتل بوده است. نتایج حاصل از این شبیه سازی نشان می‌دهد، مقادیر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز و طول موج افزایش می‌یابد.

محمود و فریزر [19] به بررسی تولید آنتروپی همراه با انتقال حرارت و جریان در داخل محفظه‌ای با دو دیواره صاف افقی و دو دیواره موجی عمودی پرداخته‌اند. منحنی دیواره موج دار، سینوسی فرض شده است. دیواره‌های صاف بالایی و پایینی آدیاباتیک و دیواره‌های عمودی موجدار دما ثابت فرض شده‌اند. این تحقیق در محدوده عدد گراشهف  $10^3$  تا  $10^7$  و نسبت منظری 1 تا 4 و محدوده طول موج دیواره 0 تا 0/6 صورت گرفته است.

جودکی و اشرافی زاده [20] به بررسی جریان سیال آرام و پایدار درون یک کانال با دیواره‌های موجدار پرداخته‌اند. آن‌ها در کار خود اثر چند پارامتر هندسی نازل‌ها و دیفیوزرهای فرضی نظیر طول/شکل دیواره و میزان عدم تقارن را بر افت فشار سیال و نرخ جابجایی حرارت در یک کانال دو بعدی مورد مطالعه قرار داده‌اند. فرضیات آن‌ها شامل جریان داخلی، لزج و غیرقابل تراکم و عدد رینولدز 200 می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه انجام شده نشان می‌دهد که افزایش طول نازل نسبت به دیفیوزر در یک واحد تکراری در امتداد کانال باعث افزایش عدد نوسلت متوسط شده ولی عدم تقارن دیواره‌ها بسته به میزان آن ممکن است باعث کاهش یا افزایش عدد نوسلت شود.

در زمینه بهینه‌سازی محفظه‌های بسته می‌توان به کارهای داسیلوا و گوزیلین [21] اشاره نمود. آن‌ها در کار خود به بهینه سازی هندسه L و C مانند کانال پرداخته‌اند. آن‌ها در این کار به دنبال یافتن ماکزیمم مقدار نرخ انتقال حرارت از دیواره گرم به سیال خنک کار بودند. بهینه سازی آن‌ها بصورت عددی و با استفاده از تکنیک حجم محدود برای یافتن فاصله، طول و ارتفاع بهینه انجام شد. اون الله و همکارانش [22] به بهینه‌سازی عددی شکل هندسی یک محفظه بسته مشابه محفظه مربعی برای جریان جابجایی طبیعی پرداخته‌اند. بررسی آن‌ها برای اعداد رایلی مختلف و زوایای مختلف چرخش محفظه انجام شد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بهینه سازی مطلوب در اعداد رایلی بالا اتفاق می‌افتد. همچنین می‌توان به کار اوچند و همکارانش [23] اشاره نمود.

1- Analysis of Variance (ANOVA)

سمت چپ تحت شار حرارتی ثابت  $q_0$  قرار دارد و دیواره سمت راست در دمای ثابت  $T_L$ ، قرار گرفته است. همچنین دیواره‌های بالایی و پایینی محفظه مربعی عایق بوده و دیواره بالایی با سرعت ثابت  $U_0$  در حرکت می‌باشد. شرایط مرزی در زیر ارائه شده است:

دیواره سمت چپ:

$$u^* = 0 \text{ و } v^* = 0, \frac{\partial \theta}{\partial \bar{n}^*} = \frac{k_{bf}}{k_{nf}} \quad (11)$$

دیواره سمت راست:

$$u^* = 0 \text{ و } v^* = 0, \theta = 0 \quad (12)$$

دیواره بالایی:

$$u^* = 1 \text{ و } v^* = 0, \frac{\partial \theta}{\partial \bar{n}^*} = 0 \quad (13)$$

دیواره پایینی:

$$u^* = 0 \text{ و } v^* = 0, \frac{\partial \theta}{\partial \bar{n}^*} = 0 \quad (14)$$

در این مقاله عملکرد انتقال حرارتی نانوذرات در دیواره موجدار گرم بر اساس عدد ناسلت تخمین زده می‌شود.

عدد ناسلت (Nu) برابر است با:

$$Nu = \frac{hW}{k_{bf}} \quad (15)$$

در این معادله  $h$  بیانگر ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌باشد.

(می‌توان آنرا از قانون سرمایش نیوتن به صورت زیر تخمین زد  $(h = \frac{q_0}{T_s - T_L})$  زیر نویس S بیانگر دمای سطح می‌باشد.

با جایگذاری مقادیر  $h$  در رابطه (15) و با استفاده از تعریف  $\theta$  در رابطه (2) داریم:

$$Nu = \frac{1}{\theta_s} \quad (16)$$

نهایتاً مقدار ناسلت متوسط بر روی ناحیه موجدار دیواره سمت چپ طبق رابطه (17) بدست می‌آید:

$$Nu = \frac{1}{l_w^*} \int_0^{\lambda} Nu d\eta \quad (17)$$

$l_w^*$  طول بی بعد دیواره موجی می‌باشد.

### 3-2- تولید آنتروپی

نرخ تولید آنتروپی بی بعد محلی در میدان دو بعدی جریان با قرار دادن روابط بی بعد در معادله بعد دار و طبق رابطه (18) و (19) بدست می‌آید [28]:

$$S^*_{i,l} = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \cdot \frac{1}{(\theta + T_r)^2} + \left[ \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{Ec \cdot Pr}{\theta + T_r} \cdot \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right)^2 + \left( \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right)^2 \right\} \quad (18)$$

$$S^*_{i,1} = S^*_{i,h} + S^*_{i,f} \quad (19)$$

تولید آنتروپی کلی بر واحد حجم طبق رابطه (20) بدست می‌آید:

$$S_t = \frac{1}{V^*} \int S^*_{i,l} dV^* \quad (20)$$

### 3-3- روابط مربوط به خواص نانوسیال

خواص ترموفیزیکی نانوسیال برای حل معادلات حاکم (3) تا (6) از روابط (21-24) بدست می‌آیند [29، 30]. معادلات (23) و (24) بترتیب مربوط به ویسکوزیته مؤثر نانوسیال (رابطه برینکمن) و ضریب هدایت گرمایی مؤثر نانوسیال (مدل ماکسول-گارتنس) می‌باشند.

$$x^* = \alpha_w [1 - \cos\left(\frac{2\pi y^*}{\lambda^*}\right)] \quad (1)$$

که  $x^*$  و  $y^*$  اعداد بدون بعد موقعیت مختصاتی،  $\lambda^*$   $(\lambda/w)$  طول موج بی بعد و  $\alpha_w$  دامنه سطح موجدار می‌باشند.

### 3- معادلات اساسی حاکم

در این مطالعه رفتار سیال و ویژگی‌های انتقال حرارت نانو سیال در محفظه مربعی با درپوش متحرک که در شکل 1 مشاهده می‌شود، توسط معادلات پیوستگی، ناویر استوکس و انرژی بدست می‌آیند. لذا جهت ساده سازی معادلات حاکم از فرضیات زیر استفاده شده است:

- نانو سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر می‌باشد.
- تمامی خواص ترموفیزیکی نانوسیال ثابت بوده بجز چگالی که بر اساس تقریب بوزینسک تغییر می‌نماید.
- سیال پایه (آب) و نانوذرات مس در تعادل گرمایی بوده و بین آن‌ها حرکت نسبی اتفاق نمی‌افتد.
- میدان‌های سرعت و دما بصورت دوبعدی، آرام و دائم در نظر گرفته شده‌اند.
- از اثرات تشعشع صرف‌نظر شده است.

با استفاده از فرضیات بالا و بکار بردن روابط بی‌بعد رابطه (2) در معادلات حاکم بعددار [27]، معادلات بدون بعد حاکم به صورت (3) تا (6) خواهند بود:

$$x^* = \frac{x}{W}, y^* = \frac{y}{W}, u^* = \frac{u}{U_0}, v^* = \frac{v}{U_0} \quad (2)$$

$$p^* = \frac{p}{\rho_{bf} U_0^2}, \theta = \frac{T - T_L}{\frac{q_0 W}{k_{bf}}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (3)$$

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_{bf}} \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (4)$$

$$u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = -\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_{bf}} \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) + \frac{(1 - \phi)(\rho\beta)_{bf} + \phi(\rho\beta)_p}{\rho_{nf} \beta_{bf}} Ri \cdot \theta \quad (5)$$

$$u^* \frac{\partial \theta}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \theta}{\partial y^*} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_{bf}} \frac{1}{Re \cdot Pr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{*2}} \right) \quad (6)$$

Re، بیانگر عدد رینولدز بوده و برابر است با:

$$Re = \frac{\rho_{bf} U_0 W}{\mu_{bf}} \quad (7)$$

همچنین Pr، بیانگر عدد پرانتل می‌باشد که برابر است با:

$$Pr = \frac{\nu_{bf}}{\alpha_{bf}} \quad (8)$$

Ri، عدد ریچاردسون می‌باشد که طبق تعریف برابر است با:

$$Ri = \frac{g \beta_{bf} \left( \frac{q_0 W}{k_{bf}} \right) W}{U_0^2} = \frac{Gr}{Re^2} \quad (9)$$

Gr، عدد گراشهف می‌باشد که برابر است با:

$$Gr = \frac{g \beta_{bf} \left( \frac{q_0 W}{k_{bf}} \right) W^3}{\nu_{bf}^2} \quad (10)$$

### 3-1- شرایط مرزی

در بیان شرایط مرزی برای حل معادلات حاکم، فرض شده است که دیواره

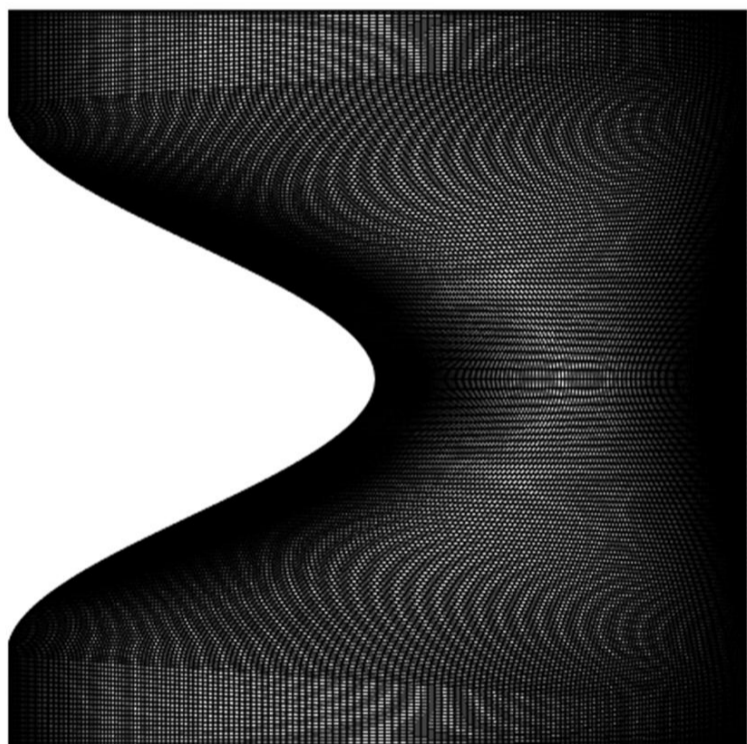
است و میدان‌های سرعت - فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل با یکدیگر کوپل شده‌اند. شرط همگرایی، مجموع باقیمانده تمامی نقاط شبکه مربوط به معادله پیوستگی کمتر از  $10^{-6}$  لحاظ شده است.

به منظور ایجاد دامنه حل در محفظه موج دار، یک محفظه مربعی با دیواره موجدار در نظر گرفته شده و همانطور که در شکل شماره 2 مشاهده می‌شود، مش بندی شده است.

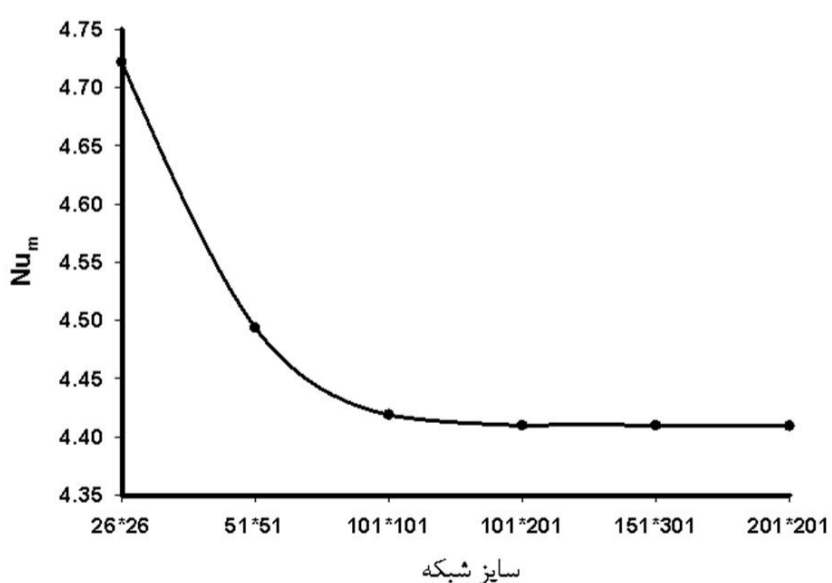
جهت بررسی استقلال شبکه، مقدار عدد ناسلت متوسط بر روی دیواره موجدار با در نظر گرفتن شرایط مرزی روابط (11) تا (14) ملاک عمل قرار گرفته است. بدین منظور از هندسه‌ای با طول موج سطح موجدار  $\lambda = 1$  و دامنه سطح موجدار 0/25 استفاده شده است.

تغییرات عدد ناسلت بر روی دیواره موجدار با شار ثابت در هندسه مورد نظر در شکل 3 رسم شده است. با توجه به نتایج بدست آمده شبکه با تعداد  $101 \times 201$  جهت حل معادلات انتخاب شده است.

جهت اعتبار سنجی نتایج در حالت جابجایی ترکیبی، نتیجه کار حاضر با شار حرارتی معادل مرجع [33] در جدول 1 مقایسه شده است. در مرجع [33] جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در یک محفظه مربعی پر شده با هوا مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار دیواره‌های افقی محفظه مربعی عایق بوده و دیواره‌های عمودی آن (سرد و گرم) در حرکت هستند.



شکل 2 شبکه بندی میدان حل



شکل 3 تغییرات عدد ناسلت متوسط با سایز شبکه ( $\phi = 0\%$  ,  $Ra=10^6$ )

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (21)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_{bf} + \phi(\rho c_p)_p \quad (22)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (23)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{(k_p + 2k_{bf}) - 2\phi(k_{bf} - k_p)}{(k_p + 2k_{bf}) + \phi(k_{bf} - k_p)} \quad (24)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (25)$$

#### 4- بررسی استقلال شبکه و صحت سنجی عددی

از آنجا که هندسه توصیف شده با رابطه (1)، هندسه‌ای در دستگاه غیر متعامد می‌باشد، لذا برای حل معادلات حاکم در این دستگاه غیر متعامد، توسط یک تکنیک انتقال مختصاتی معادلات از دستگاه مختصاتی کارتزین متعامد به دستگاه مختصاتی منحنی-خطی تولید شده منتقل می‌شوند. بنابراین معادلات حاکم در دستگاه مختصاتی جدید بصورت زیر خواهند بود [31,32]:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} (\rho_\phi U f) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho_\phi V f) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{\Gamma_\phi}{J} \left( \alpha_\phi \frac{\partial f}{\partial \xi} - \beta_\phi \frac{\partial f}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \frac{\Gamma_\phi}{J} \left( -\beta_\phi \frac{\partial f}{\partial \xi} + \gamma_\phi \frac{\partial f}{\partial \eta} \right) \right] + JS_\phi \quad (26)$$

که در رابطه (26)  $f$  متغیر عمومی می‌باشد.  $\xi$  و  $\eta$  دو محور دستگاه مختصات انتقالی می‌باشند. در رابطه (26) مقادیر  $U$  و  $V$  به ترتیب اجزا سرعت در مختصات انتقال یافته می‌باشند عبارتند از:

$$U = \left( \frac{\partial y^*}{\partial \eta} \right) u^* - \left( \frac{\partial x^*}{\partial \eta} \right) v^* \quad (27)$$

$$V = \left( \frac{\partial x^*}{\partial \xi} \right) v^* - \left( \frac{\partial y^*}{\partial \xi} \right) u^* \quad (28)$$

که در آن  $S_\phi$  ترم منبع انرژی،  $\alpha_\phi$ ،  $\beta_\phi$ ،  $\gamma_\phi$  به ترتیب پارامترهای دستگاه مختصاتی انتقالی و  $J$  فاکتور ژاکوبین به فرم (29) تا (32) هستند:

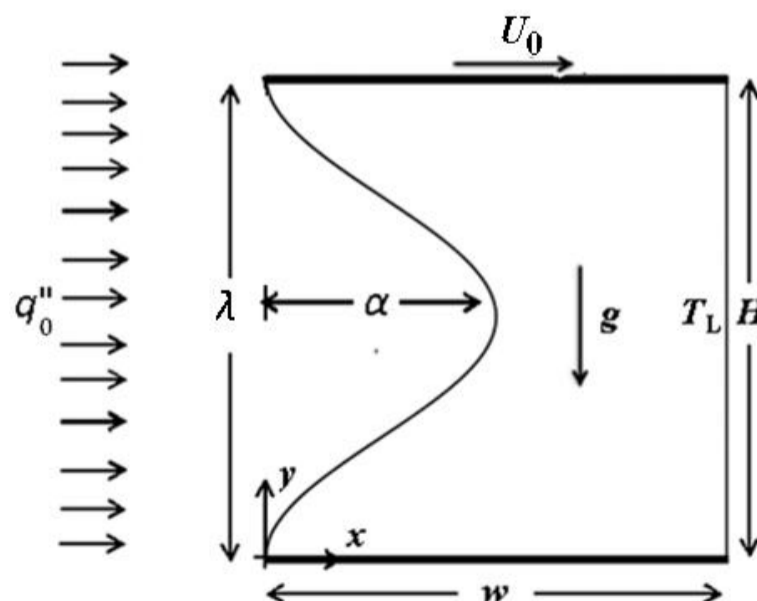
$$\alpha_\phi = \left( \frac{\partial x^*}{\partial \eta} \right)^2 - \left( \frac{\partial y^*}{\partial \eta} \right)^2 \quad (29)$$

$$\beta_\phi = \left( \frac{\partial x^*}{\partial \xi} \right) \left( \frac{\partial x^*}{\partial \eta} \right) + \left( \frac{\partial y^*}{\partial \xi} \right) \left( \frac{\partial y^*}{\partial \eta} \right) \quad (30)$$

$$\gamma_\phi = \left( \frac{\partial x^*}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \frac{\partial y^*}{\partial \xi} \right)^2 \quad (31)$$

$$J = \left( \frac{\partial x^*}{\partial \xi} \right) \left( \frac{\partial y^*}{\partial \eta} \right) - \left( \frac{\partial x^*}{\partial \eta} \right) \left( \frac{\partial y^*}{\partial \xi} \right) \quad (32)$$

در مطالعه حاضر معادلات حاکم بی بعد بدست آمده در بخش 3 با استفاده از روش حجم محدود به صورت عددی حل شده است. ترم جابجایی در معادلات حاکم از روش تقریب بالادست مرتبه دوم، گسسته سازی شده



شکل 1 شماتیک محفظه مربعی با دیواره موجدار تحت شار حرارتی ( $g$ ، شتاب جاذبه،  $\lambda$  طول موج و  $\alpha$  دامنه سطح موجدار)

جدول 1 مقایسه عدد ناسلت متوسط در محفظه پر شده با هوا با کار مرجع [33] در

حالت جابجایی ترکیبی		
Ri	کار حاضر	از توپ وداکتین [33]
0/1	3/409	3/406
1	1/927	1/921
10	0/966	0/961
100	1/050	1/048

### 5- طراحی به کمک روش تاگوچی

همانگونه که در بخش مقدمه نیز توضیح داده شد، در مطالعه حاضر به کمک روش تاگوچی، به تجزیه و تحلیل انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی با در نظر گرفتن سه پارامتر مؤثر پرداخته شده است.

هدف از این بررسی یافتن هندسه بهینه با در نظر گرفتن تأثیر همزمان سه پارامتر مدنظر و همچنین بررسی تأثیر پارامترهای مورد مطالعه در این مقاله بر نرخ انتقال حرارت و تولید آنتروپی در محفظه مربعی با دیواره گرم تحت شار حرارتی ثابت می باشد.

پارامترهای بی بعد استفاده شده در این شبیه سازی عبارتند از:

- کسر حجمی نانوذرات ( $\phi$ ): مقدار  $\phi$  از 0% (آب خالص) تا 10% تغییر می کند.
- عدد ریچاردسون ( $Ri$ ): این عدد از  $10^{-1}$  تا  $10^2$  متغیر می باشد.
- عدد گراشهف ( $Gr$ ): عدد گراشهف  $10^4$  می باشد.
- دامنه سطح موج دار ( $\alpha$ ): که دامنه در این مقاله ثابت و برابر با  $\alpha = 0/25$  می باشد.
- خواص ترمودینامیکی آب به عنوان سیال پایه و نانوذرات مس در جدول شماره 2 آورده شده است.
- طول موج سطح موج دار ( $\lambda$ ): دامنه تغییر آن از  $\lambda = 0$  تا  $\lambda = 1$  می باشد.
- عدد بی بعد پرانتل، در این مطالعه برابر با  $6/8$  ( $Pr = 6/8$ ) در نظر گرفته شده است.

جهت تعیین شرایط بهینه انتقال حرارت و تولید آنتروپی، 3 فاکتور مهم کسر حجمی نانوذرات، عدد ریچاردسون و طول موج سطح موج دار در چهار سطح مختلف مورد بررسی قرار گرفت. جدول شماره 3 مقادیر مربوط به هر یک از سه فاکتور مورد بررسی در این مقاله را در چهار سطح 1، 2، 3 و 4 نشان می دهد.

نمونه های طراحی شده به کمک روش تاگوچی با 16 نمونه (آرایه متعامد  $L_{16}$ ) در جدول 4 ارائه شده است. همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، در روش تاگوچی در تحلیل آماری نتایج، از یک تابع پاسخ تبدیل یافته به صورت نسبت علامت اثر ( $S$ ) به اثر ناشی از خطا ( $N$ ) استفاده می شود. مزیت عمده استفاده از این پاسخ در تحلیل آماری را می توان در امکان مقایسه بزرگی اثرات ناشی از هر پارامتر مؤثر فرض شده با اثرات ناشی از عوامل

### جدول 2 خواص ترمودینامیکی سیال پایه (آب) و نانوذرات [28]

خواص ترموفیزیکی	نانوذرات مس	آب خالص
$C_p$ ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )	385	4179
$K$ ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )	400	0/613
$\beta \times 10^5$ ( $K^{-1}$ )	1/67	21
$\rho$ ( $kgm^{-3}$ )	8933	997/1

ایجاد خطا و اغتشاش در اندازه گیری دانست [34].

در محاسبه نسبت سیگنال به نویز بسته به هدف از بهینه سازی مقادیر متفاوت خواهد شد. از آنجا که در مطالعه حاضر هدف افزایش در میزان انتقال حرارت و همچنین کاهش در میزان تولید آنتروپی می باشد لذا این نسبت مطابق رابطه (33) محاسبه خواهد شد [35]:

$$\frac{S}{N} = -10 \times \log\left(\sum \left(\frac{1}{y_n^2}\right)/n\right) \quad (33)$$

در رابطه (33) مقدار پاسخ اندازه گیری شده برای هر نمونه در هر آزمون بوده و  $n$  تعداد تکرار نمونه می باشد.

نتایج حاصل از محاسبه نسبت سیگنال به نویز حاصل از تحلیل تاگوچی برای هر نمونه در جدول 5 مشاهده می باشد.

### 6- تحلیل نتایج

در این بخش پاسخ هر نمونه با استفاده از رابطه (33) به نرخ  $S/N$  تبدیل شده است. میزان و نحوه تأثیر پارامترهای فرض شده بر پاسخ تبدیل یافته سیستم در جداول شماره 6 و 7 و شکل های 4 و 5 مشاهده می شوند.

از آنجا که هدف از تحلیل تاگوچی، بیشینه کردن انتقال حرارت می باشد، لذا باید بالاترین مقدار نسبت سیگنال به نویز را در تحلیل نتایج مد نظر قرار داد.

در شکل های 4 و 5، نسبت سیگنال به نویز حاصل از تحلیل تاگوچی برای دستیابی به انتقال حرارت بیشینه و همچنین تولید آنتروپی کمینه مشاهده می شود. هر چه مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز یک سطح از

جدول 3 پارامترهای مورد بررسی و سطوح آنها در تحلیل تاگوچی

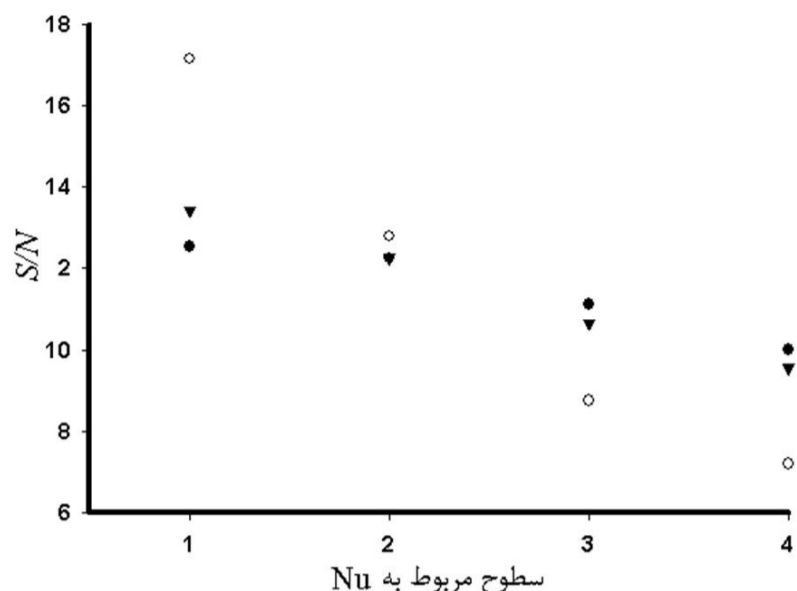
پارامترهای مورد بررسی	سطوح			
	1	2	3	4
1 کسر حجمی نانوذرات ( $\phi$ ) %	0	2	5	10
2 عدد ریچاردسون ( $Ri$ )	0/1	1	10	100
3 طول موج سطح موج دار ( $\lambda$ )	0	0/25	0/75	1

جدول 4 جدول نمونه های طراحی شده به روش تاگوچی

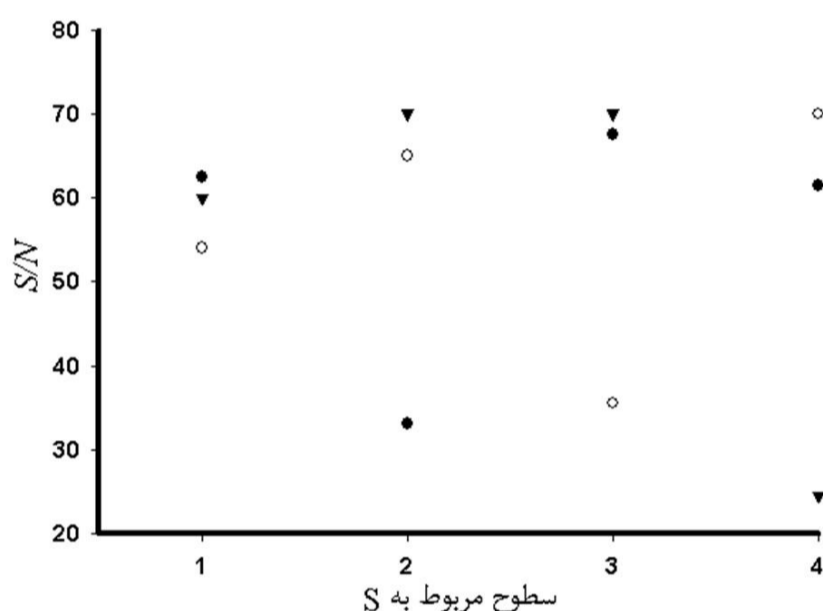
شماره نمونه	فاکتورها					نتایج
	$\phi$ %	$Ri$	$\lambda$	$Nu$	$S_i$	
1	0	0/1	0	9/48	0/01004259	
2	0	1	0/25	5/25	$1/50 \times 10^{-05}$	
3	0	10	0/75	3/10	$4/33 \times 10^{-06}$	
4	0	100	1	2/08	$2/83 \times 10^{-05}$	
5	2	0/1	0/25	9/12	0/0001132	
6	2	1	0	6/22	0/0010148	
7	2	10	1	2/26	0/0002460	
8	2	100	0/75	2/19	$2/09 \times 10^{-06}$	
9	5	0/1	0/75	6/05	0/0001395	
10	5	1	1	3/38	0/0019134	
11	5	10	0	3/33	$8/83 \times 10^{-05}$	
12	5	100	0/25	2/25	$1/64 \times 10^{-06}$	
13	10	0/1	1	5/14	0/0167436	
14	10	1	0/75	3/28	$1/63 \times 10^{-05}$	
15	10	10	0/25	2/40	$2/62 \times 10^{-06}$	
16	10	100	0	2/47	$1/01 \times 10^{-05}$	

جدول 5 جدول مربوط به سیگنال به نویز برای هر نمونه

شماره نمونه	S/N (مربوط به Nu)	S/N (مربوط به Si)
1	19/536	40
2	14/403	70
3	9/827	70
4	6/361	70
5	19/209	70
6	15/875	60
7	7/082	-67/819
8	6/808	70
9	15/635	70
10	10/578	60
11	10/448	70
12	7/783	70
13	14/219	35/917
14	10/317	70
15	7/604	70
16	7/853	70



شکل 4 مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز برای سطوح مختلف (Nu) (دایره توپر  $(\phi)$ ، دایره توخالی (Ri)، مثلث  $(\lambda)$ )



شکل 5 مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز برای سطوح مختلف (Si) (دایره توپر  $(\phi)$ ، دایره توخالی (Ri)، مثلث  $(\lambda)$ )

یک فاکتور مقدار بیشتری داشته باشد، آن سطح دارای تأثیر بیشتری می باشد. به عبارت دیگر مقدار بهینه هر پارامتر، مقدار متناظر سطحی است که متوسط نسبت سیگنال به نویز آن بیشتر است.

در جداول 8 و 9 رتبه اهمیت هر پارامتر با توجه به نکته گفته شده در بالا قابل مشاهده می باشد.

همانگونه که در جداول 8 و 9 مشاهده می شود، اگر هدف بهینه کردن

جدول 6 مقادیر سیگنال به نویز برای هر سطح از پارامترهای مورد نظر (Nu)

پارامترهای مؤثر	مقادیر S/N			
	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
$\phi$ %	12/531	12/244	11/111	9/998
Ri	17/149	12/793	8/74	7/201
$\lambda$	13/428	12/25	10/647	9/56

جدول 7 مقادیر سیگنال به نویز برای هر سطح از پارامترهای مورد نظر (Si)

پارامترهای مؤثر	مقادیر S/N			
	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
$\phi$ %	62/50	33/045	67/5	61/479
Ri	53/979	65/00	35/545	70/00
$\lambda$	60/00	70/00	70/00	24/524

جدول 8 اهمیت پارامتر مؤثر بر حسب اختلاف مقادیر سیگنال به نویز (Nu)

پارامترهای مؤثر	اختلاف مقادیر بیشینه و کمینه	رتبه اهمیت پارامتر
$\phi$ %	2/533	3
Ri	9/948	1
$\lambda$	3/868	2

جدول 9 اهمیت پارامتر مؤثر بر حسب اختلاف مقادیر سیگنال به نویز (Si)

پارامترهای مؤثر	اختلاف مقادیر بیشینه و کمینه	رتبه اهمیت پارامتر
$\phi$ %	34/455	2
Ri	34/455	2
$\lambda$	45/476	1

نرخ انتقال حرارت باشد، به ترتیب پارامترهای ریچاردسون، طول موج سطح موجدار و کسر حجمی نانوذرات بیشترین تأثیر را دارند.

همانگونه که در جدول 8 مشاهده می شود، برای پارامتر کسر حجمی نانوذرات مقدار بیشینه نسبت سیگنال به نویز قاطع نمی باشد. به عبارت دیگر اختلاف بین مقدار بیشینه و مقدار بعد آن بسیار کم می باشد، لذا جهت حصول اطمینان بیشتر نمونه دیگری طراحی شده است. این نمونه و نتایج حاصل از آن در جدول 10 مشاهده می شود.

همانگونه که در جدول 10، مشهود است در این طراحی سطح پارامتر کسر حجمی نانوذرات در هر نمونه تغییر کرده و نتایج بدست آمده اند. نتایج بدست آمده نشان می دهند که سطح ارائه شده توسط روش تاگوچی ( $\phi=0\%$ ) ،  $(\lambda=0, Ri=0/1)$  سطح بهینه می باشد.

همچنین اگر هدف بهینه کردن تولید آنتروپی باشد، به ترتیب طول موج و سپس عدد ریچاردسون و کسر حجمی نانوذرات بیشترین تأثیر را دارند. همانطور که در جدول 9 مشهود است،  $\phi=5\%$  ،  $Ri=100$  ،  $\lambda=0/25$  به عنوان سطح بهینه ارائه می شود.

جداول 6 و 7 مقادیر سیگنال به نویز را برای هر سطح از پارامترهای مورد نظر با در نظر گرفتن دو پارامتر انتقال حرارت و تولید آنتروپی نشان می دهد. با مقایسه بین مقادیر آن ها می توان به این نتیجه رسید که هندسه با  $\phi=0\%$  ،  $Ri=1$  ،  $\lambda=0/25$  را می توان با در نظر گرفتن دو پارامتر انتقال

### 7- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر نتایج

در این بخش به بررسی تأثیر هر یک از عوامل انتخابی به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر انتقال حرارت و تولید آنتروپی با توجه به مقادیر نسبت سیگنال به نویز که در شکل‌های 4 و 5 قابل مشاهده است، پرداخته می‌شود. بدین منظور تأثیر پارامترهای کسر حجمی نانوذرات، عدد ریچاردسون و طول موج سطح موجدار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در عدد ریچاردسون برابر با یک، چرخش ایجاد شده در محفظه تقریباً حالت تقارن پیدا می‌کند (شکل 6، الف) بعبارت دیگر در این حالت تأثیر نیروهای شناوری که در اثر اختلاف دما بین دو دیواره کناری ایجاد می‌شوند، با تأثیر نیروهای برشی ناشی از حرکت دیواره‌ی بالا برابر است. از آنجا که در این حالت نیروهای شناوری و نیروهای برشی در یک جهت عمل می‌نمایند لذا شدت چرخش گردابه افزایش می‌یابد.

همانگونه که در شکل 5 مشاهده می‌شود، با افزایش سطح عدد ریچاردسون، طول موج سطح موجدار و کسر حجمی نانوذرات، مقدار نسبت سیگنال به نویز کاهش می‌یابد. این مفهوم بدان معناست که هر چه مقدار پارامترهای تأثیرگذار افزایش یابد مقدار انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

در اعداد ریچاردسون پایین، میدان‌های سرعت و دما تحت تأثیر جابجایی اجباری قرار دارند. در حالی که در ریچاردسون‌های بالا، جابجایی طبیعی مکانیزم غالب را داشته و از تأثیر جابجایی اجباری کاسته می‌شود. این مفهوم در کانتورهای دمای شکل 7 (ب) مشهود می‌باشد.

در شکل‌های 6 و 7 به ترتیب کانتورهای خطوط جریان و خطوط همدمای در هندسه محفظه مربعی با دیواره گرم موج دار تحت شار ثابت مشاهده می‌شوند. این کانتورها برای دو عدد ریچاردسون 1 و 100 و عدد گراشهف  $10^4$  با کسر حجمی نانوذره مس 0% ترسیم شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها و همچنین با کمک گرفتن از معادله (9) مشخص می‌شود که با افزایش عدد ریچاردسون، میدان‌های سرعت و دما تحت تأثیر جابجایی طبیعی قرار می‌گیرند.

همچنین با توجه به شکل‌های 6 و 7 می‌توان فهمید که با افزایش عدد ریچاردسون و غالب شدن مکانیزم جابجایی طبیعی از میزان اغتشاشات میدان‌های سرعت و دما کاسته می‌شود. بنابراین همان گونه که در شکل‌های 6 و 7 (ب) مشاهده می‌شود، از تعداد گردابه‌ها کاسته شده و جریان بصورت تقریباً متقارن شروع به چرخش در جهت ساعتگرد می‌نماید و از طرف دیگر کانتور دما از سطح موجدار پیروی کرده و به فرم آن در می‌آید.

همانگونه که در شکل 7 مشهود است، با کاهش عدد ریچاردسون و توأم شدن تأثیر دو جابجایی اجباری و طبیعی، خطوط همدمای شروع به چرخش می‌نمایند. هر چه عدد ریچاردسون بیشتر کاهش می‌یابد، میدان‌های سرعت و دما بیشتر تحت تأثیر جابجایی اجباری قرار می‌گیرند. بنابراین ساختارهای چرخشی ایجاد می‌شوند که مرکز این ساختارها تمایل به حرکت به سمت گوشه بالا و سمت راست محفظه را دارند (یعنی در جهت نیروهای برشی).

در شکل 7 مشاهده می‌شود، کانتورهای همدمای در نزدیکی دیواره موجدار تحت شار حرارتی ثابت و همچنین گوشه بالا و سمت راست محفظه به یکدیگر نزدیکتر می‌باشند. به عبارت دیگر گرادیان‌های دما در این مناطق از محفظه دارای مقادیر بیشتری می‌باشد. در نتیجه با توجه به رابطه (20) تولید آنتروپی محلی بیشتری در این مناطق وجود دارد.

همانگونه که در شکل 8 مشهود می‌باشد، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ضخامت لایه مرزی گرمایی بر روی دیواره گرم افزایش می‌یابد. علت

حرارت بیشینه و تولید آنتروپی کمینه به عنوان هندسه بهینه انتخاب کرد. به عبارت بهتر همانگونه که در جدول 6 و شکل 4 (برای انتقال حرارت) مشهود است داریم:

- برای کسر حجمی نانوذرات به ترتیب سطوح 1، 2، 3 و 4 سطوح بهینه می‌باشند.
- برای عدد ریچاردسون به ترتیب سطوح 1، 2، 3 و 4 سطوح بهینه می‌باشند.
- برای طول موج سطح موجدار به ترتیب سطوح 1، 2، 3 و 4 سطوح بهینه می‌باشند.
- همچنین از جدول 7 و شکل 5 (برای تولید آنتروپی) داریم:
- برای کسر حجمی نانوذرات به ترتیب سطوح 1، 3، 4 و 2 سطوح بهینه می‌باشند.
- برای عدد ریچاردسون به ترتیب سطوح 1، 2، 3 و 4 سطوح بهینه می‌باشند.
- برای طول موج سطح موجدار به ترتیب سطوح 1، 2، 3 و 4 سطوح بهینه می‌باشند.

لذا با مقایسه بین این داده‌ها می‌توان به نتیجه گرفته شده در زمینه انتخاب هندسه بهینه برای انتقال حرارت بیشینه و تولید آنتروپی کمینه رسید ( $\lambda=0/25$ ,  $Ri=1$ ,  $\phi=0\%$ ).

### 6-1- تحلیل واریانس نتایج

نتایج بدست آمده توسط جدول آنووا تحلیل می‌گردند. هدف از این تحلیل یافتن نسبت واریانس هر پارامتر مد نظر نسبت به واریانس کل می‌باشد. در جدول 11 تحلیل آنووی نتایج مشاهده می‌شود.

از آنجا که برای تحلیل پارامترهای مؤثر چهار سطح در نظر گرفته شده است، لذا درجه آزادی آن‌ها برابر با سه می‌باشد. واریانس خطا از تقسیم مجموع مربعات خطا بر درجه آزادی محاسبه می‌گردد. در جدول 11 درصد تأثیر هر یک از پارامترها در انتقال حرارت مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همه عوامل کم و بیش دارای اهمیت بر پاسخ می‌باشند و پارامتر عدد ریچاردسون بیشترین تأثیر را بر انتقال حرارت دارد. بنابراین می‌توان گفت سرعت حرکت درپوش بیشترین تأثیر را در نرخ انتقال حرارت دارد.

جدول 10 نمونه طراحی شده جهت یافتن هندسه بهینه

شماره نمونه	فاکتورها	نتایج
	$\lambda$	$Ri$
1	0	0/1
2	2	0/1
3	5	0/1
4	10	0/1

جدول 11 تحلیل واریانس نتایج (آنووا) برای انتقال حرارت

پارامتر مؤثر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد تأثیر (%)
$\phi$	3	16/08	5/36	5/061
$Ri$	3	238/723	79/574	83/382
$\lambda$	3	35/076	11/692	11/557



می باشد.

در این مقاله و به کمک روش تاگوچی، از آنووا جهت تحلیل نتایج استفاده شده است. به عبارت دیگر در این روش از تحلیل واریانس به منظور بدست آوردن اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحلیل بصورت نمایش جداول ارائه شد. که این جداول شامل اطلاعات مفیدی از قبیل: درجه آزادی هر عامل، مجموع مربعات خطا، واریانس، درصد تاثیر عوامل در پاسخ می باشند.

در هندسه مد نظر دیواره های بالایی و پایینی عایق بوده و دیواره بالایی با سرعت ثابت در حرکت می باشد و دیواره سرد در دمای ثابت قرار دارد.

نتایج بدست آمده از کار عددی به طور خلاصه عبارتند از:

اگر هدف از بهینه سازی بیشینه کردن انتقال حرارت باشد:

- برای کسر حجمی نانوذرات به ترتیب سطوح 1، 2، 3 و 4 سطوح بهینه می باشند.

- برای عدد ریچاردسون به ترتیب سطوح 1، 2، 3 و 4 سطوح بهینه می باشند.

- برای طول موج سطح موجدار به ترتیب سطوح 1، 2، 3 و 4 سطوح بهینه می باشند.

- با تحلیل نتایج بدست آمده از روش تاگوچی سطح بهینه از دیدگاه انتقال حرارت باید دارای شرایط ( $\phi=0\%$ ،  $Ri=0/1$ ،  $\lambda=0$ ) باشد.

- اگر هدف کمینه کردن تولید آنتروپی باشد:

- برای کسر حجمی نانوذرات به ترتیب سطوح 1، 3، 4 و 2 سطوح بهینه می باشند.

- برای عدد ریچاردسون به ترتیب سطوح 1، 2، 4، 3 و 3 سطوح بهینه می باشند.

- برای طول موج سطح موجدار به ترتیب سطوح 1، 3، 2 و 4 سطوح بهینه می باشند.

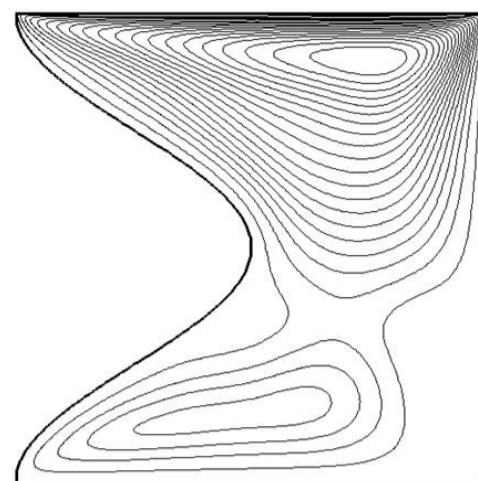
با تحلیل نتایج حاصل از روش تاگوچی به ترتیب طول موج و سپس عدد ریچاردسون و کسر حجمی نانوذرات بیشترین تاثیر را دارند. به عبارت دیگر سطح با مشخصات ( $\phi=5\%$ ،  $Ri=100$ ،  $\lambda=0/25$ ) به عنوان سطح بهینه انتخاب شد.

با توجه به مقادیر سیگنال به نویز برای هر سطح از پارامترهای مورد نظر و مقایسه بین مقادیر آنها، سطح با مشخصات  $\phi=0\%$ ،  $Ri=1$ ،  $\lambda=0/25$  برای دو پارامتر انتقال حرارت بیشینه و تولید آنتروپی کمینه به عنوان هندسه بهینه انتخاب شد.

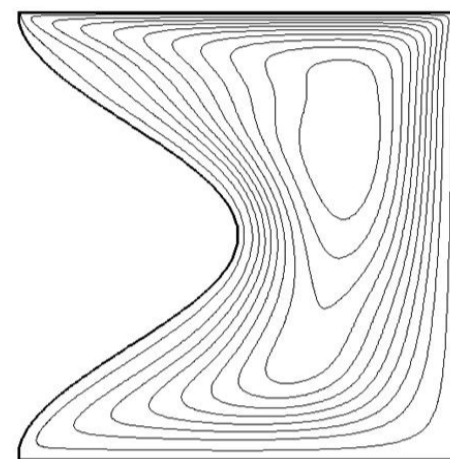
با افزایش سطح عدد ریچاردسون، طول موج سطح موجدار و کسر حجمی نانو ذرات مقدار نسبت سیگنال به نویز کاهش می یابد. این مفهوم بدان معناست که هر چه مقدار پارامترهای تأثیرگذار افزایش یابد مقدار انتقال حرارت کاهش می یابد.

با کاهش عدد ریچاردسون و توام شدن تأثیر دو جابجایی اجباری و طبیعی، خطوط همدمای شروع به چرخش می نمایند. هر چه عدد ریچاردسون بیشتر کاهش می یابد، میدان های سرعت و دما بیشتر تحت تأثیر جابجایی اجباری قرار می گیرند. بنابراین ساختارهای چرخشی ایجاد می شوند که مرکز این ساختارها تمایل به حرکت به سمت گوشه بالا و سمت راست محفظه را دارند (یعنی در جهت نیروهای برشی).

هر چه عدد ریچاردسون کوچکتر می شود، از آنجا که مکانیزم جابجایی اجباری غالب می شود، در نتیجه عدد ناسلت رو به افزایش می رود.

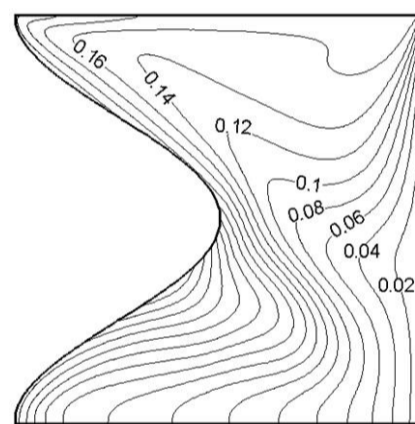


(الف)

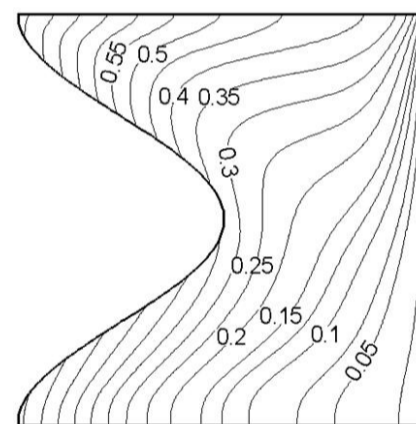


(ب)

شکل 6 کانتورهای خطوط جریان به ترتیب در اعداد ریچاردسون (الف)  $Ri=1$  و (ب)  $Ri=100$  (عدد گراشهف  $10^4$ ،  $\phi=0\%$  و  $\lambda=1$ )



(الف)



(ب)

شکل 7 کانتورهای خطوط همدمای به ترتیب در اعداد ریچاردسون (الف)  $Ri=1$  و (ب)  $Ri=100$  (عدد گراشهف  $10^4$ ،  $\phi=0\%$  و  $\lambda=1$ )

آن حساسیت ضخامت لایه مرزی گرمایی به کسر حجمی نانوذرات می باشد. به عبارت دیگر افزایش در مقدار کسر حجمی نانوذرات، سبب می شود تا سیال لزج تر شده و در نتیجه سبب کاهش در میدان سرعت می شود. از آن جا که میدان دما و سرعت به یکدیگر وابسته می باشند، لذا با کاهش در سرعت شاهد افزایش در دما خواهیم بود، در نتیجه عدد ناسلت کاهش می یابد. افزایش در مقدار ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی نانوذره در جدول شماره 12 قابل مشاهده می باشد.

## 8- نتیجه گیری

در این مطالعه، به بررسی عملکرد جابجایی ترکیبی نانوسیال آب - مس در یک محفظه مربعی با هندسه متغیر و شرط مرزی شار حرارتی ثابت پرداخته شده است.

هدف از این مطالعه که با روش تاگوچی و به کمک روش حجم کنترل انجام شده است، یافتن هندسه بهینه از نقطه نظر انتقال حرارت و تولید آنتروپی و ارائه و تحلیل نتایج به روش تحلیل نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ )

10- مراجع

[1] S. Ostrach, Natural convection in enclosures, *J. Heat Transfer - Trans. ASME* 110, pp. 1175-1190, 1988.

[2] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. FED- 231/MD-66, in: D.A. Siginer, H.P. Wang (Eds.), *Developments and Applications of Non-newtonian Flows*, ASME, pp. 99-105, 1995 .

[3] R.K. Tiwari, M.K. Das, Heat transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2002-2018, 2007.

[4] H. Nemati, M. Farhadi, K. Sedighi, E. Fattahi, A.A.R. Darzi, Lattice Boltzmann simulation of nanofluid in lid-driven cavity, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1528-1534, 2010.

[5] A. Arefmanesh, M. Mahmoodi, Effects of uncertainties of viscosity models for Al2O3-water nanofluid on mixed convection numerical simulations, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 1706-1719, 2011.

[6] M.A. Mansour, R.A. Mohamed, M.M. Abd-Elaziz, S.E. Ahmed, Numerical simulation of mixed convection flows in a square lid-driven cavity partially heated from below using nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1504-1512, 2010.

[7] E. Abu-Nada, A.J. Chamkha, Mixed convection flow in a lid-driven inclined square enclosure filled with a nanofluid, *European Journal of Mechanics, B/ Fluids* 29, pp. 472e482, 2010.

[8] S.M. Aminossadati, A. Kargar, B. Ghasemi, Adaptive network-based fuzzy influence system analysis of mixed convection in a two-side lid-driven cavity filled with a nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 52, pp. 102-111, 2012.

[9] A. Abbasian Arani, N. Hatami Nesari, M. Rezaee, Mixed convection in a trapezoidal enclosure filled with Cu-water nanofluid, *Modares Mechanical Engineering Journal*, 2014. (In Persian)

[10] M. Safaie, H.R. Goshaiishi, Numerical Modeling of Laminar and Turbulent mixed convection in rectangular cavity wuth top hop moving wall, *Majlesi Mechanical Engineering Journal*, 2010. (In Persian)

[11] A. Karimipour, H. Teimouri, M. Afrand, simulation of free and force mixed convection heat transfer in an inclined lid driven enclosure by lattice Boltzmann method, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 4, No. 2, pp. 167-182, 2014. (In Persian)

[12] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, Gh. A. Sheikhzadeh, Effects of magnetic field on mixed convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure, *Modares Mechanical Engineering Journal*, Vol. 14, No. 9, pp. 183-194, 2014. (In Persian)

[13] S. Mahmud, P.K. Das, N. Hyder, A.K.M.S. Islam, Free convection in an enclosure with vertical wavy walls, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 41, 440-446, 2002.

[14] S. Abdelkader, R. Mebrouk, B. Abdellah, B. Khadidja, Natural convection in a horizontal wavy enclosure, *J. Appl. Sci.*, Vol. 7, pp. 334-341, 2007.

[15] Y. Varol, H.F. Oztop, A comparative numerical study on natural convection in inclined wavy and flat-plate solar collectors, *Build. Environ.*, Vol. 43, pp. 1535-1544, 2008.

[16] J. Rostami, Unsteady natural convection in an enclosure with vertical wavy walls, *Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1079-1087, 2008.

[17] H.F. Oztop, E. Abu-Nada, Y. Varol, A. Chmkha, Natural convection in wavy enclosures with volumetric heat sources, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 50, pp. 502-514, 2011.

[18] C.C. Wang, C.K. Chen, Forced convection in a wavy-wall channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2587-2595, 2002.

[19] S. Mahmud, R.A. Fraser, Free convection and entropy generation inside a vertical inphase wavy cavity, *International Communications in Heat and Mass Transfer* Vol. 31, pp.455-466, 2004.

[20] A. Joodaki, A. Ashrafzadeh, A New Geometrical Modeling approach in the Analysis and Optimization of Convection Heat Transfer in Wavy Channels, *Modares Mechanical Engineering Journal*, 2012. (In Persian)

[21] A.K. da Silva, L. Gosselin, Optimal geometry of L and C-shaped channels for maximum heat transfer rate in natural convection., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 3, pp. 609-620, 2005.

[22] M. Aounallaha, M. Belkadia, L. Adjlouta, O. Imine, Numerical shape optimization of a confined cavity in natural convection regime, *Computers & Fluids*, Volume 75, pp. 11-21, 2013.

[23] L.C. Ngo, T. Bello-Ochende, J.P. Meyer, Numerical modelling and optimisation of natural convection heat loss suppression in a solar cavity receiver with plate fins, *Renewable Energy*, Vol. 74, pp. 95-105, 2015.

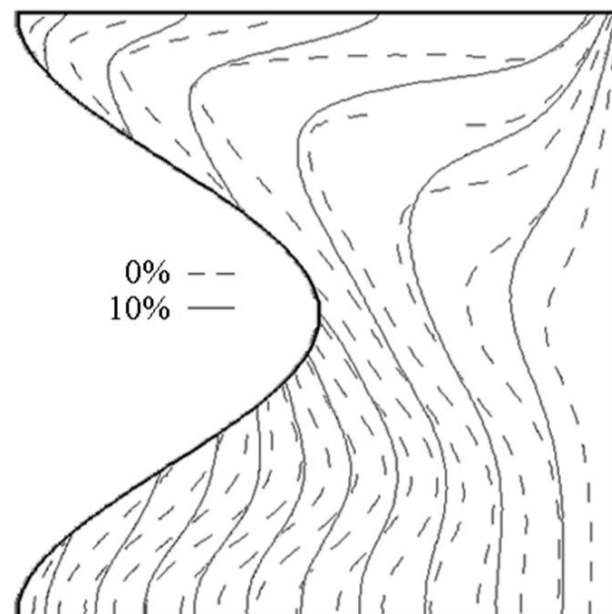
[24] J. Um, K. Kim, B. Yam, H. Hwang, Determination of an optimal configuration of operating policies for direct-input-output manufacturing systems using the Taguchi method. *Comput Ind Eng*, Vol. 3, pp. 555-560, 1996.

[25] Roy, R.K., A Primer on the Taguchi Method, *VNR*, New York, 1990

[26] N.C. Fei, N.M. Mehat, S. Kamaruddin, Practical Applications of taguchi Method for otimization of processing parameters for plastic injection moulding: A retrospective review, *ISRN Industrial engineering*, Vol.2013,

جدول 12 تغییرات ویسکوزیته بر حسب کسر حجمی نانوذرات مس

کسر حجمی نانوذرات (%)	ویسکوزیته (kg/m-s)
0	0/000893
10	0/0013



شکل 8 کانتورهای خطوط همدم در دو کسر حجمی مختلف 0% و 10%  $\phi$  ( عدد ریچاردسون 0/1، عدد گراشهف  $10^4$  و  $\lambda=1$ )

9- فهرست علائم

$c_p$	ظرفیت حرارتی ویژه ( $J/kg \cdot K^{-1}$ )
$Gr$	عدد گراشهف
$H$	ارتفاع حفره (m)
$k$	ضریب انتقال حرارت هدایت ( $W/m \cdot K^{-1}$ )
$Nu_m$	عدد ناسلت
$P$	فشار (Pa)
$Pr$	عدد پرانتل
$Ra$	عدد رایلی
$Re$	عدد رینولدز
$Ri$	عدد ریچاردسون
$T$	دما (K)
$u, v$	مولفه های سرعت در جهت X و y ( $ms^{-1}$ )
$u^*, v^*$	مولفه های سرعت بدون بعد
$x, y$	مختصات دکارتی (m)
$x^*, y^*$	مختصات بدون بعد

علائم یونانی

$\beta$	ضریب انبساط حرارتی ( $K^{-1}$ )
$\Phi$	کسر حجمی نانوذرات
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\nu$	لزجت سینماتیکی ( $m^2s^{-1}$ )
$\theta$	دمای بدون بعد

زیرنویس ها

Bf	سیال پایه
Nf	نانو سیال
S	سطح

- fluid flow in rough microchannel with complex-wavy surface, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 13, pp. 173-174, 2012.
- [33] C.C. Cho, C.L. Chen, C.K. Chen, Characteristics of combined electroosmotic flow and pressure-driven flow in microchannels with complex-wavy surfaces, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 61, pp. 94-105, 2012.
- [34] H.F. Oztop, I. Dagtekin, Mixed convection in two sided lid-driven differentially heated square cavity, *International Journal of Heat and mass transfer*, Vol. 47, pp. 1761-1769, 2004.
- [35] N. Daneshvar, A.R. Khataee, M. Rasoulifard, M. Pourhassan, Biodegradation of dye solution containing Malachite Green: Optimization of effective parameters using Taguchi method, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 143, pp. 214-219, 2007.
- [36] *The-signal to noise ratio*, Accessed 02 May 2015; <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/taguchi-designs>.
- pp.11, 2013.
- [28] Li.K. Saha, M. Ch. Somadder, K. M. Salah Uddin, Mixed convection heat transfer in a lid driven cavity with wavy bottom surface, *American Journal of Applied Mathematics*, Vol. 1, No. 5, pp. 92-101, 2013.
- [29] C.C. Cho, Heat transfer and entropy generation of natural convection in nanofluid-filled square cavity with partially-heated wavy surface, *International Journal of Heat and mass transfer*, Vol. 77, pp. 818-827, 2014.
- [30] C.C. Cho, C.L. Chen, C.K. Chen, Natural convection heat transfer performance in complex-wavy wall enclosed cavity filled with nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 60, pp. 255-263, 2012.
- [31] H.F. Oztop, E. Abu-Nada, Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 1326-1336, 2008.
- [32] C.C. Cho, C.L. Chen, C.K. Chen, Electrokinetically-driven non-Newtonian