



بررسی میدان جریان نانوسیال و انتقال حرارت توأمان در چاه گرمایی میکروکانالی با میکروکانال‌های مثلثی و چهارآرایش مختلف

حسین خراسانی‌زاده، مجتبی سپهرنیا*، رضا صادقی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ بهمن ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۹ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

چاه گرمایی
میکروکانال مثلثی
آرایش ورودی و خروجی
حرکت براونی
خواص وابسته به دما

چکیده: در این مقاله میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک چاه گرمایی میکروکانالی مستطیلی، شامل هفت میکروکانال با مقطع مثلثی متساوی‌الساقین، به صورت عددی و سه بعدی با لحاظ نمودن هدایت در قسمت‌های جامد بررسی شده‌است. معادلات حاکم با روش حجم محدود بر مبنای اجزا محدود و با استفاده از الگوریتم کاپلد حل شده‌اند. هدف اصلی بررسی اثر چهار آرایش مختلف بر روی میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بوده است. استفاده از نانوسیال و افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴ درصد موجب افزایش عدد ناسلت متوسط بین $0.4/0.72$ تا $0.5/0.47$ ، کاهش مقاومت حرارتی بین $0.1/0.81$ تا $0.2/0.34$ و کاهش نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی بین $0.1/0.28$ تا $0.1/0.56$ می‌شود. آرایش I نسبت به سه آرایش دیگر بین $0.1/0.69$ تا $0.18/0.33$ عدد ناسلت متوسط بیشتر، بین $0.3/0.55$ تا $0.29/0.29$ مقاومت حرارتی کمتر و بین $0.5/0.23$ تا $0.36/0.25$ نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کمتر دارد. همچنین شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی با در نظر گرفتن اثر حرکت براونی بین $0.1/0.075$ و با در نظر گرفتن خواص متغیر با دما بین $0.1/0.9$ تا $0.3/0.9$ بهبود پیدا می‌نمایند.

۱- مقدمه

کاربرد سامانه‌های میکروالکترومکانیکی در صنایع هوافضا، ساخت خودرو، بیوشیمی، غذایی و کشاورزی در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته‌است. از جمله سامانه‌های جدید در ابعاد میکرو می‌توان به شتاب‌سنج‌ها، حسگرهای فشار، سامانه‌های سنسجش بیولوژیکی، سامانه‌های سوخت‌رسانی و تجهیزات خنک‌کاری اشاره کرد. مجراهایی در مقیاس میکرو یک بخش مهم از این سامانه‌ها است که به منظور انتقال سیال با اهداف مختلفی مانند انتقال حرارت، جابه‌جایی مواد و سوخت‌رسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تاکنون و سپس [۱] برای اولین بار جریان سیال و انتقال حرارت را در مقیاس میکرو مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های تجربی بر روی میکروکانال نشان دادند که میکروکانال‌های مستطیلی قادرند حرارت بسیار زیادی را از قطعات دفع نمایند، به طوری که دمای قطعه اختلاف بسیار کمی با دمای محیط داشته باشد.

هتسرونی و همکاران [۲] توزیع غیر یکنواخت دما را در دستگاه‌های الکترونیکی که به وسیله جریان در میکروکانال‌های مثلثی خنک می‌شوند به صورت تجربی بررسی نمودند. به همین منظور آن‌ها یک میکروسامانه

حرارتی شامل گرم‌کن، میکروکانال، ناحیه جمع‌کننده و پخش‌کننده جریان طراحی نمودند و اثر ساختار هندسی را بر روی جریان و انتقال حرارت مطالعه نمودند. آن‌ها نشان دادند که اندازه میکروکانال‌ها، ضخامت بستر و جنس چاه گرمایی روی انتقال حرارت و مقاومت حرارتی تأثیرگذار است. تیسلیج و همکاران [۳] جریان سیال و انتقال حرارت چاه گرمایی میکروکانالی مثلثی را با در نظر گرفتن یک کانال و شرط تقارن و همچنین تمام کانال‌ها به صورت سه بعدی و عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که دمای سیال و دیوار گرم شده به صورت خطی در طول کانال تغییر نمی‌کند.

چین و چن [۴] اثر نحوه قرار گرفتن ورود و خروج جریان را در یک چاه گرمایی میکروکانالی با میکروکانال‌های مستطیلی در حالت سه‌بعدی به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها ابتدا یک آرایش مرسوم را با ورودی و خروجی مستقیم بررسی نمودند. سپس پنج نوع آرایش دیگر را انتخاب نمودند. ابعاد هندسه برای هر شش آرایش یکسان ولی محل ورود و خروج جریان در آن‌ها متفاوت بود. آن‌ها نشان دادند که نابرابری توزیع سرعت در میکروکانال‌ها برای آرایش‌های I و N و D و S که در آن‌ها سیال به صورت افقی وارد چاه گرمایی می‌شود بیشتر از آرایش‌های V و U که سیال به صورت عمودی وارد چاه گرمایی می‌شود، می‌باشد. همچنین نشان دادند که

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: msepehr_91@yahoo.com

با توجه به در نظر گرفتن مقاومت حرارتی، آرایش V بهترین عملکرد را دارد. هونگ و یان [۵] یک کانال با ارتفاع و پهنای باریک شونده متغیر را برای بهبود عملکرد حرارتی چاه‌گرمایی میکروکانالی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد کانال با پهنای باریک شونده دارای توزیع دمایی پایین‌تر و یکنواخت‌تر در مقایسه با کانال‌های موازی و با ارتفاع باریک شونده بود. استفاده از خواص ثابت و عدم مقایسه با نانوسیال‌ها از جمله کاستی‌های این تحقیق می‌باشد.

وینودهان و راجان [۶] عملکرد یک چاه‌گرمایی میکروکانالی با میکروکانال‌های مستطیلی را با در نظر گرفتن آب به عنوان سیال خنک‌کننده با خواص ثابت به صورت عددی و سه‌بعدی بررسی نمودند. آن‌ها چهار آرایش A و B و C و D را شبیه‌سازی کرده و نتایج به‌دست آمده برای چهار نوع آرایش مذکور را با چاه‌گرمایی آرایش نوع I در [۴] مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که در یک شار حرارتی ثابت، این چهار آرایش از نظر نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت و همچنین مقاومت حرارتی نسبت به آرایش نوع I در [۴] دارای برتری است.

دوریودهان و همکاران [۷] جریان مایع تک فاز در میکروکانال‌های دوزنقه‌ای همگرا و واگرا را به صورت عددی و تجربی بررسی نمودند. در تحقیق آن‌ها همگرایی و واگرایی در جهت جریان سیال و به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. نتایج آن‌ها نشان داد میکروکانال‌های همگرا-واگرا عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری نسبت به میکروکانال‌های با سطح مقطع ثابت دارند. عدم استفاده از نانوسیال‌ها برای مقایسه عملکرد کاستی تحقیق دوریودهان و همکاران [۷] است که می‌تواند به عنوان موضوع جدیدی مورد نظر محققان قرار گیرد.

خراسانی‌زاده و سپهرنیا [۸] به بررسی اثر چهار آرایش مختلف ورود و خروج جریان آب بر عملکرد چاه‌گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای متخلخل پرداختند و نشان دادند آرایش D چاه‌گرمایی متخلخل بهترین عملکرد را داشته و بین ۱۵/۸ تا ۲۴/۵ درصد در بهبود خنک‌کاری موثر واقع شده است. فناوری نانو یکی از مدرن‌ترین فناوری‌های روز دنیاست که دارای خصوصیاتی منحصر به فرد با کاربردهایی در تمام زمینه‌های علم و فناوری است. یکی از کاربردهای نانوتکنولوژی افزایش انتقال حرارت در اثر افزودن نانوذرات به سیال پایه است. بهره‌مندی از نانوسیالات در میکروکانال‌ها موجب بهبود قابل توجهی در خنک‌کاری می‌شود که در دو دهه اخیر به شدت مورد توجه محققان قرار گرفته است. به بررسی برخی از مهم‌ترین تحقیقات اخیر در این زمینه به ترتیب سال انجام آن‌ها در ذیل پرداخته می‌شود.

چین و هاوونگ [۹] عملکرد چاه‌گرمایی میکروکانالی مستطیلی را با استفاده از نانوسیال آب-مس با کسرهای حجمی مختلف به روش عددی مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که نانوسیالات می‌توانند عملکرد چاه‌گرمایی میکروکانالی را در مقایسه با به کار بردن آب خالص به عنوان خنک‌کننده افزایش دهند. همچنین نشان دادند که یکی از مزایای دیگر در استفاده از نانوسیال به عنوان خنک‌کننده در چاه‌گرمایی میکروکانالی این

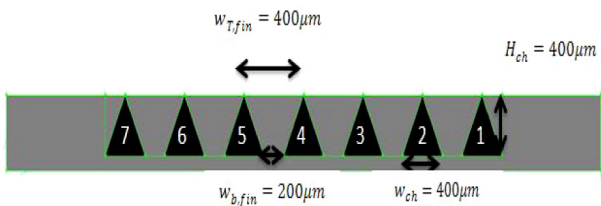
است که افزایش افت فشار اندک و غیر قابل ملاحظه است. سیف و نیک‌آیین [۱۰] اثرات اندازه ذرات و حرکت براونی روی عملکرد حرارتی یک چاه‌گرمایی میکروکانالی مستطیلی شکل را با استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید زینک و اکسیدمس پراکنده شده در سیال پایه اتیلن‌گلیکول-آب به صورت عددی بررسی نمودند. به همین منظور آن‌ها میزان تأثیر حرکت براونی را روی مقاومت حرارتی چاه‌گرمایی و رسانایی نانوسیال بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که برای کسر حجمی ۶ درصد و قطر ۲۹ نانومتر برای ذرات اکسید آلومینیوم، مقاومت حرارتی چاه‌گرمایی با در نظر گرفتن حرکت براونی حدود ۱/۹۳ درصد نسبت به در نظر نگرفتن آن کم‌تر است. همچنین رسانایی نانوسیال بدون در نظر گرفتن حرکت براونی حدود ۶/۵ درصد کاهش پیدا می‌کند.

فانی و همکاران [۱۱] جابه‌جایی اجباری آرام نانوسیال آب-اکسید مس را در یک چاه‌گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای با در نظر گرفتن حرکت براونی با استفاده از روش دو فاز بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که پخش براونی با افزایش دما و کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش قطر نانوذرات کاهش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن اتلاف لزج، قدرت ورودی و همچنین افت فشار خیلی آهسته افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی انجام شده به صورت دوبعدی از جمله ایرادهای این تحقیق است.

خراسانی‌زاده و همکاران [۱۲] عملکرد یک چاه‌گرمایی میکروکانالی شامل میکروکانال‌های مثلثی با دو آرایش افقی و عمودی ورود/خروج جریان را با استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس بررسی نموده و نشان دادند آرایش ورود/خروج افقی بهتر از آرایش عمودی است. با توجه با نتایج مطالعه چین و چن [۴] که در آن آرایش ورود/خروج عمودی عملکرد بهتری نسبت به آرایش افقی داشت، خراسانی‌زاده و همکاران [۱۲] به این نتیجه رسیدند که عملکرد چاه‌گرمایی علاوه بر آرایش ورود و خروج به هندسه میکروکانال‌ها و نسبت بخش جامد به بخش سیال چاه‌گرمایی نیز وابسته است. همچنین آن‌ها نشان دادند استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس نسبت به سیال پایه (آب) منجر به بهبود عملکرد چاه‌گرمایی تا ۴/۶۲٪ می‌شود.

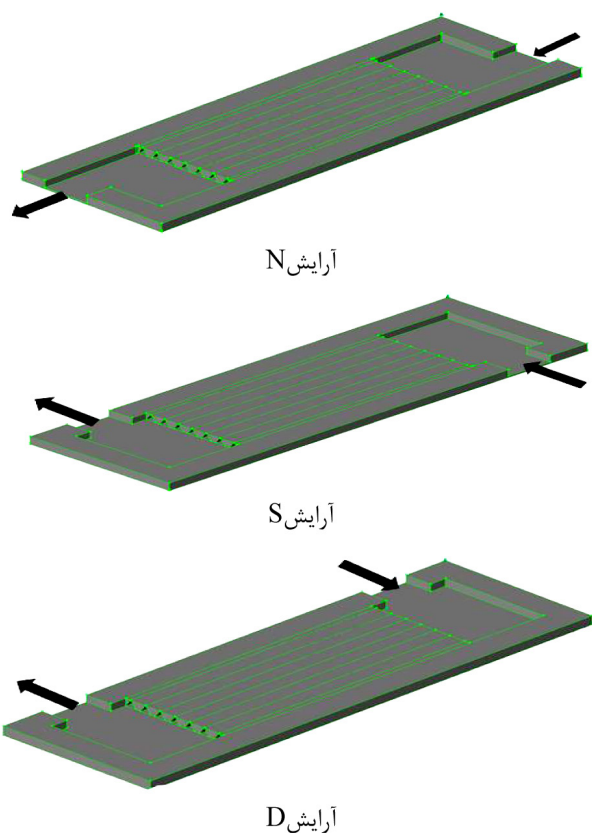
قاسمی و همکاران [۱۳] اثر استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بر انتقال حرارت و جریان سیال در چاه‌گرمایی مینی‌کانالی مثلثی را به صورت عددی و سه‌بعدی بررسی نمودند و نشان دادند با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک افزایش و مقاومت حرارتی چاه‌گرمایی کاهش می‌یابد.

در این مقاله عملکرد خنک‌کاری چاه‌گرمایی مستطیلی با میکروکانال‌های مثلثی برای چهار آرایش مختلف ورود و خروج افقی جریان، که پیش از این مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، بررسی می‌شود. بدین منظور از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود. زمانی که در میدان حل بیش از یک میکروکانال وجود داشته باشد، به منظور دستیابی به نتایج قابل اتکا شبیه‌سازی کل میکروکانال‌ها و بخش جامد چاه‌گرمایی لازم است. این موضوع قبلاً توسط تسلیج و همکاران [۳] و هتسرونی و همکاران

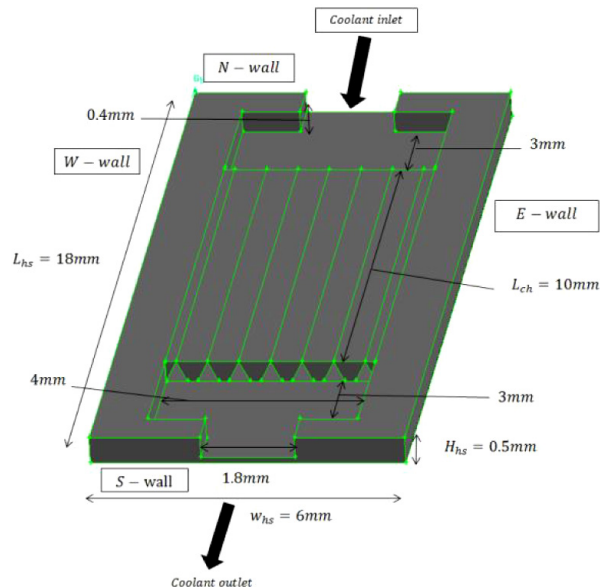


شکل ۲: ابعاد میکروکانال‌ها و فین‌ها
Fig. 2. Fin and microchannel dimensions

که تولید کننده حرارت است در تماس مستقیم با کف چاه گرمایی است. ابعاد میکروکانال‌های مثلثی و فین‌های دوزنقه‌ای که آن‌ها را از یکدیگر جدا نموده‌اند در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، میکروکانال‌ها دارای سطح مقطع مثلثی متساوی‌الساقین به ابعاد $W_{ch} = 400 \mu m$ و طول $L_{ch} = 10 mm$ هستند. جنس فین‌ها و قسمت جامد چاه گرمایی، سیلیکون و سیال خنک‌کننده نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم است. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود برای سهولت انجام بحث میکروکانال‌ها از راست به چپ شماره‌گذاری شده‌اند.



شکل ۳: نحوه ورود و خروج جریان در آرایش‌های نوع N و S و D
Fig. 3. The geometry showing the N, S and D-type inlet and outlet arrangements



شکل ۱: ساختار هندسی چاه گرمایی با ورودی و خروجی مستقیم (آرایش I)

Fig. 1. Geometry of microchannel heat sink with direct inlet and outlet (I-type)

[۱۴] بررسی و بر آن تاکید شده است. برخلاف برخی کاستی‌های تحقیقات قبلی از نظر انتخاب میدان حل، در این مطالعه شبیه‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی برای کل چاه گرمایی شامل تمام میکروکانال‌ها و بخش جامد چاه انجام شده‌اند. در بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه میکروکانال‌ها وابستگی خواص بخش جامد و سیال به دما و همچنین اثر حرکت براونی نانوذرات لحاظ نشده‌اند. در این مطالعه رسانایی بخش جامد چاه گرمایی وابسته به دما در نظر گرفته شده است و همچنین از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص وابسته به دما و با در نظر گرفتن اثر حرکت براونی نانوذرات استفاده شده است.

۲- هندسه مسأله

ساختار هندسی چاه گرمایی میکروکانالی با ورودی و خروجی افقی، معروف به آرایش I که بسیار متداول است، در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد کلی مربوط به هندسه چاه مستطیلی مورد نظر در این مقاله برگرفته از طرح کلی هندسه چین و چن [۴] است، که در یک سطح به ابعاد ۱۸ در ۶/۲ میلی‌متر تعداد ۱۱ میکروکانال مستطیلی وجود داشت. در کار حاضر برای سطحی به ابعاد ۱۸ در ۶ میلی‌متر تعداد ۷ میکروکانال مثلثی در نظر گرفته شده‌است. در ابتدا و انتهای چاه گرمایی، دریچه‌های مستطیلی شکل به طول ۱ میلی‌متر برای ورود و خروج جریان تعبیه شده‌اند. همچنین دو ناحیه به طول ۳ میلی‌متر برای توزیع جریان سیال به داخل میکروکانال‌ها و جمع‌آوری جریان از میکروکانال‌ها، به ترتیب بعد از دهانه ورودی و قبل از دهانه خروجی، در نظر گرفته شده‌اند. عمق این نواحی و دریچه‌های ورود و خروج مثل عمق میکروکانال‌ها است. تراشه الکترونیکی

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (۶)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال شامل چگالی و گرمای ویژه از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۵ و ۱۶]:

$$\rho_{\text{eff}} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (۷)$$

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_p \quad (۸)$$

رسانایی مؤثر نانوسیال که برای دمای در محدوده بین ۳۰۰ تا ۳۲۵ کلوین و کسر حجمی بین صفر تا ۴ درصد معتبر است، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{static}} + k_{\text{Brownian}} \quad (۹)$$

$$k_{\text{static}} = k_f \left[\frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (۱۰)$$

$$k_{\text{brownian}} = 5 \times 10^4 \phi \rho_f c_{p,f} \sqrt{\frac{k_B T}{d_p \rho_p}} g(T, \phi) \quad (۱۱)$$

ρ_p و $c_{p,f}$ به ترتیب چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه و ϕ به ترتیب چگالی ذرات و کسر حجمی نانوسیال هستند. K_B ثابت بولتزمن است که برابر 1.38×10^{-23} J/K است. تابع g برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم به صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

جدول ۱: مقادیر ضرایب در تابع g برای نانوسیالات آب-اکسید آلومینیوم [۱۷]

Table 1. The magnitude of coefficients in function of g for Al_2O_3 -water [17]

ضرایب	مقادیر	ضرایب	مقادیر
a	۵۲/۸۱۳۴۸۸۷۵۹	m	-۲۹۸/۱۹۸۱۹۰۸۴
b	۶/۱۱۵۶۳۷۲۹۵	h	-۳۴/۵۳۲۷۱۶۹۰۶
c	۰/۶۹۵۵۷۴۵۰۸۴	i	-۳/۹۲۲۵۲۸۹۲۸۳
d	۴/۱۷۴۵۵۵۵۲۷۸۷۶-۲	j	-۰/۲۳۵۴۳۲۹۶۲۶
e	۰/۱۷۶۹۱۹۳۰۰۲۴۱	k	-۰/۹۹۹۰۶۳۴۸۱

نحوه ورود و خروج جریان در سه نوع چاه گرمایی میکروکانالی دیگر (N و S و D) در شکل ۳ نشان داده شده است. در چاه گرمایی نوع N هندسه کلی ورودی و خروجی مثل حالت I است ولی مکان آن‌ها از مرکز دیوارهای شمالی^۱ و جنوبی^۲ به صورت نامتقارن به سمت گوشه‌ها منتقل شده‌اند. در چاه گرمایی نوع D ورودی و خروجی به ترتیب در بالا و پایین دیوار غربی^۳ و در ناحیه توزیع کننده و جمع کننده جریان واقع شده‌اند. در چاه گرمایی نوع S در مقایسه با نوع D فقط ورودی به دیوار شرقی^۴ منتقل شده است.

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای حل معادلات حاکم بر مسأله، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- جریان سیال آرام، تک‌فاز، پایا و سه‌بعدی است.
- خواص ترموفیزیکی سیال و بخش جامد چاه گرمایی وابسته به دما هستند.

۳. دیواره‌های جانبی و دیواره بالایی چاه گرمایی عایق هستند.

با توجه به فرضیات ذکر شده معادله پیوستگی، معادلات مومنتوم در سه راستای x و y و z همچنین معادلات انرژی در بخش سیالی و در قسمت جامد چاه گرمایی به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{eff}} uu) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_{\text{eff}} vu) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{\text{eff}} wu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \quad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{eff}} uv) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_{\text{eff}} vv) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{\text{eff}} wv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{eff}} uw) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_{\text{eff}} vw) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{\text{eff}} ww) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{eff}} uT) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_{\text{eff}} vT) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{\text{eff}} wT) = \quad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{\text{eff}}}{c_{p, \text{eff}}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_{\text{eff}}}{c_{p, \text{eff}}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_{\text{eff}}}{c_{p, \text{eff}}} \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

¹N-wall

²S-wall

³W-wall

⁴E-wall

شرایط مرزی برای معادلات حاکم، وابسته به شرایط کاری چاه‌گرمایی هستند. در کاربردهای عملی چاه‌گرمایی به یک منبع تولید حرارت مانند تراشه الکترونیکی متصل می‌شود. سیال با یک دمای مشخص اولیه و با یک دبی جرمی ثابت به وسیله یک پمپ خارجی به ورودی چاه‌گرمایی میکروکانالی ارسال می‌شود. شرایط مرزی در ورودی، خروجی، سطوح مشترک جامد-سیال خنک‌کننده و کف چاه‌گرمایی به ترتیب عبارتند از:

$$\begin{aligned} P &= P_{in} \\ T &= T_{in} = 300 \text{ K} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} P &= P_{out} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \vec{V} &= 0 \\ T &= T_s \end{aligned} \quad (24)$$

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = -k \frac{\partial T}{\partial n}$$

$$q_w = -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \quad (25)$$

T_{in} و P_{in} به ترتیب فشار و دمای ورودی سیال، P_{out} و n به ترتیب فشار خروجی سیال و جهت نرمال دیوار یا سطح خروجی هستند و مقدار شار حرارتی اعمال شده به کف چاه‌گرمایی ۱۵۰ کیلو وات بر متر مربع است.

۴- شاخص‌های عملکرد

برای بررسی عملکرد چاه‌گرمایی میکروکانالی از سه شاخص عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه‌گرمایی به شارحرارتی استفاده می‌شود [۶]. در این بخش این شاخص‌ها توضیح داده می‌شوند.

عدد ناسلت متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f} \quad (26)$$

h ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط است و با استفاده از قانون سرمایه‌ش نیوتن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q_w = h(T_{hs,avg} - T_{f,avg}) \quad (27)$$

$T_{f,avg}$ و $T_{hs,avg}$ به ترتیب دمای متوسط چاه‌گرمایی و دمای متوسط سیال هستند. لذا عدد ناسلت متوسط از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Nu = \frac{q_w D_h}{k_f (T_{hs,avg} - T_{f,avg})} \quad (28)$$

D_h قطر هیدرولیکی میکروکانال است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$g = \left(a + b \ln(d_p) + c \ln(\varphi) + d \ln(\varphi) \ln(d_p) + e \ln(d_p)^2 \right) \ln(T) + \left(m + h \ln(d_p) + i \ln(\varphi) + j \ln(\varphi) \ln(d_p) + k \ln(d_p)^2 \right) \quad (12)$$

مقادیر ضرایب در رابطه (۱۲) در جدول ۱ ارائه شده‌است. k_p و k_f به ترتیب رسانایی سیال پایه و نانوذرات هستند. d_p قطر نانوذرات و R_b مقاومت کاپیتزا است، که از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۸]:

$$R_b + \frac{d_p}{k_p} = \frac{d_p}{k_{p,eff}} \quad (13)$$

لزجت مؤثر نانوسیال دارای فرمتی مشابه با رسانایی مؤثر نانوسیال است که به صورت زیر بیان می‌شود [۱۹]:

$$\mu_{eff} = \mu_{static} + \mu_{Brownian} \quad (14)$$

$$\mu_{static} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (15)$$

$$\mu_{Brownian} = 5 \times 10^4 \varphi \rho_f \sqrt{\frac{k_b T}{d_p \rho_p}} g(T, \varphi) \quad (16)$$

برای خواص ترموفیزیکی آب با استفاده از اطلاعات جداول ترمودینامیکی، در محدوده بین ۳۰۰ تا ۳۲۵ کلون، روابط زیر به صورت تابعی از دما توسعه داده شده‌اند:

$$k_f = 0.3424 \exp(0.00195T) - 0.00163 \quad (17)$$

$$\mu_f = 57.83 \exp(-0.04053T) + 0.01473 \exp(-0.01095T) \quad (18)$$

$$\rho_f = 1130 \exp(-0.0004173T) \quad (19)$$

$$c_{p,f} = 6.747 \times 10^8 \exp(-0.05862T) + 3989 \exp(0.0001428T) \quad (20)$$

همچنین رسانایی سیلیکون به صورت تابعی از دما عبارت است از [۲۰]:

$$k_{silicon} = 290 - 0.4T \quad (21)$$

خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم در دمای ۳۰۰ کلون در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲: خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آلومینیوم در دمای ۳۰۰ کلون [۲۱]

Table 2. Thermo-physical properties of water and Al₂O₃ at 300 K [21]

ماده	ρ (kgm ⁻³)	c_p (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	k_f (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
آب	۹۹۷	۴۱۷۹	۰/۶۱۳
اکسید آلومینیوم	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰

جدول ۳: عدد ناسلت متوسط برای سیال آب در آرایش I در افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و شار حرارتی ۱۵۰ کیلو وات بر متر مربع

Table 3. The average Nusselt number for Water and I-type heat sink utilizing different numbers of elements; $\Delta P=15kPa$ and $q_w=150 kWm^{-2}$

درصد اختلاف	عدد ناسلت متوسط	تعداد جزءها
-	۶/۷۹۵	۳۹۲۴۲۶
۱۰/۴۹	۷/۵۰۸	۶۳۸۵۰۶
۱/۹۷	۷/۶۵۶	۷۶۱۹۰۶
۱/۳۷	۷/۷۶۱	۸۷۱۳۴۶
۰/۴۳	۷/۷۹۴	۹۹۱۳۴۶

$$D_h = \frac{4A}{p} \quad (29)$$

A مساحت مقطع میکروکانال و p محیط خیس است. مقاومت حرارتی به عنوان دیگر شاخص عملکرد حرارتی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_{th} = \frac{T_{w,max} - T_{in}}{q_w W_{hs} L_{hs}} \quad (30)$$

$T_{w,max}$ در رابطه (۳۰) بیشترین دمای کف چاه گرمایی است. نسبت اختلاف حداکثر و حداقل دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی θ نامیده می‌شود و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\theta = \frac{T_{b,max} - T_{b,min}}{q_w} \quad (31)$$

از θ به عنوان معیاری برای سنجش غیریکنواختی دمای کف چاه گرمایی استفاده می‌شود و هرچه بزرگ‌تر باشد، عدم یکنواختی دما بیشتر است.

۵- روش حل، استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی

به منظور حل معادلات حاکم از روش حجم محدود و برای گسسته‌سازی آن‌ها از روش بالادست مرتبه دوم استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار انسیس-سی اف اکس انجام شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده است. به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، عدد ناسلت متوسط برای سیال آب در آرایش I در اختلاف فشار ۱۵ کیلوپاسکال و شار حرارتی ۱۵۰ کیلو وات بر متر مربع برای پنج شبکه‌بندی با تعداد شبکه‌های مختلف به دست آمده و در جدول ۳ مقایسه شده‌اند. با توجه به مقادیر ناسلت متوسط مشاهده می‌شود که شبکه با تعداد اجزای ۸۷۱۳۴۶ برای آرایش I

مناسب است. لازم به ذکر است که از مجموع ۸۷۱۳۴۶ جزء تعداد ۶۳۱۱۲۰ جزء مربوط به قسمت جامد و ۲۵۰۲۲۶ جزء مربوط به قسمت سیال است. از آنجایی که شبکه‌بندی باید برای ۴ آرایش مختلف انجام شود نیاز است تا بحرانی‌ترین آرایش شناسایی شود تا از مستقل بودن نتایج از نوع شبکه‌بندی برای همه آرایش‌ها اطمینان حاصل شود. بدین منظور در جدول ۴ درصد اختلاف نسبی بین حرارت اعمال شده به چاه گرمایی و حرارت جذب شده توسط آب برای چهار نوع چاه گرمایی تحت افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال با تعداد اجزای تقریباً مساوی مورد بررسی قرار گرفته است تا بحرانی‌ترین آرایش از لحاظ دفع گرما شناسایی شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر اختلاف نسبی حدود ۰.۲٪ است و نشان می‌دهد که اولاً شبکه‌های محاسباتی انتخاب شده نتایج قابل قبولی تولید می‌کنند. ثانیاً با توجه به نتایج بدست آمده آرایش I بحرانی‌ترین آرایش است؛ زیرا در بین چهار آرایش بیشترین اختلاف را دارد. از آنجایی که در حالت پایدار مقدار حرارت جذب شده باید با حرارت اعمال شده یکسان باشد و اختلاف حرارت اعمال شده به چاه گرمایی و حرارت جذب شده باید صفر باشد، خطای ایجاد شده ناشی از شبکه مورد استفاده است. در روش‌های عددی، معادلات گسسته‌سازی شده روی هر جزء شبکه اعمال شده و سپس میانگین گرفته می‌شود. بنابراین برای شبکه‌هایی که تعداد اجزای آن‌ها متفاوت است جوابی که بدست می‌آید اندکی تفاوت خواهد داشت. به دلیل اینکه مقدار خطا برای همه آرایش‌ها ناچیز است می‌توان از شبکه مشابه آرایش I برای همه آرایش‌ها استفاده نمود.

به منظور اطمینان از اعتبار روش عددی به کار گرفته شده و درستی نتایج تحقیق حاضر، شبیه‌سازی کار تجربی فیلیپس [۲۲] انجام شد. همچنین برای اطمینان از امکان بازتولید نتایج عددی چین و چن [۴]، شبیه‌سازی چاه گرمایی ایشان نیز انجام شد. در این دو تحقیق چاه گرمایی به کار گرفته شده شامل ۱۱ میکروکانال مستطیلی بوده و شار حرارتی ثابت ۱۰۰۰ کیلووات بر مترمربع به کف چاه گرمایی اعمال و از آب به‌عنوان سیال کاری استفاده شده است. در شکل ۴ و برای چند افت فشار مقادیر ناسلت متوسط در همه

جدول ۴: مقایسه حرارت جذب شده توسط سیال و حرارت اعمال شده به چاه گرمایی

Table 4. Heat absorbed by fluid and the relative difference between the absorbed and applied heats for different heat sink types

D	S	N	I	
۸۹۶۳۷۲	۹۲۷۹۶۳	۸۷۱۱۷۴	۸۷۱۳۴۶	تعداد جزءها
۱۶/۰۴۲	۱۶/۰۴۸	۱۵/۸۹۴	۱۵/۸۸۶	Q_{flow}
۰/۹۸	۰/۹۴	۱/۸۹	۱/۹۴	$\left \frac{Q_{flow} - q_w W_{hs} L_{hs}}{q_w W_{hs} L_{hs}} \right \times 100$

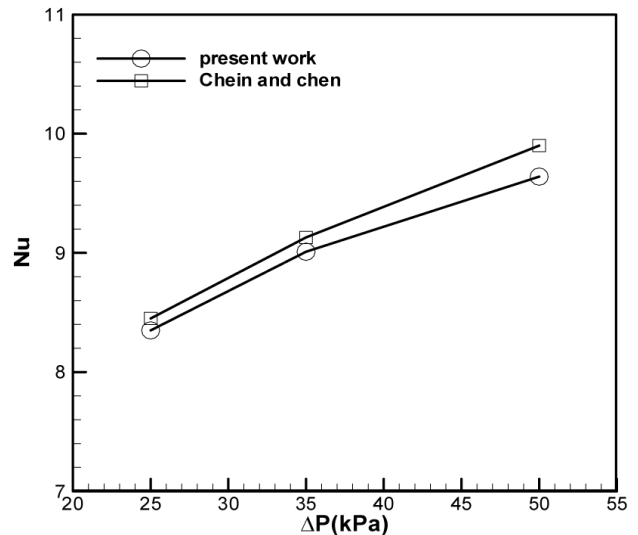
حداکثر اختلاف نسبی در شکل ۴ حدود ۲/۶ درصد و در شکل ۵ حدود ۱۶ درصد است، لذا از صحت روش‌های به کار گرفته شده و نتایج به دست آمده اطمینان حاصل می‌شود.

۶- بحث و نتایج

شبیه‌سازی‌ها برای اختلاف فشار ۵ و ۱۰ و ۱۵ کیلوپاسکال و برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با کسر حجمی نانوذرات صفر، ۲ و ۴ درصد برای کلیه آرایش‌ها انجام شده است. همچنین در تمامی شبیه‌سازی‌ها شار حرارتی ورودی از کف چاه ۱۵۰ کیلووات بر مترمربع در نظر گرفته شده است. در این بخش نتایج شبیه‌سازی برای چهار آرایش N و D و S و I در برای سرعت و دمای متوسط جریان در میکروکانال‌ها، توزیع دما در قسمت جامد چاه گرمایی و توزیع دما در کف چاه گرمایی ارائه می‌شوند. سپس به بررسی اثر نوع آرایش بر شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی (عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی، نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی) پرداخته و آرایش بهینه مشخص می‌شود.

۶-۱- سرعت متوسط در میکروکانال‌ها مختلف

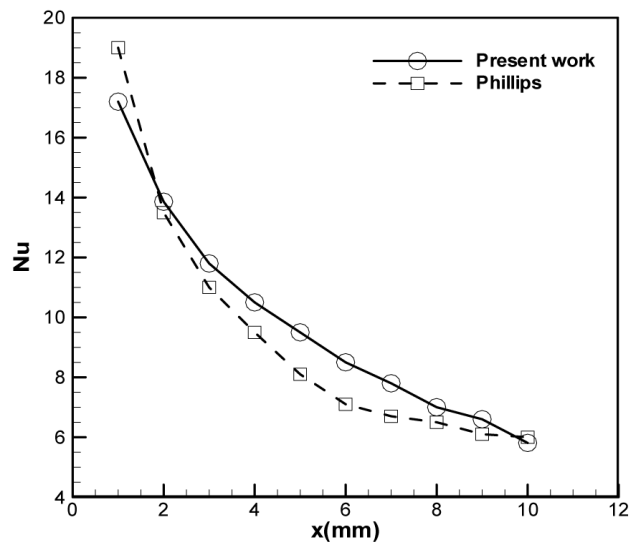
سرعت متوسط سیال در میکروکانال‌های چاه گرمایی در فشارهای ۵ و ۱۰ کیلوپاسکال در کسرهای حجمی مختلف مطالعه شده است و به عنوان یک نمونه برای فشار ۱۵ کیلوپاسکال در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷ خطوط جریان در ناحیه پخش کننده برای سیال آب نشان داده شده‌اند. چنانچه دیده می‌شود متناسب با محل ورودی برای هر آرایش و وابسته به جهت ورودی گردابه یا گردابه‌هایی در این ناحیه ایجاد می‌شود. از شکل ۶ دیده می‌شود که برای همه افت فشارها با افزایش کسر حجمی، لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد و سرعت در همه میکروکانال‌ها کاهش می‌یابد. برای آرایش I میکروکانال‌های شماره ۳ و ۵ در راستای ورود جریان و نزدیک‌تر به ورودی هستند و افت فشار در ناحیه پخش کننده جریان تا ورودی به این میکروکانال‌ها در مقایسه با سایر میکروکانال‌ها کمتر است و بنابراین سرعت در این میکروکانال‌ها حداکثر است. همچنین در آرایش I، توزیع سرعت در میکروکانال‌های چپ و راست نسبت به میکروکانال وسطی به علت تقارن نسبت به خط مرکزی گذرنده از چاه گرمایی متقارن است. در آرایش N میکروکانال شماره ۱ در راستای ورود جریان به چاه گرمایی قرار گرفته است، لذا به دلیل الگوی جریان در ناحیه پخش کننده و تشکیل گردابه‌ها در سمت چپ ناحیه پخش کننده افت فشار تا ورودی به این میکروکانال کمتر است و حداکثر سرعت در این میکروکانال اتفاق می‌افتد. برای چاه گرمایی نوع S، که ورودی از سمت شرق و خروجی در سمت غرب است، حداکثر سرعت در میکروکانال شماره ۷، که نسبت به ورودی نزدیک‌تر ولی از ناحیه گردابه‌ای دورتر است، اتفاق می‌افتد. برای آرایش D که ورودی و خروجی هر دو روی دیوار غربی هستند ناحیه گردابه‌ای در سمت راست ناحیه پخش کننده اتفاق می‌افتد و حداکثر سرعت در میکروکانال شماره ۶



شکل ۴: ناسلت متوسط به دست آمده برای هندسه چین و چن [۴] برای سه افت فشار ۲۵ و ۳۵ و ۵۰ کیلوپاسکال

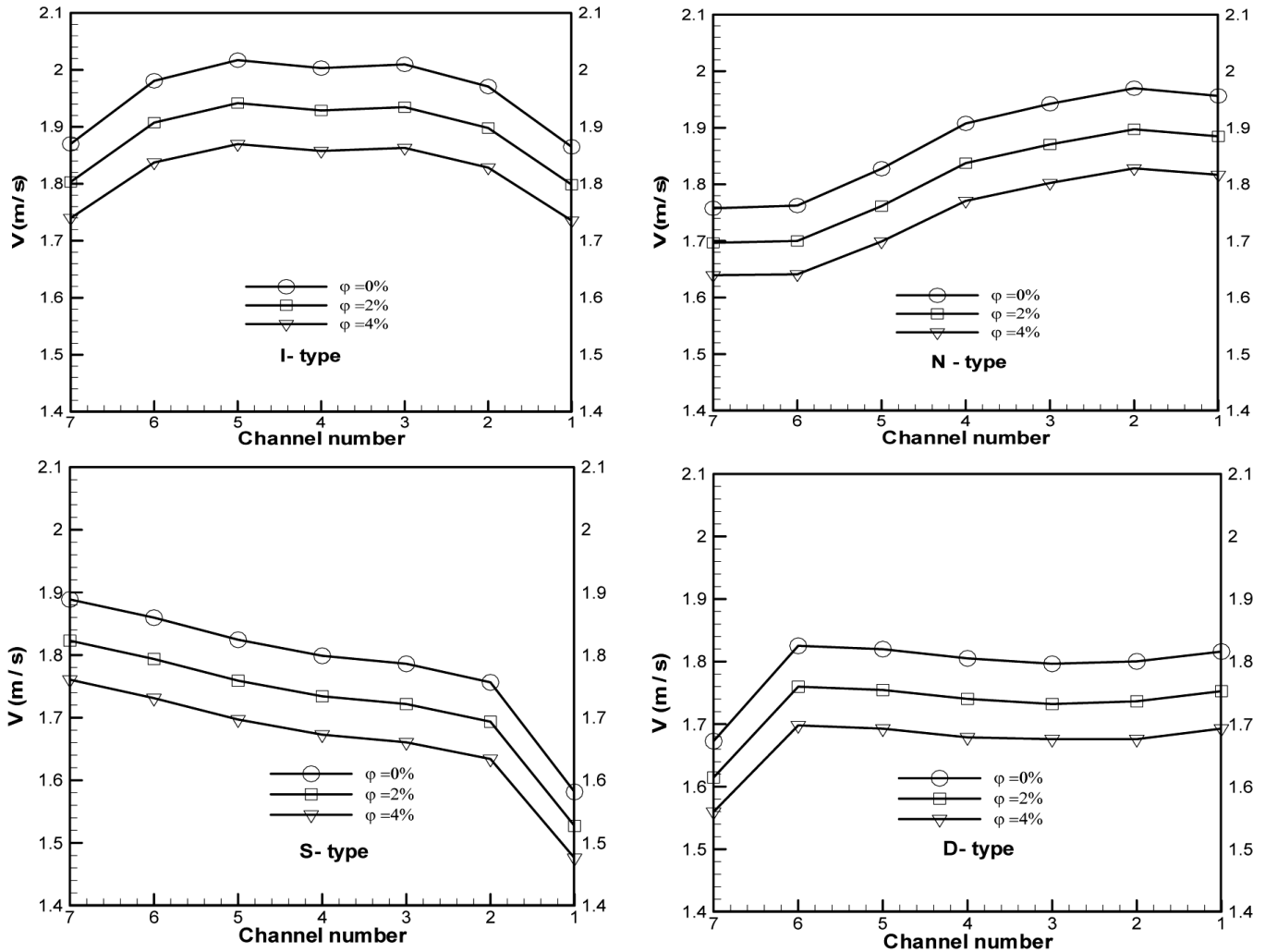
Fig. 4. The average Nusselt number obtained for Chein and Chen geometry [4] for three pressure drops of 25, 35 and 50 kPa

میکروکانال‌ها با نتایج عددی چین و چن [۴] و در شکل ۵ برای افت فشار ۵۰ کیلوپاسکال مقادیر ناسلت محلی فقط در میکروکانال پنجم با نتایج تجربی فیلیپس [۲۲] مقایسه شده‌اند. روند تغییرات ناسلت متوسط با افت فشار در شکل ۴ برای هر دو مطالعه یکسان است و روند تغییرات ناسلت محلی در طول میکروکانال پنجم در شکل ۵ مشابه نتایج تجربی فیلیپس [۲۲] است و



شکل ۵: تغییرات عدد ناسلت محلی در طول میکروکانال پنجم برای کار فیلیپس [۲۲] در افت فشار ۵۰ کیلوپاسکال

Fig. 5. Variation of local Nusselt number along microchannel #5 for the experimental study of Phillips [22] at pressure drop of 50 kPa

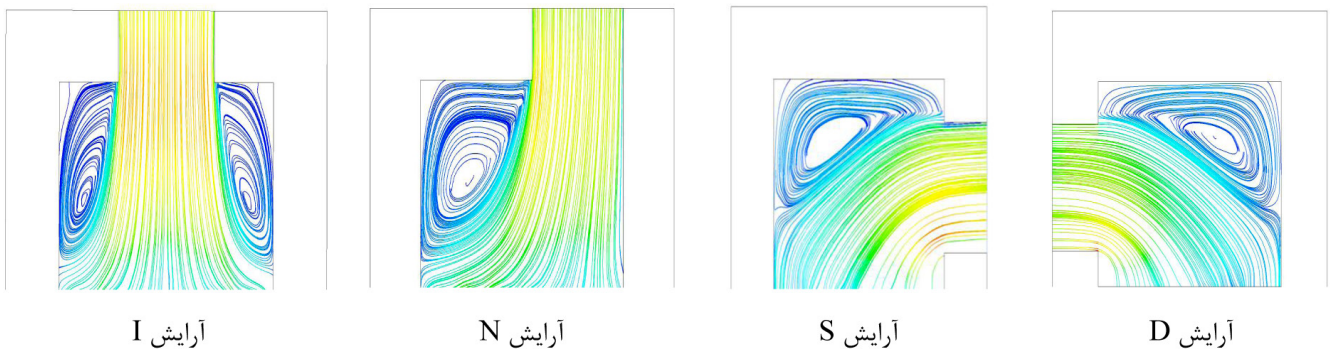


شکل ۶: سرعت متوسط نانوسیال در میکروکانال های شماره ۱ تا ۷ در کسر حجمی های مختلف و افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال

Fig. 6. Average velocity of Al_2O_3 -water nanofluid with volume fractions in microchannels for $\Delta P=15$ kPa

ورودی نیز بر روی توزیع سرعت در میکروکانال ها تأثیر دارد. به منظور بررسی اثر فشار بر سرعت متوسط در میکروکانال های مختلف مقادیر سرعت متوسط در میکروکانال های مختلف در فشارهای مختلف برای

اتفاق می افتد. همچنین برای آرایش های I و N و S و D حداقل سرعت به ترتیب در میکروکانال های شماره ۱ (و ۷)، ۶، ۱ و ۷ اتفاق می افتد. مقایسه نتایج آرایش های S و D نشان می دهد که محل خروجی در مقایسه با



آرایش I

آرایش N

آرایش S

آرایش D

شکل ۷: خطوط جریان در ناحیه پخش کننده برای چهارنوع چاه گرمایی میکروکانالی و سیال آب در افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال

Fig. 7. Stream lines at the distributor for various MCHS arrangements and water at $\Delta P=15$ kPa.

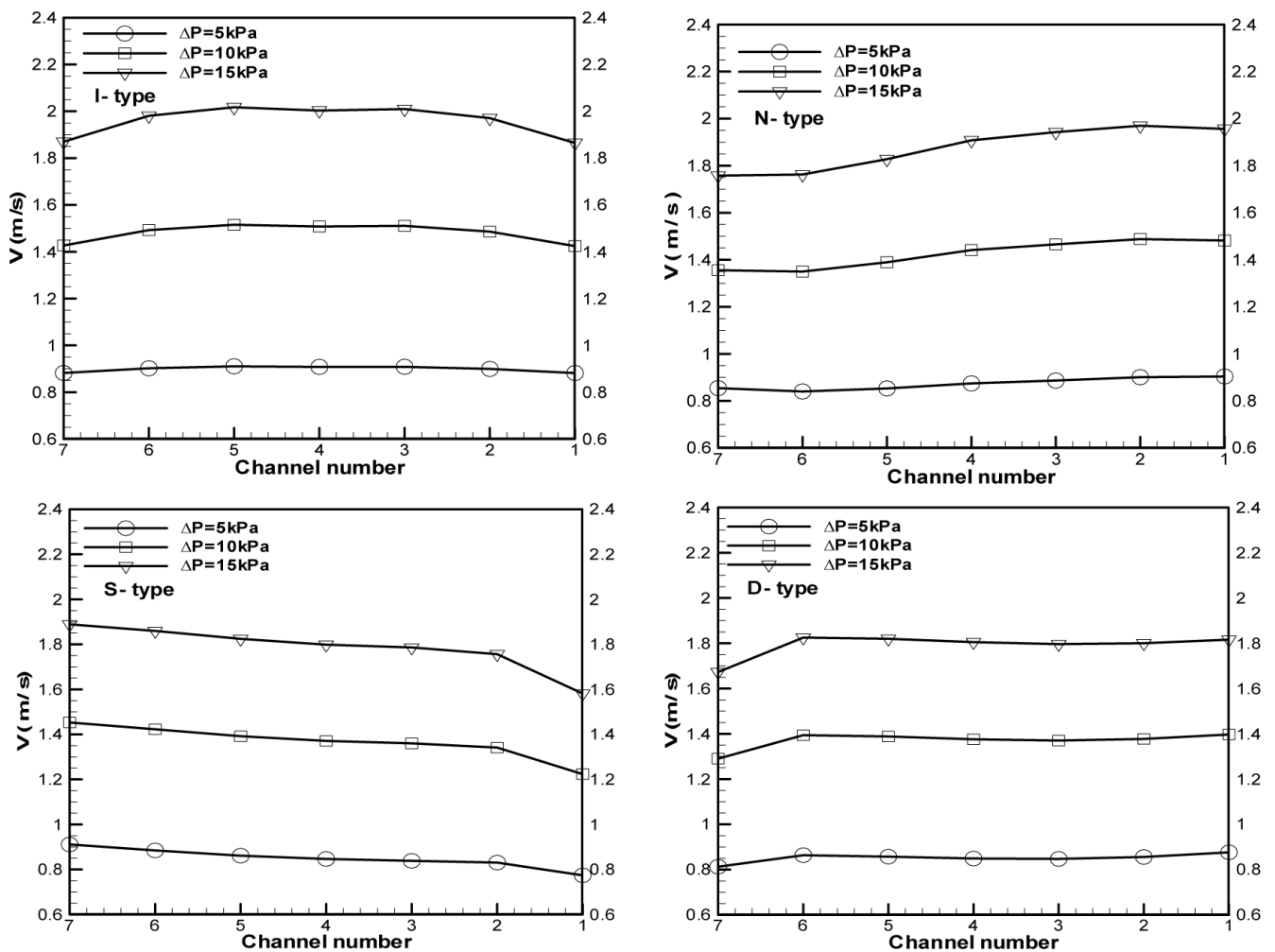
چاه گرمایی و به تبع آن عملکرد چاه گرمایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همانطور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود متوسط در میکروکانال‌ها در محدوده بین ۰/۶ تا ۲/۲ متر بر ثانیه برای افت فشارهای مختلف است. بنابراین عدد رینولدز مربوطه براساس قطر هیدرولیکی کانال بین ۱۴۷ تا ۵۴۲ است که نشان‌دهنده صحت فرض آرام بودن جریان در چاه گرمایی است. با توجه بررسی و تحلیل نتایج، برای آرایش‌های I و N و S و D به ترتیب حداکثر سرعت در میکروکانال‌های شماره ۳ (و ۵) و ۱ و ۷ و ۱ و حداقل سرعت در میکروکانال شماره ۱ (و ۷) و ۱ و ۷ اتفاق می‌افتد.

۶-۲- دمای متوسط سیال در میکروکانال‌ها

در شکل ۸ توزیع نامساوی سرعت در میکروکانال‌های چاه گرمایی به علت نحوه قرار گرفتن ورودی و خروجی نشان داده شد. بنابراین طول‌های ورودی حرارتی و هیدرودینامیکی در هر میکروکانال متفاوت است. از آنجایی که سرعت متوسط سیال در هر میکروکانال متفاوت است، انتظار می‌رود که

نانوسیال با کسر حجمی نانوذرات صفر، دو درصد و چهار درصد مطالعه شده‌اند. با این وجود به دلیل تشابه روند تغییرات برای کسرهای حجمی مختلف در شکل ۸ سرعت متوسط سیال در هر میکروکانال فقط برای سیال آب در فشارهای ۵ و ۱۰ و ۱۵ کیلوپاسکال برای چهار آرایش مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات سرعت در هر نوع چاه گرمایی در فشارهای مختلف، یکسان است؛ اما اندازه سرعت با کاهش فشار کاهش می‌یابد. با کاهش فشار، دبی جرمی ورودی به چاه گرمایی کاهش می‌یابد، بنابراین دبی ورودی به هر میکروکانال نیز کاهش می‌یابد که منجر به کاهش سرعت متوسط در هر میکروکانال می‌شود. به علت تفاوت الگوی جریان در قسمت ناحیه ورودی چاه گرمایی که در شکل ۷ قابل مشاهده است، سرعت متوسط در هر کانال به ازای یک افت فشار ثابت متفاوت است.

براساس نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۸ دیده می‌شود که به ازای هر افت فشار سرعت جریان یکنواخت‌تر در میکروکانال‌ها مربوط به آرایش I است. یکنواخت بودن جریان به طور مستقیم توزیع دما در کل



شکل ۸: سرعت متوسط سیال در میکروکانال‌های شماره ۱ تا ۷ برای آب
 Fig. 8. Average velocity of Al_2O_3 -water nanofluid with pressure drops in microchannels for water

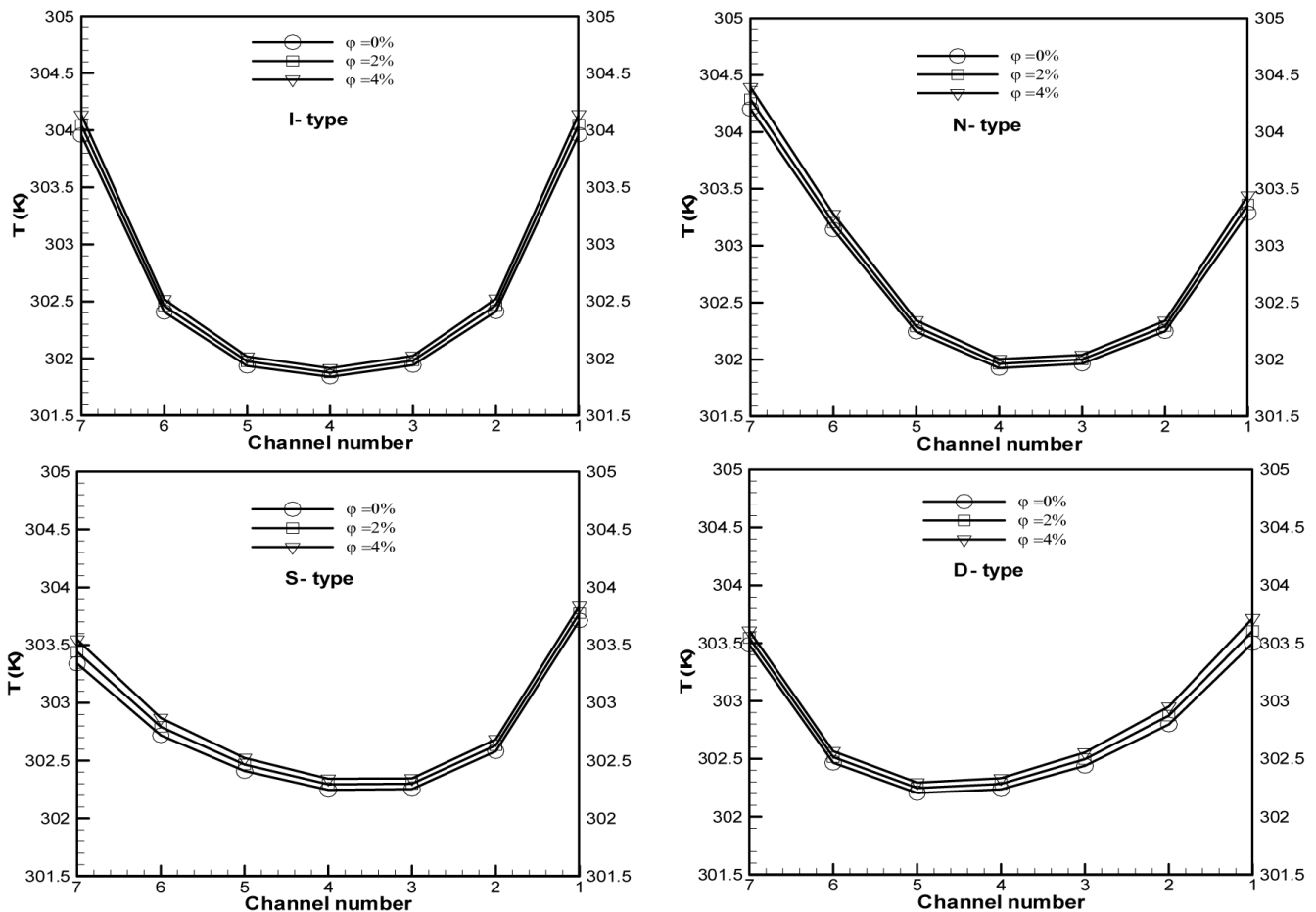
مقادیر دمای متوسط در میکروکانال‌های مختلف در فشارهای مختلف برای نانوسیال‌های با کسر حجمی نانوذرات صفر، دو درصد و چهار درصد مطالعه شده‌اند. با این وجود به دلیل تشابه روند تغییرات برای کسرهای حجمی مختلف نتایج در شکل ۱۰ فقط برای آب در فشارهای ۵ و ۱۰ و ۱۵ کیلوپاسکال برای چهار آرایش مختلف رسم شده است. در همه آرایش‌ها با افزایش فشار، دما در هر میکروکانال کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش فشار سرعت جریان افزایش یافته که به تبع آن دمای متوسط سیال کاهش می‌یابد. در همه آرایش‌ها دمای متوسط سیال میکروکانال‌های نزدیک به دیواره‌های جانبی چاه گرمایی، به علت حرارت بیشتری که از دیواره‌های جانبی دریافت می‌کنند، نسبت به میکروکانال‌های مرکزی بیشتر است. در مجموع نتایج نشان می‌دهد برای آرایش‌های I و N و S و D به ترتیب حداکثر دما در میکروکانال شماره ۱ (و ۷ و ۷ و ۱) اتفاق می‌افتد و همچنین حداقل دما در میکروکانال شماره ۴ و ۴ و ۳ و ۵ اتفاق می‌افتد.

۶-۳- توزیع دما در قسمت جامد چاه گرمایی

در چاه گرمایی از سیال خنک کننده برای دفع حرارت تولید شده به وسیله

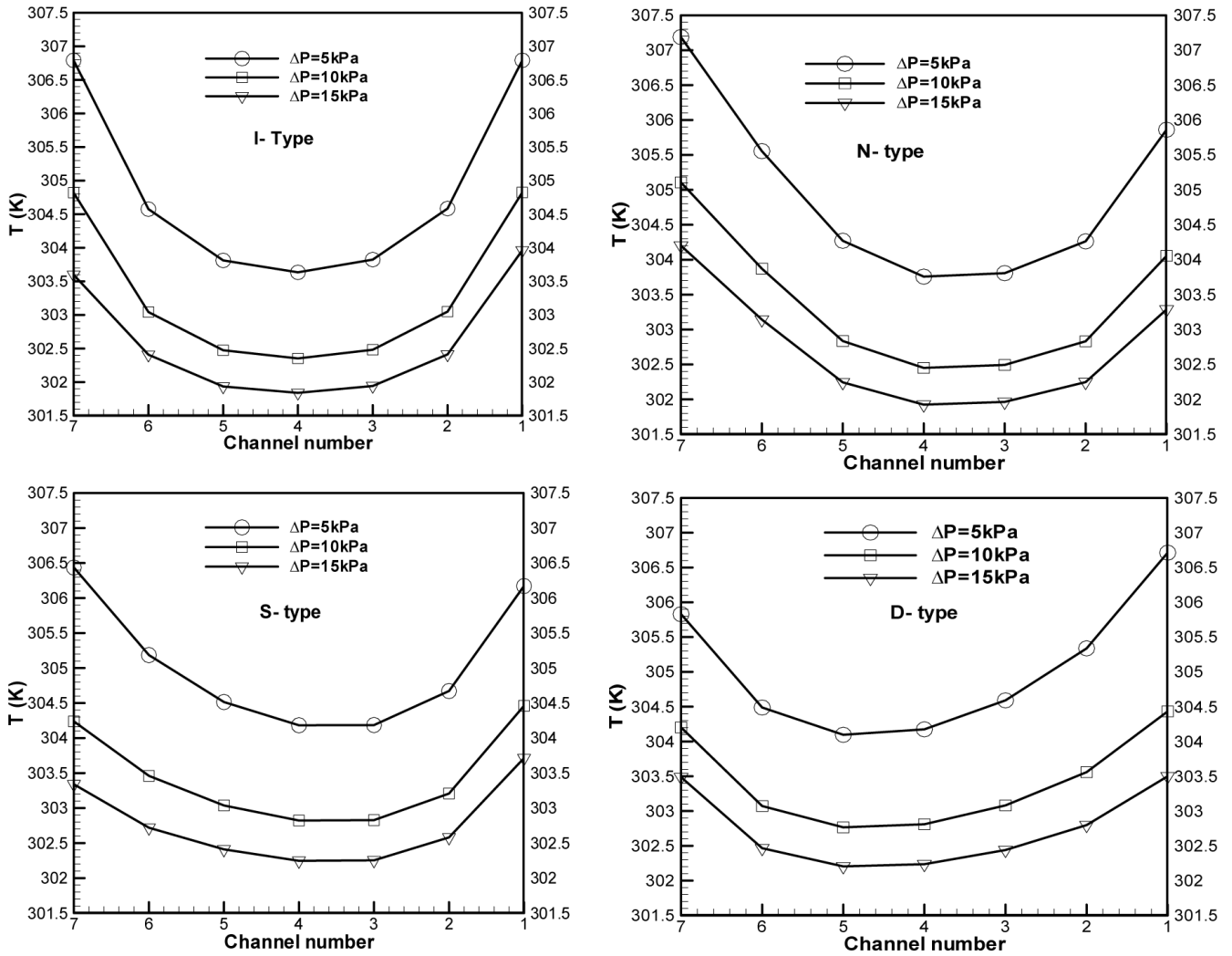
دمای متوسط سیال نیز در هر میکروکانال متفاوت باشد. در شکل ۹ دمای متوسط سیال در میکروکانال‌های چاه گرمایی به عنوان نمونه برای فشار ۱۵ کیلوپاسکال برای همه آرایش‌ها و در کسرهای حجمی مختلف نشان داده شده است. برای آرایش‌های I و N و S و D به ترتیب حداکثر دما در میکروکانال‌های ۱ (و ۷ و ۷ و ۱) اتفاق می‌افتد. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شد سرعت در این میکروکانال‌ها به دلیل موقعیت قرارگیری آن‌ها در چاه گرمایی و افت فشار بیشتر نسبت به دیگر میکروکانال‌ها، کمتر است و در واقع جرم کمتری از سیال باید حرارت تولید شده را دفع کند، لذا باعث افزایش دمای متوسط سیال در این میکروکانال‌ها می‌شود. همچنین حداقل دما در میکروکانال‌های شماره ۴ و ۴ و ۳ و ۵ اتفاق می‌افتد. توزیع دما در شکل ۹ نشان می‌دهد در همه حالت‌ها با افزایش کسر حجمی، دما در هر میکروکانال افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش کسر حجمی سرعت سیال به دلیل افزایش لزجت در میکروکانال‌ها می‌شود. از طرفی با افزایش کسر حجمی نانوذرات انتقال حرارت به دلیل افزایش رسانایی نانوسیال افزایش یافته که باعث افزایش دمای سیال می‌شود.

به منظور بررسی اثر فشار بر دمای متوسط در میکروکانال‌های مختلف



شکل ۹: دمای متوسط نانوسیال آب-اکسید آلومینوم در میکروکانال‌ها در افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال

Fig. 9. Average temperature of Al_2O_3 -water nanofluid in the microchannels for $\Delta P=15$ kPa



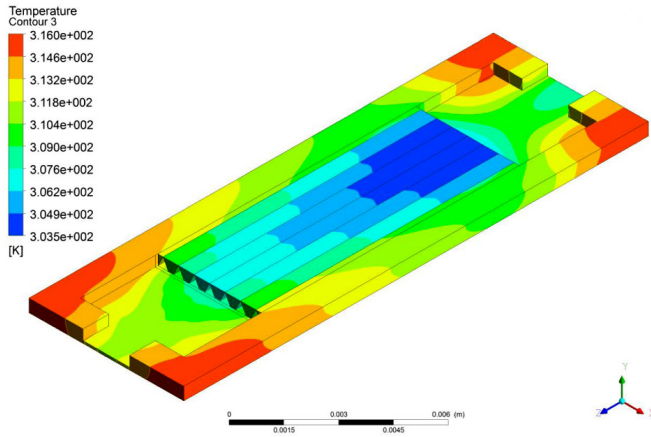
شکل ۱۰: دمای متوسط سیال در میکروکانال‌های شماره ۱ تا ۷ برای آب

Fig. 10. Average temperature of Al_2O_3 -water nanofluid with pressure drops in microchannels for water

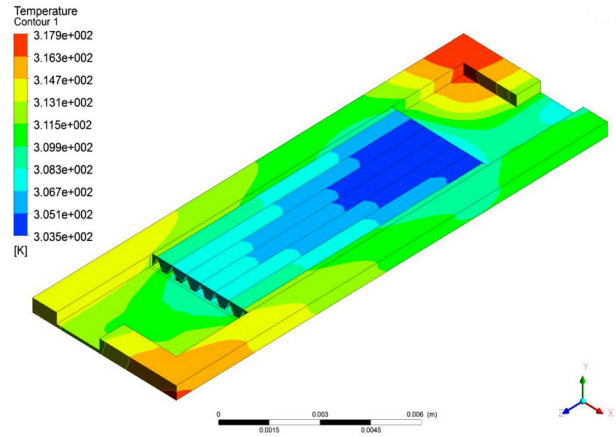
۴-۶- توزیع دما در کف چاه گرمایی

توزیع دما در کف چاه گرمایی که متصل به منبع تولید کننده حرارت می‌باشد برای چهار نوع چاه گرمایی شبیه‌سازی شده در این تحقیق مطالعه و برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و سیال پایه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. از شکل ۱۲ دیده می‌شود که حداکثر دمای کف برای چاه گرمایی نوع I برابر ۳۱۶ درجه کلوین و از بقیه آرایش‌ها کمتر است. نقاط گرم‌تر که در گوشه‌های کف چاه گرمایی مشاهده می‌شوند به علت عدم وجود کانال و سیال خنک‌کننده در آن‌جا برای دفع حرارت است. این نواحی به صورت غیر مستقیم از طریق هدایت خنک می‌شوند. در بین چهار نوع چاه گرمایی مطالعه شده، حداکثر دمای کف در چاه‌های گرمایی نوع D و S اتفاق افتاده است. از آنجایی که یکی از اهداف استفاده از چاه گرمایی پایین نگه داشتن دمای کف، به علت قرار گرفتن قطعه الکترونیکی در اتصال به آن است، می‌توان

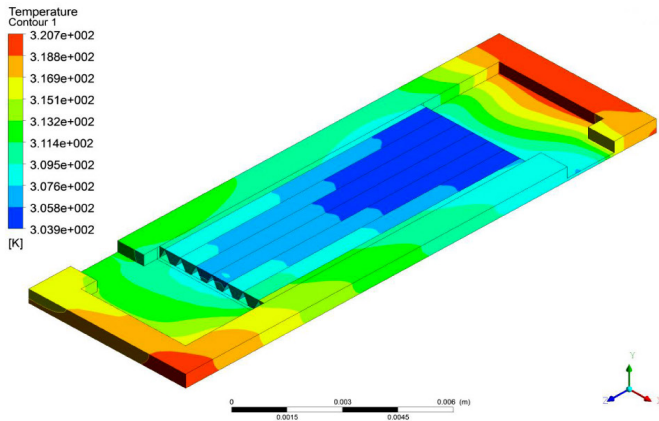
جابه‌جایی استفاده می‌شود. نحوه توزیع دما برای قسمت جامد در چهار نوع چاه گرمایی برای آب در فشار ۱۵ کیلوپاسکال در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای هر ۴ نوع چاه گرمایی بررسی شده، مشاهده می‌شود که ناحیه با درجه حرارت بالا در گوشه‌های کناری چاه گرمایی اتفاق می‌افتد، زیرا هیچ‌گونه دفع حرارت توسط جابه‌جایی سیال در آن‌جا وجود ندارد. همچنین با توجه به بالا بودن ضریب انتقال حرارت در ناحیه ورودی میکروکانال‌ها به دلیل سرعت بالاتر سیال، محدوده با دمای پایین در ناحیه ورودی میکروکانال‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که چاه گرمایی نوع I دارای توزیع دمای یکنواخت‌تری نسبت به چاه‌های گرمایی دیگر است. بنابراین همان‌طور که چین و چن [۴] نیز نشان دادند آرایش‌های مختلف ورودی و خروجی بر نحوه توزیع دما داخل چاه گرمایی تأثیر دارد.



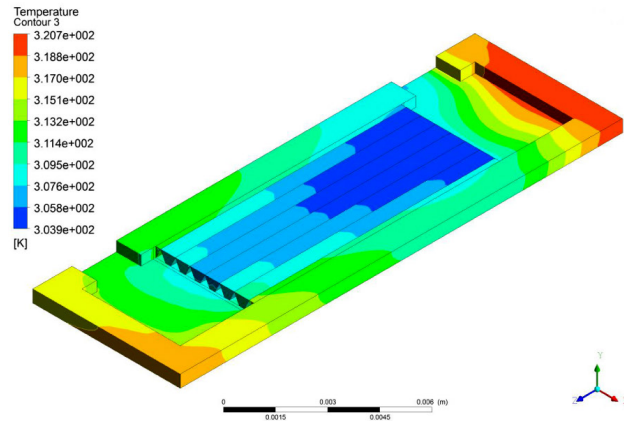
آرایش I



آرایش N



آرایش S



آرایش D

شکل ۱۱: توزیع دما در قسمت جامد چاه گرمایی برای چهار نوع آرایش مختلف ورود/خروج در فشار ۱۵ کیلوپاسکال

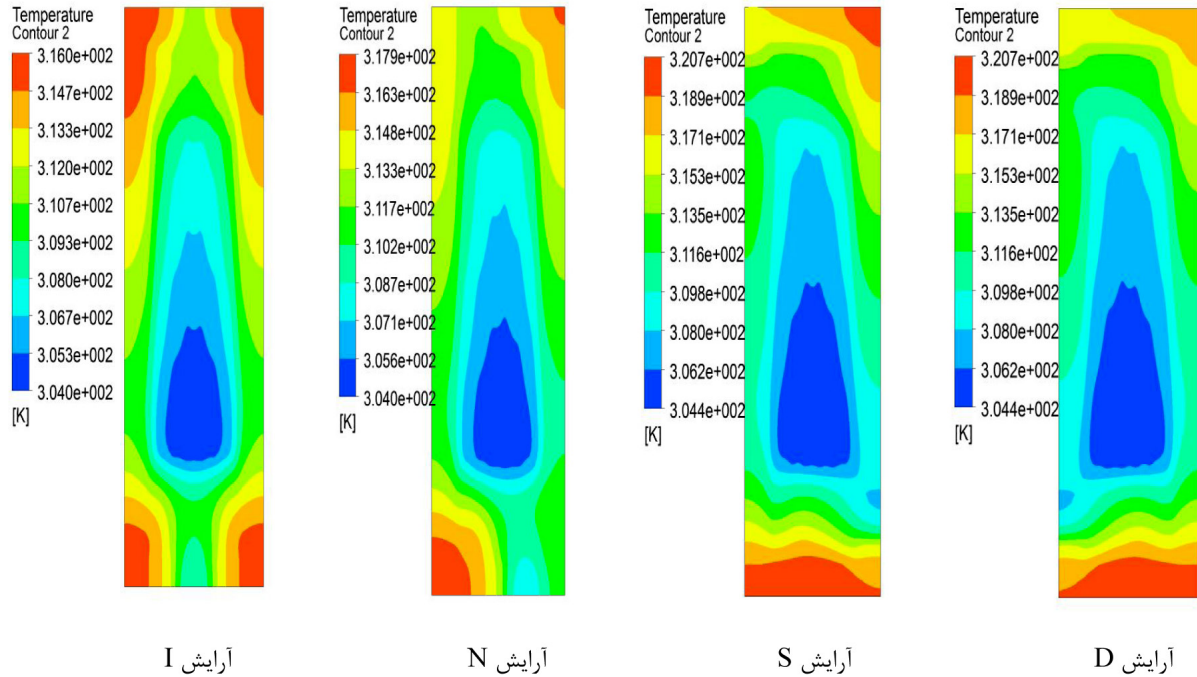
Fig. 11. Temperature distribution in the solid part of MCHS with different inlet/outlet arrangements at $\Delta P=15$ kPa

متوسط افزایش می‌یابد زیرا با افزایش فشار، سرعت سیال و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد که باعث افزایش انتقال حرارت و عدد ناسلت می‌شود. میزان افزایش عدد ناسلت با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال برای آرایش‌های I و N و S و D به ترتیب $\frac{۲۲}{۷۳}\%$ و $\frac{۲۴}{۰۶}\%$ و $\frac{۲۷}{۶۴}\%$ و $\frac{۲۵}{۱۳}\%$ است. بیشینه عدد ناسلت به ترتیب برای آرایش‌های I و N و D و S است و لذا چاه گرمایی نوع I دارای بهترین عملکرد انتقال حرارت است. در افت فشارهای پایین‌تر برتری آرایش I بر سایر آرایش‌ها محسوس‌تر است. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص شده است در افت فشار ۵ کیلوپاسکال، نسبت به افت فشارهای ۱۰ و ۱۵ کیلوپاسکال، تفاوت نسبی از نظر بهبود انتقال حرارت حداکثر است و ناسلت متوسط آرایش I نسبت به آرایش N و S و D به ترتیب $\frac{۳}{۰۳}\%$ و $\frac{۱۸}{۳۳}\%$ و $\frac{۱۲}{۵۷}\%$ بیشتر است. در همه آرایش‌ها با افزایش اختلاف فشار، مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. دبی جرمی متناسب با افزایش افت فشار افزایش می‌یابد و مقاومت حرارتی

گفت چاه گرمایی نوع I دارای عملکرد بهتری در پایین نگه داشتن دمای کف است.

۶-۵- تشخیص آرایش بهینه

در این بخش به بررسی اثر نوع ورودی و خروجی جریان بر روی شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی پرداخته شده است، تا بتوان عملکرد چاه گرمایی با آرایش‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه و بهترین آرایش را تشخیص داد. در جدول ۵ شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی با آرایش‌های مختلف برای افت فشارهای مختلف و نانوسیال آب-اکسید آلومینوم در کسر حجمی ۴ درصد ارائه شده است. در جدول ۵ پس از تعیین بهترین آرایش در شاخص مورد نظر (که با خط تیره مشخص شده است) اختلاف نسبی سایر آرایش‌ها نسبت به آن آرایش تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در همه آرایش‌ها با افزایش اختلاف فشار عدد ناسلت



شکل ۱۲: نحوه توزیع دما در کف چهار نوع چاه گرمایی برای آب در افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال

Fig. 12. Temperature distribution of the base plate of MCHS for water and $\Delta P=15$ kPa

کیلوپاسکال آرایش I نسبت به آرایش‌های N و S و D به ترتیب ۰.۱۴/۰۴٪ و ۳۳/۲۹٪ و ۳۳/۶۶٪ نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کمتری دارد.

در جدول ۶ شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی برای نانوسیال با کسر حجمی‌های مختلف ولی فقط برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال ارائه شده است. در جدول ۶ پس از تعیین بهترین آرایش در شاخص مورد بررسی (که با خط تیره مشخص شده است) اختلاف نسبی سایر آرایش‌ها نسبت به آن آرایش محاسبه می‌شود. در یک اختلاف فشار ثابت برای تمامی حالت‌ها با افزایش کسر حجمی نانوذرات ناسلت متوسط افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش کسر حجمی انتقال حرارت به دلیل افزایش رسانایی نانوسیال افزایش می‌یابد. میزان افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴ درصد برای آرایش‌های I و N و S و D به ترتیب ۵/۴۷٪ و ۵/۱۶٪ و ۴/۷۲٪ و ۵/۲۵٪ است.

پیش‌تر بیان شد در بین ۴ آرایش مورد بررسی، چاه گرمایی نوع I دارای بهترین عملکرد انتقال حرارت است؛ همان‌طور که در جدول ۶ نشان شده است برتری آرایش I در یک افت فشار ثابت در کسر حجمی‌های بالاتر محسوس‌تر است به طوری که برای نانوسیال با کسر حجمی ۴ درصد، در قیاس با آب و نانوسیال با کسر حجمی ۲ درصد، آرایش I نسبت به آرایش N و S و D به ترتیب ۱/۹۷٪ و ۱۵/۰۶٪ و ۱۰/۸۶٪ ناسلت متوسط بیشتری دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی تغییرات مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد و بسیار جزئی است. از طرفی تغییرات

کمتر میکروکانال در افت فشار یا دبی جرمی‌های بالا قابل دستیابی است. میزان کاهش مقاومت حرارتی با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال برای آرایش‌های I و N و S و D به ترتیب ۳۱/۲۱٪ و ۲۶/۰۳٪ و ۲۶/۴۷٪ و ۲۵/۱۵٪ است. بیشینه مقاومت حرارتی به ترتیب برای آرایش‌های S و D و N و I است، لذا چاه گرمایی نوع I دارای بهترین عملکرد است و از این نظر چاه گرمایی نوع S بدترین عملکرد را دارد. این حقیقت با نتایج مربوط به عدد ناسلت متوسط سازگار است، یعنی چاه گرمایی با کمترین مقاومت حرارتی دارای بیشترین ضریب انتقال حرارت است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان شده است از نظر مقاومت حرارتی برتری آرایش I با افزایش افت فشار افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در کسر حجمی ثابت ۴ درصد برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال، آرایش I نسبت به آرایش N و S و D به ترتیب ۱۱/۳۴٪ و ۲۸/۸۷٪ و ۲۸/۸۷٪ مقاومت حرارتی کمتری دارد.

آنچه برای مقاومت حرارتی بیان شد برای نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی نیز صادق است. در افت فشارهای بالاتر، مقادیر کمتر حداکثر دمای کف چاه گرمایی قابل دستیابی است و در این خصوص آرایش I بهترین عملکرد را دارد. میزان کاهش نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال برای آرایش‌های I و N و S و D به ترتیب ۲۹/۸۲٪ و ۲۳/۹۴٪ و ۲۴/۸۱٪ و ۲۳/۵۲٪ است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است؛ برتری آرایش I بر سایر آرایش‌ها با افزایش افت فشار افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در کسر حجمی ثابت ۴ درصد برای افت فشار ۱۵

جدول ۶: شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی برای کسر حجمی‌های مختلف و افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال

Table 6. Performance indicators of MCHS for different volume fraction and $\Delta P=15$ kPa

D	S	N	I	ϕ	
۶/۸۶	۶/۵۷	۷/۵۵	۷/۶۸	صفر	Nu
۱۰/۶۸	۱۴/۴۵	۱/۶۹	-	تفاوت نسبی	
۷/۰۴	۶/۷۳	۷/۷۵	۷/۸۹	۲	
۱۰/۷۷	۱۴/۷۰	۱/۷۷	-	تفاوت نسبی	
۷/۲۲	۶/۸۸	۷/۹۴	۸/۱۰	۴	
۱۰/۸۶	۱۵/۰۶	۱/۹۷	-	تفاوت نسبی	
۱/۲۸	۱/۲۸	۱/۱۰	۰/۹۹	۰	R_{th} (K/W)
۲۹/۲۹	۲۹/۲۹	۱۱/۱۱	-	تفاوت نسبی	
۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۰۹	۰/۹۸	۲	
۲۸/۵۷	۲۸/۵۷	۱۱/۲۲	-	تفاوت نسبی	
۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۰۸	۰/۹۷	۴	
۲۸/۸۷	۲۸/۸۷	۱۱/۳۴	-	تفاوت نسبی	
۱۰/۹۰	۱۰/۹۰	۹/۳۰	۸/۰۰	۰	$\theta \times 10^5$ (Km ² /W)
۳۶/۲۵	۳۶/۲۵	۱۶/۲۵	-	تفاوت نسبی	
۱۰/۸۰	۱۰/۷۵	۹/۱۷	۸/۰۲	۲	
۳۴/۶۶	۳۴/۰۴	۱۴/۳۴	-	تفاوت نسبی	
۱۰/۷۶	۱۰/۷۳	۹/۱۸	۸/۰۵	۴	
۳۳/۶۶	۳۳/۲۹	۱۴/۰۴	-	تفاوت نسبی	

جدول ۵: شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی برای افت فشارهای مختلف و کسر حجمی ۴ درصد

Table 5. Performance indicators of MCHS for different pressure drops and volume fraction of 4%

D	S	N	I	ΔP (kPa)	
۵/۷۷	۵/۳۹	۶/۴۰	۶/۶۰	۵	Nu
۱۲/۵۷	۱۸/۳۳	۳/۰۳	-	تفاوت نسبی	
۶/۶۶	۶/۳۱	۷/۳۲	۷/۵۱	۱۰	
۱۱/۳۲	۱۵/۹۸	۲/۵۳	-	تفاوت نسبی	
۷/۲۲	۶/۸۸	۷/۹۴	۸/۱۰	۱۵	
۱۰/۸۶	۱۵/۰۶	۱/۹۷	-	تفاوت نسبی	
۱/۶۷	۱/۷۰	۱/۴۶	۱/۴۱	۵	R_{th} (K/W)
۱۸/۴۴	۲۰/۵۷	۳/۵۵	-	تفاوت نسبی	
۱/۳۸	۱/۳۸	۱/۲۱	۱/۱۱	۱۰	
۲۴/۳۲	۲۴/۳۲	۹/۰۱	-	تفاوت نسبی	
۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۰۸	۰/۹۷	۱۵	
۲۸/۸۷	۲۸/۸۷	۱۱/۳۴	-	تفاوت نسبی	
۱۴/۰۷	۱۴/۲۷	۱۲/۰۷	۱۱/۴۷	۵	$\theta \times 10^5$ (Km ² /W)
۲۲/۶۷	۲۴/۴۱	۵/۲۳	-	تفاوت نسبی	
۱۱/۸۰	۱۱/۷۳	۱۰/۲۰	۹/۰۷	۱۰	
۳۰/۱۰	۲۹/۳۳	۱۲/۴۶	-	تفاوت نسبی	
۱۰/۷۶	۱۰/۷۳	۹/۱۸	۸/۰۵	۱۵	
۳۳/۶۶	۳۳/۲۹	۱۴/۰۴	-	تفاوت نسبی	

شود. افزایش کسر حجمی باعث افزایش دمای سیال خنک‌کننده و کاهش دمای قسمت جامد می‌شود. لذا طبق قانون سرمایه‌ش نیوتون، در یک شار حرارتی ثابت، ضریب انتقال حرارت بین سیال و دیوار افزایش می‌یابد و

نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی با کسر حجمی جزئی و بعضاً نامنظم است. برای این که دلیل این تغییرات نامنظم جزئی تحلیل شود باید اثرات استفاده از نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت بررسی

درصد و ۳۶/۲۵ درصد نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی کمتری دارد.

۶-۶- بررسی اثر حرکت براونی و خواص متغیر با دما بر شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی

حرکت براونی یکی از سازوکارهای افزایش رسانایی نانوسیال است. محققان زیادی بر این باورند که یک افزایش آشکار انتقال حرارت به علت حرکت براونی نانوذرات وجود دارد. تفکرات آن‌ها استناد به این واقعیت دارد که نانوذرات سطح بزرگتری برای برخورد‌های مولکولی ایجاد می‌کنند [۱۰]. در جدول ۷ شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی با در نظر گرفتن اثر حرکت براونی و نیز بدون لحاظ نمودن آن به عنوان نمونه برای یک کسر حجمی و یک افت فشار ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که لحاظ نمودن حرکت براونی بر سه شاخص عملکرد چاه گرمایی اثر مطلوب دارد به طوری که باعث افزایش عدد ناسلت متوسط و کاهش مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی می‌شود. در مجموع لحاظ نمودن اثر حرکت براونی شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی را بین ۰/۱ تا ۰/۷۵ درصد بهبود بخشیده است.

در جدول ۸ شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی با در نظر گرفتن خواص مستقل از دما و نیز خواص متغیر با دما به عنوان نمونه برای یک کسر حجمی و یک افت فشار ارائه و سپس به صورت نسبی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از خواص متغیر نسبت به خواص ثابت بر روی هر سه شاخص عملکرد انتقال حرارت چاه گرمایی اثر مطلوب دارد، یعنی استفاده از خواص متغیر باعث افزایش ناسلت متوسط، کاهش مقاومت حرارتی و کاهش نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی می‌شود. در مجموع لحاظ نمودن خواص متغیر با دما شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی را بین ۱/۹ تا ۳/۹ درصد بهبود بخشیده است.

۷- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، جریان سیال و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در چاه گرمایی میکروکانالی مستطیلی شامل ۷ میکروکانال مثلثی متساوی‌الساقین برای چهار نوع آرایش ورودی و خروجی بررسی شد. اثرات حرکت براونی نانوذرات و خواص ترموفیزیکی متغیر با دما (در دو بخش جامد و سیال) در همه شبیه‌سازی‌ها لحاظ شد. اثر تغییرات فشار، تغییرات کسر حجمی نانوسیال و نوع آرایش ورود و خروج بر عملکرد چاه گرمایی مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه‌ای از نتایج به شرح زیر است:

۱. توزیع سرعت و دمای متوسط در میکروکانال‌ها تابعی از پدیده‌هایی مثل ایجاد گردابه‌ها، وسعت و محل آن در ناحیه پخش‌کننده و بطور کلی وابسته به محل قرارگیری ورودی و خروجی است.

۲. در میان آرایش‌ها، آرایش نوع I دارای بیشترین عدد ناسلت متوسط است لذا بهترین آرایش است. برای کسر حجمی ثابت ۴ درصد در افت فشار

بنابراین نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی به علت افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد، زیرا اختلاف دمای کمتری بین سیال و دیوارهای چاه گرمایی حاصل می‌شود. استفاده از نانوذرات دو اثر مخالف هم روی ضریب انتقال حرارت و مقاومت حرارتی اعمال می‌کند. اثر نامطلوب لزجت بالاتر در کسر حجمی‌های بالای نانوذرات است و اثر مطلوب افزایش رسانایی با افزایش کسر حجمی نانوذرات است. به بیان دیگر اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه رسانایی را افزایش می‌دهد و با افزایش کسر حجمی ذرات این افزایش بیشتر می‌شود. افزایش رسانایی باید ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش دهد. اما از طرفی لزجت نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد که باعث کاهش سرعت و جابه‌جایی می‌شود، که به تبع آن ضخامت لایه مرزی روی دیوارهای میکروکانال افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت لایه مرزی، گرادیان دمای کمتری در دیوارهای میکروکانال ایجاد می‌کند که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را کاهش و مقاومت حرارتی و همچنین نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی را افزایش می‌دهد. به عنوان نمونه، همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، افزایش کسر حجمی نانوذرات در آرایش‌های S و D نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی را کاهش می‌دهد. این کاهش نشان می‌دهد که در این موارد اثر مثبت افزایش رسانایی بیشتر از اثر منفی افزایش لزجت می‌باشد. میزان کاهش مقاومت حرارتی با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴ درصد برای آرایش‌های I و N و S و D به ترتیب ۲/۰۲٪، ۱/۸۱٪، ۲/۳۴٪ و ۲/۳۴٪ است. همان‌طور که پیش‌تر به تفصیل بیان شد تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی نامنظم است. در این خصوص برای آرایش I روند افزایشی نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی وجود دارد، به طوری که با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴ درصد، این پارامتر ۰/۶۲٪ افزایش یافته است. در آرایش N با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۲ درصد نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی ۱/۴۰٪ کاهش می‌یابد و با افزایش کسر حجمی از ۲ تا ۴ درصد نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی ۱/۴۰٪ کاهش می‌یابد و با شار حرارتی ۰/۱۱٪ افزایش می‌یابد. در آرایش S و D با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴ درصد نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی به ترتیب ۱/۵۶٪ و ۱/۲۸٪ کاهش می‌یابد.

با توجه به جدول ۶ و مقایسه مقادیر مقاومت حرارتی آرایش‌های مختلف در سه کسر حجمی صفر و ۲ و ۴ درصد مشخص است که برتری آرایش I بر آرایش N در کسر حجمی ۴ درصد به حداکثر مقدار خود می‌رسد و مقدار تفاوت نسبی آن‌ها ۱۱/۳۴ درصد می‌باشد؛ اما حداکثر برتری آرایش I بر آرایش S و D در کسر حجمی صفر مشاهده می‌شود که مقدار تفاوت نسبی آن با هر دو آرایش ۲۹/۲۹ درصد می‌باشد. همچنین در مورد شاخص نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی برتری آرایش I بر سایر آرایش‌ها در کسر حجمی صفر درصد حداکثر است به‌گونه‌ای که آرایش I نسبت به آرایش‌های N و S و D به ترتیب ۱۶/۲۵ درصد، ۳۶/۲۵

جدول ۸: شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی با خواص مستقل از دما و خواص متغیر با دما برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و کسر حجمی ۴٪

Table 8. Performance indicators of MCHS with temperature-dependent and independent properties for $\Delta P=15$ kPa and $\phi=4\%$.

I	N	S	D	شاخص عملکرد
۸/۰۹۸	۷/۹۴۵	۶/۸۸۳	۷/۲۲۱	$Nu_{V,P}$
۷/۹۴۷	۷/۷۷۵	۶/۷۲۹	۷/۰۶۹	$Nu_{C,P}$
۱/۹	۲/۲	۲/۳	۲/۲	اختلاف نسبی
۰/۹۷۷	۱/۰۸۶	۱/۲۵۴	۱/۲۵۵	$R_{V,P}$
۱/۰۰۹	۱/۱۲۵	۱/۲۹۰	۱/۲۹۳	$R_{C,P}$
۲/۲	۳/۵	۲/۹	۲/۹	اختلاف نسبی
۸/۰۵	۹/۱۸	۱۰/۷۳	۱۰/۷۶	$\Theta_{V,P} \times 10^\circ$
۸/۳۳	۹/۵۵	۱۱/۰۷	۱۱/۱۱	$\Theta_{C,P} \times 10^\circ$
۳/۴	۳/۹	۳/۱	۳/۲	اختلاف نسبی

جدول ۷: شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی با و بدون در نظر گرفتن حرکت براونی برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و کسر حجمی ۴٪

Table 7. Performance indicators of MCHS with and without considering Brownian motion for $\Delta P=15$ kPa and $\phi=4\%$.

I	N	D	S	شاخص عملکرد
۸/۰۹۸	۷/۹۴۵	۶/۸۸۳	۷/۲۲۲	$Nu_{Brownian}$
۸/۰۳۸	۷/۸۸۸	۶/۸۳۴	۷/۱۶۸	$Nu_{NonBrownian}$
۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۵	اختلاف نسبی
۰/۹۷۷	۱/۰۸۶	۱/۲۵۳	۱/۲۵۵	$R_{th,Brownian}$
۰/۹۸۱	۱/۰۸۹	۱/۲۵۹	۱/۲۶۱	$R_{th,NonBrownian}$
۰/۴۱	۰/۲۸	۰/۴۸	۰/۴۸	اختلاف نسبی
۸/۰۵	۹/۱۸	۱۰/۷۶۳	۱۰/۷۶۳	$\Theta_{Brownian} \times 10^\circ$
۸/۰۷	۹/۲۱	۱۰/۷۷۳	۱۰/۸۰۲	$\Theta_{NonBrownian} \times 10^\circ$
۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۱	۰/۳۶	اختلاف نسبی

و S و D به ترتیب ۰.۱۴/۰.۴٪ و ۰.۳۳/۲۹٪ و ۰.۳۳/۶۶٪ نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه گرمایی به شار حرارتی کمتری دارد. همچنین در افت فشار ثابت ۱۵ کیلوپاسکال آرایش I برای سیال خالص آب نسبت به آرایش‌های N و S و D به ترتیب ۱۶/۲۵ درصد، ۳۶/۲۵ و ۳۶/۲۵ درصد، نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه گرمایی به شار حرارتی کمتری دارد.

۵. به طور کلی، با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴ درصد عدد ناسلت متوسط بین ۴/۷۲ درصد تا ۵/۴۷ درصد افزایش یافت، مقاومت حرارتی بین ۱/۸۱ درصد تا ۲/۳۴ درصد کاهش یافت و نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه گرمایی به شار حرارتی، به جز برای آرایش I و S، بین ۱/۲۸٪ تا ۱/۵۶٪ کاهش یافت.

۶. به طور کلی، با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال عدد ناسلت متوسط بین ۰.۲۲/۷۳٪ تا ۰.۲۷/۶۴٪ افزایش یافت، مقاومت حرارتی بین ۰.۲۵/۱۵٪ تا ۰.۳۱/۲۱٪ کاهش یافت و نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه گرمایی به شار حرارتی بین ۰.۲۳/۵۲٪ تا ۰.۲۹/۸۲٪ کاهش یافت.

۷. به طور کلی، شاخص‌های عملکرد چاه گرمایی با لحاظ نمودن اثر حرکت براونی بین ۰/۱ تا ۰/۷۵ درصد و با در نظر گرفتن خواص متغیر با دما بین ۱/۹ تا ۳/۹ درصد بهبود داده شد.

در مجموع نتایج نشان دادند که استفاده از آرایش نوع I به دلیل توزیع

۵ کیلوپاسکال برتری آرایش I حداکثر است به طوری که ناسلت متوسط آن نسبت به آرایش N و S و D به ترتیب ۳/۰۳ درصد، ۱۸/۳۳ درصد و ۱۲/۵۷ درصد بیشتر است. همچنین برای افت فشار ثابت ۱۵ کیلوپاسکال و کسر حجمی ۴ درصد برتری آرایش I نسبت به سایر آرایش‌ها محسوس تر است، به گونه‌ای که نسبت به آرایش N و S و D به ترتیب ۱/۹۷ درصد، ۱۵/۰۶ درصد و ۱۰/۸۶ درصد ناسلت متوسط بیشتری دارد.

۳. در میان آرایش‌ها، آرایش نوع I دارای کمترین مقاومت حرارتی است. در کسر حجمی ثابت ۴ درصد برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال آرایش I نسبت به آرایش N و S و D به ترتیب ۱۱/۳۴ درصد، ۲۸/۸۷ درصد و ۲۸/۸۷ درصد مقاومت حرارتی کمتری دارد. همچنین در افت فشار ثابت ۱۵ کیلوپاسکال برتری آرایش I بر آرایش N در کسر حجمی ۴ درصد به حداکثر مقدار خود، یعنی ۱۱/۳۴ درصد، می‌رسد. حداکثر برتری آرایش I بر آرایش S و D در شرایطی رخ می‌دهد که از آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شود و این برتری ۲۹/۲۹ درصد است.

۴. از نظر نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه گرمایی به شار حرارتی آرایش نوع I برترین آرایش است. این برتری با افزایش افت فشار افزایش و با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در کسر حجمی ثابت ۴ درصد برای افت فشار ۱۵ کیلو پاسکال آرایش I نسبت به آرایش‌های N

θ یکنواخت تر دما در کف چاه گرمایی (محل قرار گرفتن تراشه الکترونیکی)،
نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به
شار حرارتی (Km^2W^{-1}) مقاومت حرارتی کمتر و انتقال حرارت بیشتر مطلوب تر است.

زیرنویس ها

فهرست علائم

متوسط	avg	سطح مقطع میکروکانال (m^2)	A
براونی	Brownian	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	c_p
کانال	ch	قطر هیدرولیکی میکروکانال (m)	D_h
خواص ثابت	C.P	ضریب جابجایی حرارتی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	h
موثر	eff	ارتفاع (m)	H
سیال	f	هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	k
چاه گرمایی	hs	طول (m)	L
ورودی	in	عدد ناسلت	Nu
حداکثر	max	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	P
حداقل	min	محیط تر شده (m)	p
خروجی	out	شار حرارتی (Wm^{-2})	q
نانوذرات	p	مقاومت کاپیتزا	R_b
جامد	s	مقاومت حرارتی (KW^{-1})	R_{th}
سیلیکون	Silicon	دما (K)	T
استاتیکی	Static	سرعت سیال (ms^{-1})	V
خواص متغیر	V.P	عرض (m)	W
دیوار	w	مؤلفه های مختصاتی	x, y, z

حروف یونانی

مراجع

- [1] D.B. Tuckerman, R. Pease, High-performance heat sinking for VLSI, IEEE Electron device letters, 2(5) (1981) 126-129.
- [2] G. Hetsroni, A. Mosyak, Z. Segal, Nonuniform temperature distribution in electronic devices cooled by flow in parallel microchannels, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 24(1) (2001) 16-23.

ϕ کسر حجمی نانوذرات

ρ چگالی (kgm^{-3})

μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

- triangular microchannel heat sink performance, *Modares Mechanical Engineering*, 16(12) (2016) 27-38 (in Persian).
- [13] S.E. Ghasemi, A. Ranjbar, M. Hosseini, Thermal and hydrodynamic characteristics of water-based suspensions of Al_2O_3 nanoparticles in a novel minichannel heat sink, *Journal of Molecular Liquids*, 230 (2017) 550-556.
- [14] G. Hetsroni, A. Mosyak, Z. Segal, Nonuniform temperature distribution in electronic devices cooled by flow in parallel microchannels, *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, 24(1) (2001) 16-23.
- [15] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of heat and Mass transfer*, 43(19) (2000) 3701-3707.
- [16] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International journal of heat and mass transfer*, 54(19-20) (2011) 4410-4428.
- [17] J. Li, *Computational Analysis of Nanofluid Flow in Microchannels with Applications to Micro-heat Sinks and Bio-MEMS*, ProQuest, 2008.
- [18] Y. Yang, Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson, G. Wu, Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(6) (2005) 1107-1116.
- [19] J. Koo, C. Kleinstreuer, A new thermal conductivity model for nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, 6(6) (2004) 577-588.
- [20] C. Glassbrenner, G.A. Slack, Thermal conductivity of silicon and germanium from 3 K to the melting point, *Physical Review*, 134(4A) (1964) A1058.
- [21] Y. Hwang, J. Lee, C. Lee, Y. Jung, S. Cheong, C. Lee, B. Ku, S. Jang, Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids, *Thermochemica Acta*, 455(1) (2007) 70-74.
- [22] R.J. Phillips, *Microchannel Heat Sinks*, Lincoln Laboratory Journal, 1(1) (1988).
- [3] I. Tiselj, G. Hetsroni, B. Mavko, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, Z. Segal, Effect of axial conduction on the heat transfer in micro-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(12) (2004) 2551-2565.
- [4] R. Chein, J. Chen, Numerical study of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance, *International Journal of Thermal Sciences*, 48(8) (2009) 1627-1638.
- [5] T.-C. Hung, W.-M. Yan, Effects of tapered-channel design on thermal performance of microchannel heat sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(9) (2012) 1342-1347.
- [6] V.L. Vinodhan, K. Rajan, Computational analysis of new microchannel heat sink configurations, *Energy Conversion and Management*, 86 (2014) 595-604.
- [7] V. Duryodhan, A. Singh, S. Singh, A. Agrawal, Convective heat transfer in diverging and converging microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80 (2015) 424-438.
- [8] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, Effects of different inlet/outlet arrangements on performance of a trapezoidal porous microchannel heat sink, *Modares Mechanical Engineering*, 16(8) (2016) 269-280. (in Persian).
- [9] R. Chein, G. Huang, Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids, *Applied thermal engineering*, 25(17-18) (2005) 3104-3114.
- [10] H.R. Seyf, B. Nikaaein, Analysis of Brownian motion and particle size effects on the thermal behavior and cooling performance of microchannel heat sinks, *International Journal of Thermal Sciences*, 58 (2012) 36-44.
- [11] B. Fani, M. Kalteh, A. Abbassi, Investigating the effect of Brownian motion and viscous dissipation on the nanofluid heat transfer in a trapezoidal microchannel heat sink, *Advanced Powder Technology*, 26(1) (2015) 83-90.
- [12] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, R. Sadeghi, Three dimensional investigations of inlet/outlet arrangements and nanofluid utilization effects on a

Please cite this article using:

H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, R. Sadeghi, Investigation of Nanofluid Flow Field and Conjugate Heat Transfer in a Microchannel Heat Sink with Four Different Arrangements, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(2) (2019) 381-398.
DOI: 10.22060/mej.2017.12473.5347

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

