

تحلیل عملکرد حرارتی و آنتروپی تولیدی جریان نانوسیال در یک چاه گرمایی دوزنقه‌ای با آرایش‌های مختلف

حسین خراسانی‌زاده، مجتبی سپهرنیا*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

عملکرد حرارتی

تولید آنتروپی

میکروکانال

آرایش‌های مختلف

نانوسیال

چکیده: در این پژوهش مشخصه‌های انتقال حرارت و تولید آنتروپی جریان آرام نانوسیال آب-آلومینا در یک چاه گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای به صورت عددی و سیمپدی برای شار حرارتی ثابت ورودی به کف چاه گرمایی و با لحاظ نمودن هدایت در قسمت‌های جامد مطالعه شده‌است. معادلات حاکم بر جریان به روش حجم محدود بر مبنای المان محدود حل شده‌است. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر چهار آرایش مختلف ورود/خروج افقی جریان بر روی شاخص‌های حرارتی و تولید آنتروپی، با لحاظ اثر حرکت براونی نانوذرات و تغییر خواص نانوسیال با دما، بوده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش افت فشار برای یک کسر حجمی ثابت موجب افزایش عدد ناسلت (بین ۱/۷۸٪ تا ۱/۸۸٪)، کاهش مقاومت حرارتی (بین ۳۵/۹۴٪ تا ۴۰/۴۱٪)، کاهش نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی (بین ۳۳/۹۰٪ تا ۴۱/۶۰٪) و کاهش آنتروپی تولیدی کل (بین ۲۴/۳۴٪ تا ۲۷/۱۵٪) می‌شود. همچنین برای همه آرایش‌ها در یک افت فشار ثابت افزایش کسر حجمی باعث افزایش عدد ناسلت (بین ۱۱/۸۸٪ تا ۱۲/۰۶٪) و آنتروپی تولیدی کل (بین ۱/۷۷٪ تا ۲/۳۷٪) می‌شود، ولی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی ندارد به طوری که با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ تغییرات مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی به ترتیب کمتر از ۱٪ و ۲٪ می‌باشد. بیشترین و کمترین افزایش تولید آنتروپی کل با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ به ترتیب مربوط به آرایش A با ۲/۳۷٪ و آرایش D با ۱/۷۷٪ است. از منظر قانون دوم ترمودینامیک، به دلیل آنتروپی تولیدی کل کمتر، آرایش B در افت فشارهای پایین (۵ kPa) و آرایش C در افت فشارهای بالا (۱۰ kPa و ۱۵ kPa) بهترین آرایش هستند اما از نظر شاخص‌های حرارتی آرایش A همواره از سایر آرایش‌ها برتر است.

۱- مقدمه

تطابق نتایج تجربی و عددی، اعلام نمودند که هنوز پیش‌بینی واقعی در مورد انتقال حرارت و افت فشار جریان در میکروکانال‌ها به دست نیامده و نیاز است تا بررسی‌های منسجمی برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف صورت گیرد. آن‌ها یکی از عوامل ایجاد اختلاف در نتایج موجود را تفاوت زبری سطح در میکروکانال‌های مختلف اعلام نمودند.

چین و هاونگ [۳] عملکرد چاه گرمایی 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 چاه گرمایی میکروکانالی را در مقایسه با به کار بردن آب خالص به عنوان خنک‌کننده افزایش دهند.

چین و چن [۴] اثر نحوه قرار گرفتن ورود و خروج جریان سیال معمولی 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، بگونه‌ای که ابعاد هندسه برای هر شش آرایش یکسان ولی محل ورود و خروج جریان در آن‌ها متفاوت بود. آن‌ها نشان دادند که برای آرایش‌های I، N، D و S که در آن‌ها به صورت افقی وارد چاه گرمایی می‌شد نابرابری توزیع سرعت در میکروکانال‌ها از آرایش‌های V و U که سیال به صورت عمودی وارد چاه گرمایی می‌شد، بیشتر بود. همچنین نشان

با گسترش علم و فناوری، بشر به این واقعیت پی برد که با کاهش اندازه دستگاه‌ها، مزایایی حاصل می‌شود که در اندازه‌های معمولی وجود ندارد. این مزایا شامل اندازه‌های فشرده، دسترسی و حمل و نقل آسان و افزایش کارایی می‌شود. به همین دلیل در سال‌های اخیر بسیاری از محققان به جریان در مقیاس میکرو علاقمند شده و تلاش‌های زیادی برای کوچک کردن ابعاد تجهیزات و بهینه‌سازی آن‌ها انجام داده‌اند. میکروکانال‌ها به عنوان مبدل گرمایی تأثیر بسیاری در خنک‌کاری تجهیزات الکترونیک از جمله ریزتراشه‌ها دارند.

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

سبحان و گالیلا [۲] به تحلیل نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی جریان و انتقال حرارت در میکروکانال‌ها و مینی‌کانال‌ها با سطح مقطع‌های مختلف از قبیل دایره، مثلث و مستطیل و شرایط مختلف از نظر نوع سیال کاری و جنس بستر میکروکانال پرداختند. در نهایت، با توجه به عدم

روش شبکه بولتزمن برای حل مسئله استفاده نموده و نشان دادند با افزایش قطر نانوذرات عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش کسر حجمی نانوذرات بیشتر می‌شود.

خراسانی‌زاده و سپهرنیا [۱۲] در یک مطالعه عددی، اثر چهار آرایش مختلف ورود/خروج جریان را بر خنک‌کاری یک تراشه الکترونیکی با استفاده از چاه‌گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای متخلخل به صورت سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند استفاده از محیط متخلخل در کاهش دمای تراشه مؤثر است و آرایش D، که ورودی آن از دیوار شرقی و خروجی از دیوار غربی بود، عملکرد حرارتی بهتری نشان داد. در یک مطالعه دیگر خراسانی‌زاده و همکاران [۱۳] عملکرد یک چاه‌گرمایی شامل هفت میکروکانال با مقطع مثلث متساوی‌الساقین را به صورت عددی و سه‌بعدی بررسی نمودند. آن‌ها دو آرایش ورود و خروج افقی (آرایش I) و ورود و خروج عمودی (آرایش U) را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند عملکرد حرارتی چاه‌گرمایی علاوه بر آرایش ورود و خروج به شکل و هندسه میکروکانال‌ها وابسته است و برای چاه‌گرمایی مورد مطالعه آرایش I عملکرد بهتری نسبت به آرایش U نشان داد. خراسانی‌زاده و همکاران [۱۴] در یک مطالعه عددی دیگر بر روی چاه‌گرمایی مستطیلی با میکروکانال‌های مثلثی، در چهار آرایش مختلف، نشان دادند استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه (آب) عدد ناسلت متوسط را تا ۵/۴۷٪ افزایش و مقاومت حرارتی و نسبت پیشینه اختلاف کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی را به ترتیب تا ۲/۳۴٪ و ۱/۵۶٪ کاهش می‌دهد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد آرایش I با ورود/خروج مستقیم نسبت به سه آرایش دیگر، که همگی دارای ورود و خروج افقی بودند، برتری قابل توجهی داشت.

قاسمی و همکاران [۱۵] به بررسی انتقال حرارت توأمان در جریان سه‌بعدی و آرام نانوسیال آب-آلومینا در یک چاه‌گرمایی با میکروکانال مثلثی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش کسر حجمی نانوذرات موجب افزایش ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک می‌شود در حالی که مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد.

کمیته‌سازی تولید آنتروپی روشی برای رفع نواقص ترمودینامیکی و کاهش بازگشت‌ناپذیری‌های مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت است. به همین دلایل تحلیل تولید آنتروپی و کمیته‌سازی آن در سیستم‌های گرمایی برای به حساب آوردن بازگشت‌ناپذیری‌ها اهمیت می‌یابد [۱۶] و [۱۷]. بازگشت‌ناپذیری‌های ناشی از اصطکاک، اختلاط، فرایندهای شیمیایی، انتقال گرما، انبساط و تراکم باعث تولید آنتروپی می‌شوند. تولید آنتروپی باعث نابودی انرژی می‌شود و اگر رژی نابود شده با آنتروپی تولید شده متناسب است. مطابق علم ترمودینامیک، اگر رژی یک سیستم پیشینه‌ی کار مفید ممکن طی یک فرایندی است که طی آن سیستم به تعادل با یک منبع گرمایی دما ثابت (مثلاً محیط) برسد [۱۶]. از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک فرایند بازگشت‌ناپذیری که موجب تولید آنتروپی می‌شود باعث تنزل عملکرد سیستم ترمودینامیکی با هدف انجام کار یا انتقال حرارت می‌شود.

دادند که 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 در مقایسه با کانال‌های با دیوار موازی ولی با ارتفاع باریک شونده دارای توزیع دمای پایین‌تر و یکنواخت‌تر بود.

سیف و نیک‌آیین [۶] اثرات اندازه ذرات و حرکت براونی روی عملکرد حرارتی یک چاه‌گرمایی میکروکانالی مستطیلی شکل را با استفاده از نانوذرات آلومینا، اکسید زینک و اکسیدمس پراکنده شده در سیال پایه اتیلن‌گلیکول-آب به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که برای کسر حجمی ۶ درصد و قطر ۲۹ نانومتر برای ذرات آلومینا، رسانایی نانوسیال بدون در نظر گرفتن حرکت براونی حدود ۶/۵ درصد کاهش پیدا می‌کند.

وینودهان و راجان [۷] عملکرد یک چاه‌گرمایی میکروکانالی با میکروکانال‌های مستطیلی را با در نظر گرفتن آب به عنوان سیال خنک‌کننده به صورت عددی و سه‌بعدی بررسی نمودند. آن‌ها چهار آرایش A، B، C و D را به عنوان چهار آرایش جدید در نظر گرفتند. این آرایش‌ها هر کدام دارای چهار ورودی و چهار خروجی با و بدون نواحی توزیع و جمع‌آوری بزرگ‌تر از خود درجه‌های ورودی و خروجی بودند. آن‌ها نتایج به‌دست آمده برای چهار نوع آرایش مذکور را با چاه‌گرمایی آرایش نوع I به عنوان آرایش مرسوم مقایسه نمودند و نشان دادند در یک شارحرارتی ثابت، چهار آرایش بررسی شده از نظر مقاومت حرارتی و عدد ناسلت نسبت به آرایش مرسوم دارای برتری هستند.

فانی و همکاران [۸] جابه‌جایی اجباری آرام نانوسیال آب-اکسید مس را در یک چاه‌گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای با در نظر گرفتن حرکت براونی با استفاده از روش دو فازی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که پخش براونی با افزایش دما و کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد، ولی با افزایش قطر نانوذرات کاهش می‌یابد.

دوریودهان و همکاران [۹] جریان مایع تک فاز را در میکروکانال‌های دوزنقه‌ای همگرا و واگرا به صورت عددی و تجربی بررسی نمودند. در بررسی عددی همگرایی و واگرایی در جهت جریان سیال و به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد میکروکانال‌های همگرا-واگرا عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری نسبت به میکروکانال‌های با سطح مقطع ثابت دارند. دهقان و همکاران [۱۰] جریان سیال و انتقال حرارت را در چاه‌های گرمایی میکروکانالی مستطیلی همگرا با استفاده از روش حجم محدود در رژیم جریان آرام بررسی نمودند. نتایج آن‌ها برای چهار حالت مختلف از نظر سرعت همگرایی میکروکانال نشان داد که با افزایش سرعت باریک شدن عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

کلتنه و علی‌پور [۱۱] به بررسی اثر لغزش سرعت و پرش دما بر انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا در یک میکروکانال دوبعدی پرداختند. آن‌ها از

از هندسه دوزنقه‌ای در صنعت ریخته‌گری و خنک‌کاری تراشه‌های الکترونیکی که در یک فضای ناخواسته به شکل دوزنقه قرار می‌گیرند استفاده می‌شود. از آنجایی که مطالعه عملکرد حرارتی و تولید آنتروپی ناشی از جریان و انتقال حرارت نانوسیال در چاه گرمایی دوزنقه‌ای با آرایش‌های مختلف ورود و خروج تاکنون انجام نشده‌است، در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود. بدین منظور علاوه بر سه مشخصه رایج در تحقیقات پیشین، از آنتروپی تولیدی نیز به عنوان معیاری جدید برای تحلیل عملکرد چاه گرمایی استفاده می‌شود. چاه گرمایی شامل ۵ میکروکانال دوزنقه‌ای متساوی الساقین است و در دو نوع از آرایش‌ها ورودی و خروجی در راستای طول میکروکانال‌ها از مرکز یا کناره ناحیه توزیع‌کننده و جمع‌کننده و در دو آرایش دیگر ورودی و خروجی از جنبین این نواحی انجام می‌شود. بر خلاف کاستی اکثر تحقیقات قبلی از نظر میدان حل و شامل نشدن بخش جامد چاه گرمایی، در این تحقیق کل دامنه حل (بخش جامد چاه و محل عبور سیال یا نانوسیال) به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌شود تا نتایج دقیق‌تری حاصل شود. همچنین خواص نانوسیال آب-آلومینا وابسته به دما منظور و حرکت براونی نانوذرات لحاظ می‌شود.

۲- هندسه مسئله

چاه گرمایی با هندسه کلی دوزنقه‌ای و دارای پنج میکروکانال دوزنقه‌ای با چهار آرایش مختلف ورودی/خروجی در نظر گرفته شده است. طرحواره آرایش A که آرایش متداول چاه‌های گرمایی میکروکانالی است، و از نظر ورودی و خروجی از نوع مستقیم است، در شکل ۱ نشان داده شده است. برای بررسی اثر نوع و نحوه ورودی و خروجی بر جریان و انتقال حرارت سه آرایش دیگر، که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند، نیز لحاظ شده‌اند. تمام ابعاد هندسی آرایش‌های A، B، C و D همانند هندسه نشان داده شده در شکل ۱ برای آرایش A است و فقط نحوه قرار گرفتن ورودی و خروجی آن‌ها متفاوت است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مقطع هر میکروکانال دوزنقه‌ای دارای ابعاد $W_{s, ch} = 100 \mu m$ ، $W_{b, ch} = 200 \mu m$ ، $L_{ch} = 10 \text{ mm}$ و $H_{ch} = 300 \mu m$ است. تراشه الکترونیکی که تولیدکننده حرارت است در تماس مستقیم با کف چاه گرمایی است. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است ابعاد همه پره‌ها و میکروکانال‌ها یکسان است و پنج میکروکانال چاه گرمایی همه از سمت چپ و راست با پره‌های هم‌اندازه احاطه شده‌اند. همچنین به منظور راحتی انجام بحث آن‌ها از چپ به راست شماره‌گذاری شده‌اند. جنس پره‌ها و قسمت جامد چاه گرمایی، سیلیکون است و از نانوسیال آب-آلومینا به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود.

۳- فرضیات مسئله، معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای حل معادلات مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۱- جریان سیال و انتقال حرارت سه بعدی و پایا می‌باشد.

به منظور بررسی مشخصه‌های تولید آنتروپی محلی و پیدا کردن شرایطی که تحت آن آنتروپی به حداقل برسد عباسی [۱۸] تولید آنتروپی را در یک چاه گرمایی متخلخل بررسی نمود. او نشان داد که نرخ تولید آنتروپی داخل چاه گرمایی میکروکانالی تابعی از نسبت منظری کانال، نسبت هدایت حرارتی و تخلخل است و برای کاربردهای معمول تابع ضعیفی از عدد پکلت است. سینگ و همکاران [۱۹] تولید آنتروپی ناشی از جریان و انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال آب-آلومینا و آب به عنوان سیال پایه را در میکروکانال، مینی کانال و کانال با سطح مقطع دایره بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از نانوسیال در مقایسه با سیال پایه باعث تولید آنتروپی بیشتری می‌شود و با افزایش کسر حجمی نانوذرات این افزایش بیشتر می‌شود. جو و همکاران [۲۰] اثر تلفات لزجت را روی عملکرد ترمودینامیکی میکروکانال‌های مربعی منحنی‌الشکل در جریان آرام به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها از آنیلین و اتیلن گلیکول به عنوان سیال کاری استفاده نمودند و نشان دادند که تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت و اصطکاک تحت تأثیر تلفات لزجت برای سیالی که گرم می‌شود افزایش می‌یابد، در حالی که برای سیالی که خنک می‌شود کاهش می‌یابد.

ماه و همکاران [۲۱] اثر تلفات لزجت را بر تولید آنتروپی در جابه‌جایی اجباری کاملاً توسعه یافته آرام نانوسیال آب-آلومینا در میکروکانال‌های دایره‌ای به صورت تحلیلی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند هنگامی که تلفات لزجت لحاظ می‌شود توزیع دما آشکارا تحت تأثیر قرار می‌گیرد و به تبع آن تولید آنتروپی مربوط به برگشت‌ناپذیری انتقال حرارت افزایش می‌یابد. سوهل و همکاران [۲۲] تولید آنتروپی در میکروکانال و مینی کانال را با استفاده از نانوسیالات مختلف بصورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها از مس و آلومینا به عنوان نانوذرات و از آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه استفاده نمودند و نشان دادند که تولید آنتروپی با افزایش کسر حجمی هر دو نوع نانوذره، پراکنده شده داخل آب و یا اتیلن گلیکول، کاهش یافت. پورمحمود و همکاران [۲۳] جریان سیال، انتقال حرارت و تولید آنتروپی را داخل یک میکروکانال دارای مانع به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها اثر سه پارامتر مختلف عدد رینولدز، شار حرارتی و ارتفاع مانع را بر تولید آنتروپی بررسی کردند. آن‌ها بر اساس قانون اول نشان دادند که ارتفاع مانع اثر بزرگی روی میدان جریان و انتقال حرارت دارد. همچنین تحلیل قانون دوم نشان داد که برای هر عدد رینولدز و شار حرارتی با افزایش ارتفاع مانع برگشت‌ناپذیری اصطکاکی افزایش می‌یابد و فقط یک ارتفاع وجود دارد که کم‌ترین برگشت‌ناپذیری انتقال حرارت را موجب می‌شود.

لئونگ و اونگ [۲۴] تولید آنتروپی جریان نانوسیال را در میکروکانال با سطح مقطع‌های دایره، مربع و مثلث متساوی الاضلاع بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تولید آنتروپی کل نانوسیال آب-آلومینا با افزایش کسر حجمی نانوذره کاهش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند از نظر شکل سطح مقطع، کانال دایره‌ای کمترین تولید آنتروپی کل را در مقایسه با شکل‌های دیگر موجب می‌شود.

۲- جریان سیال آرام و تک فاز است.

۳- خواص ترموفیزیکی سیال و قسمت جامد چاه گرمایی وابسته به دما است.

۴- تمام سطوح چاه گرمایی شامل دیواره‌های جانبی و دیواره بالایی (سطح بالایی محل عبور نانوسیال و سطح بالایی قسمت جامد) که با محیط اطراف در تماس هستند عایق در نظر گرفته می‌شود.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{eff}uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{eff}vu) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{eff}wu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{eff}\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{eff}\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{eff}\frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{eff}uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{eff}vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{eff}wv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{eff}\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{eff}\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{eff}\frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{eff}uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{eff}vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{eff}ww) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{eff}\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{eff}\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{eff}\frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{eff}uT) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{eff}vT) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{eff}wT) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k_{eff}}{c_{p,eff}}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k_{eff}}{c_{p,eff}}\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k_{eff}}{c_{p,eff}}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_s\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_s\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_s\frac{\partial T}{\partial z}\right) = 0 \quad (6)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال شامل چگالی و گرمای ویژه از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۱ و ۲۵]:

$$\rho_{eff} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (7)$$

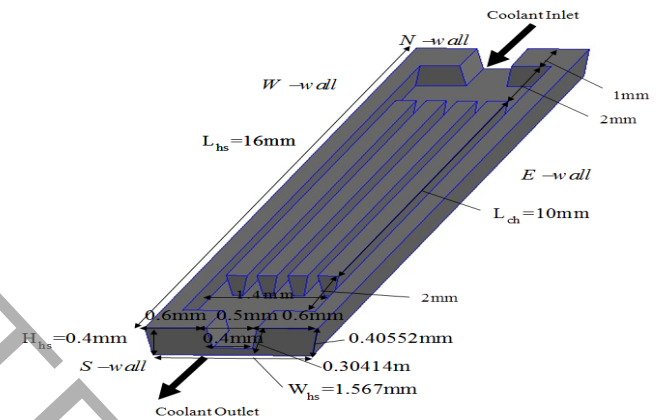
$$(\rho c_p)_{eff} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (8)$$

رسانایی و لزجت مؤثر نانوسیال شامل دو بخش استاتیکی و براونی هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۶]:

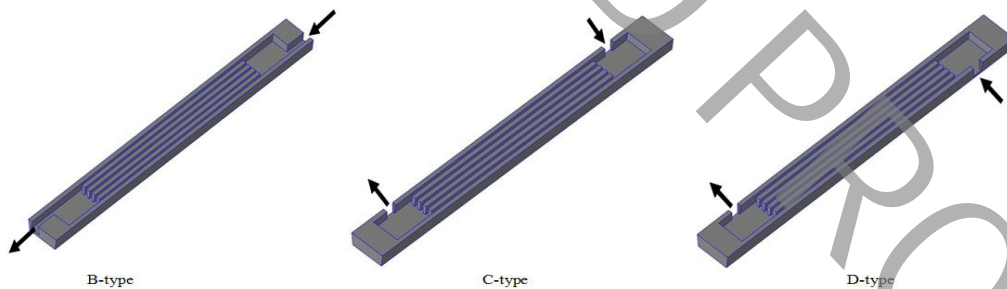
$$k_{eff} = k_{static} + k_{Brownian} \quad (9)$$

$$k_{static} = k_f \left[\frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (10)$$

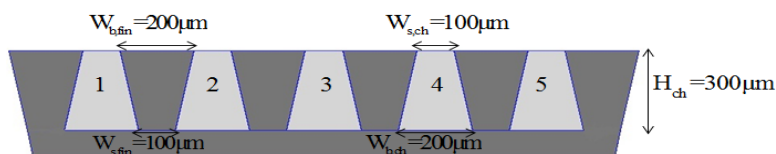
$$k_{brownian} = 5 \times 10^4 \phi \rho_f c_{p,f} \sqrt{\frac{\kappa_B T}{d_p \rho_p}} g(T, \phi) \quad (11)$$



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



شکل ۲: نحوه ورود و خروج جریان در آرایش‌های نوع B، C و D



شکل ۳: ابعاد میکروکانال‌ها و پرده‌ها

جدول ۱: مقدار ضرایب در رابطه (۱۵) برای نانوسیالات آب-آلومینا [۲۷]

مقادیر	ضرایب	مقادیر	ضرایب
-۲۹۸/۱۹۸۱۹۰۸۴	m	۵۲/۸۱۳۴۸۸۷۵۹	a
-۳۴/۵۳۲۷۱۶۹۰۶	h	۶/۱۱۵۶۳۷۲۹۵	b
-۳/۹۲۲۵۲۸۹۲۸۳	i	۰/۶۹۵۵۷۴۵۰۸	c
-۰/۲۳۵۴۳۲۹۶۲۶	j	۰/۴۱۷۴۵۵۵۵۲۷۸	d
-۰/۹۹۹۰۶۳۴۸۱	k	۰/۱۷۶۹۱۹۳۰۰۲۴۱	e

جدول ۲: خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات آلومینا در دمای ۳۰۰ K [۲۷]

ماده	ρ (kg m ⁻³)	cp (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	k_f (W m ⁻¹ K ⁻¹)
آب	۹۹۷	۴۱۷۹	۶۱۳/۰
آلومینا	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰

$$k_{\text{Silicon}} = 290 - 0.4T \quad (20)$$

شرایط مرزی وابسته به شرایط کاری چاه گرمایی و عبارتند از:
در ورودی جریان:

$$P = P_{\text{in}}, T = T_{\text{in}} = 300 \text{ K} \quad (21)$$

در خروجی جریان:

$$P = P_{\text{out}} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (22)$$

برای سطوح مشترک جامد-سیال:

$$\vec{V} = 0, T_s = T_f, -k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \quad (23)$$

برای کف چاه گرمایی:

$$q_w = -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \quad (24)$$

P_{in} و T_{in} در رابطه (۲۱) به ترتیب فشار و دمای ورودی سیال و P_{out} و n در روابط (۲۲) و (۲۳) به ترتیب معرف فشار خروجی سیال و جهت عمود دیوار یا سطح خروجی هستند. از آنجایی که مدل استفاده شده برای خواص نانوسیال در محدوده دمایی بین ۳۰۰ تا ۳۲۵ کلوین قابل استفاده است، در انتخاب مقدار شار اعمالی به کف چاه گرمایی محدودیت وجود داشته است.

۴- شاخص‌های عملکرد

در تحقیقات پیشین حداکثر از سه شاخص عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شارحرارتی برای بررسی عملکرد چاه گرمایی غیرمتخلخل استفاده شده است [۴ و ۷ و ۱۲ و ۱۴]. در این تحقیق تحلیل تولید آنتروپی نیز در چاه گرمایی انجام می‌شود و از آن به عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد چاه گرمایی استفاده می‌شود. تمام شاخص‌ها در بخش‌های بعدی توضیح داده شده‌اند.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{static}} + \mu_{\text{Brownian}} \quad (12)$$

$$\mu_{\text{static}} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (13)$$

$$\mu_{\text{Brownian}} = 5 \times 10^4 \phi \rho_f \sqrt{\frac{\kappa_B T}{d_p \rho_p}} g(T, \phi) \quad (14)$$

κ_B ثابت بولتزمن است که برابر $1/38.07 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ است. تابع g برای نانوسیال آب-آلومینا به صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$g = \left(a + b \ln(d_p) + c \ln(\phi) + d \ln(\phi) \ln(d_p) + e \ln(d_p)^2 \right) \ln(T) + \left(m + h \ln(d_p) + i \ln(\phi) + j \ln(\phi) \ln(d_p) + k \ln(d_p)^2 \right) \quad (15)$$

مقادیر ضرایب معادله (۱۵) در جدول ۱ نشان داده شده است. تابع g برای نانوسیال آب-آلومینا از ۲R برابر ۹۶٪ برخوردار است، که نشان دهنده تطابق مناسب پیش‌بینی‌های آن با داده‌های تجربی است [۲۷]. خواص ترموفیزیکی نانوذرات آلومینا و سیال پایه آب در جدول ۲ ارائه شده‌اند. برای خواص ترموفیزیکی آب با استفاده از اطلاعات جداول ترمودینامیکی در محدوده دمایی ۳۰۰-۳۲۵ K روابط (۱۶) تا (۱۹) با استفاده از نرم افزار متلب به صورت تابعی از دما توسعه داده شده‌اند:

$$k_f = 0.3424 \exp(0.00195T) - 0.00163 \quad (16)$$

$$\mu_f = 57.83 \exp(-0.04053T) + 0.01473 \exp(-0.01095T) \quad (17)$$

$$\rho_f = 1130 \exp(-0.0004173T) \quad (18)$$

$$c_{p,f} = 6.747 \times 10^8 \exp(-0.05862T) + 3989 \exp(0.0001428T) \quad (19)$$

همچنین برای محاسبه ضریب رسانایی سیلیکون در بخش جامد از رابطه (۲۰) استفاده می‌شود که در آن دما بر حسب کلوین می‌باشد:

۴-۱- عدد ناسلت متوسط

عدد بدون بعد ناسلت متوسط به عنوان یکی از شاخص‌های عملکرد حرارتی چاه‌گرمایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Nu = \frac{\bar{h}D_h}{k_f} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط روی مرز جامد و سیال است و با استفاده از قانون سرمایه‌ش نیوتن متوسط شار حرارتی عبارت است از:

$$\bar{q} = \bar{h}(T_{\text{surface,avg}} - T_{f,\text{avg}}) \quad (26)$$

\bar{q} ، $T_{f,\text{avg}}$ و $T_{\text{surface,avg}}$ در رابطه (۲۶) به ترتیب متوسط شار حرارتی خروجی از مرزهای بین جامد و سیال، دمای متوسط اولین المان سیال چسبیده به مرز جامد و سیال است. سه پارامتر مذکور به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{q} = \frac{\int q dA}{A} \quad (27)$$

$$T_{\text{surface,avg}} = \frac{\int T_{\text{surface}} dA}{A} \quad (28)$$

$$T_{f,\text{avg}} = \frac{\int T_f dA}{A} \quad (29)$$

لازم به ذکر است که به دلیل وجود مرزهای متعدد بین جامد و سیال که هر کدام مساحت، دما و شار عبوری متفاوتی دارند انتگرال‌های روابط (۲۷) تا (۲۹) برای کلیه این سطوح محاسبه شده‌اند و A در مخرج این روابط اشاره به سطح کل مرزهای بین جامد و سیال در کل چاه‌گرمایی دارد. بنابراین عدد ناسلت متوسط از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Nu = \frac{\bar{q}D_h}{k_f(T_{\text{surface,avg}} - T_{f,\text{avg}})} \quad (30)$$

D_h در رابطه (۳۰) قطر هیدرولیکی میکروکانال است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (31)$$

A مساحت مقطع میکروکانال و P محیط ترشده است.

۴-۲- مقاومت حرارتی

مقاومت حرارتی به عنوان دیگر شاخص عملکرد حرارتی از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$R_{th} = \frac{T_{w,\text{max}} - T_{in}}{q_w W_{hs} L_{hs}} \quad (32)$$

در رابطه (۳۲) بیشترین دمای کف چاه‌گرمایی است.

۴-۳- نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی

یکی از اهداف اصلی طراحی ساختارهای جدید برای چاه‌های گرمایی میکروکانالی، کاهش دمای کف چاه‌گرمایی است. یک بستر با خنک‌کاری یکنواخت دارای تفاوت حداکثر و حداقل دمای کمتری خواهد بود. نسبت اختلاف حداکثر و حداقل دمای کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی θ نامیده می‌شود و عبارت است از [۷]:

$$\theta = \frac{T_{b,\text{max}} - T_{b,\text{min}}}{q_w} \quad (33)$$

از θ به عنوان معیاری برای سنجش میزان یکنواختی دمای کف چاه‌گرمایی استفاده می‌شود و هرچه θ بزرگ‌تر باشد توزیع دما غیر یکنواخت‌تر است.

۴-۴- آنتروپی تولیدی

قوانین ترمودینامیک نشان می‌دهد که انتقال گرما و جریان سیال درون سیستم باعث بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی شده و تولید آنتروپی می‌نماید. تولید آنتروپی معیاری برای سنجش میزان بازگشت‌ناپذیری بوده و می‌تواند برای ارزیابی عملکرد فرایندهای ترمودینامیکی و سیستم‌های حرارتی استفاده شود. در تحقیق حاضر آنتروپی تولیدی کل از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$S = \frac{k_{\text{eff}}}{T_f^2} \left[\left(\frac{\partial T_f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{k_s}{T_s^2} \left[\left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\mu_{\text{eff}}}{T_f^2} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (34)$$

آنتروپی تولیدی کل شامل آنتروپی تولیدی حرارتی سیال، آنتروپی تولیدی حرارتی جامد و آنتروپی تولیدی اصطکاکی است که به ترتیب عبارتند از:

$$S_{h,\text{fluid}} = \frac{k_{\text{eff}}}{T_f^2} \left[\left(\frac{\partial T_f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (35)$$

$$S_{h,\text{solid}} = \frac{k_s}{T_s^2} \left[\left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (36)$$

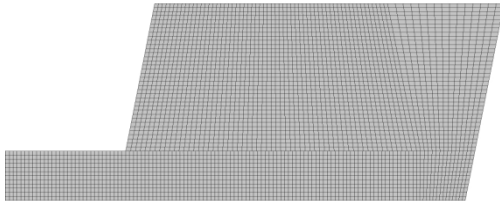
$$S_f = \frac{\mu_{\text{eff}}}{T_f^2} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (37)$$

۵- روش حل عددی، استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی

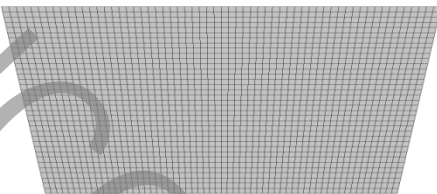
در این بخش ابتدا نوع شبکه‌بندی معرفی و سپس استقلال نتایج از شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه به منظور اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، نتایج به دست آمده برای

جدول ۳: حرارت جذب شده توسط سیال و حرارت اعمال شده به چاه گرمایی و اختلاف نسبی آنها

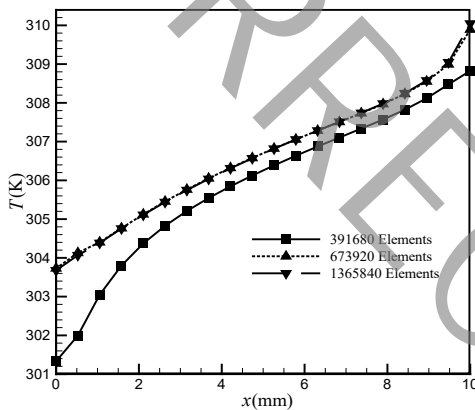
نوع آرایش	تعداد نقاط شبکه	Q_{flow}	$\left \frac{Q_{flow} - q_w W_{hs} L_{hs}}{q_w W_{hs} L_{hs}} \right \times 100$
A	۶۷۳۹۲۰	۴/۷۴۱	۵/۴۲
B	۶۲۹۶۴۰	۴/۸۶۰	۳/۰۶
C	۶۳۳۹۶۰	۴/۹۸۵	۰/۵۶
D	۶۳۳۹۶۰	۴/۹۸۴	۰/۵۷



شکل ۴: شبکه ایجاد شده برای بخشی از مقطع قسمت جامد در ابتدای چاه گرمایی



شکل ۵: شبکه ایجاد شده برای مقطع ورودی جریان در ابتدای چاه گرمایی



شکل ۶: تغییر دما بر روی خطی در وسط و کف میکروکانال سوم چاه گرمایی در آرایش A با سه شبکه بندی مختلف برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و شار حرارتی ۲۰۰ کیلووات بر متر مربع

گسسته سازی شده روی هر المان شبکه اعمال شده و سپس میانگین گرفته می شود. بنابراین برای شبکه هایی که المان های قابل قبول بیشتری دارند، جواب دقیق تری به دست می آید. اما در صورتی که تفاوت بین نتایج به دست آمده ناچیز باشد می توان از شبکه ایجاد شده برای شبیه سازی های دیگر هم استفاده نمود. به همین دلیل تمام شبیه سازی ها با استفاده از تعداد نقاط شبکه ذکر شده در جدول ۳ انجام شده اند.

به منظور اعتبارسنجی روش عددی به کار گرفته شده و نتایج به دست آمده، با توجه به فقدان نتایج تجربی برای هندسه دوزنقه ای شبیه سازی برای چاه گرمایی میکروکانالی مستطیلی کار تجربی فیلیپس [۲۸] با ۱۱ میکروکانال مستطیلی برای افت فشار ۵۰ کیلوپاسکال انجام شد. بدین منظور تمام مشخصات هندسی و شرایط مرزی کار تجربی فیلیپس [۲۸]

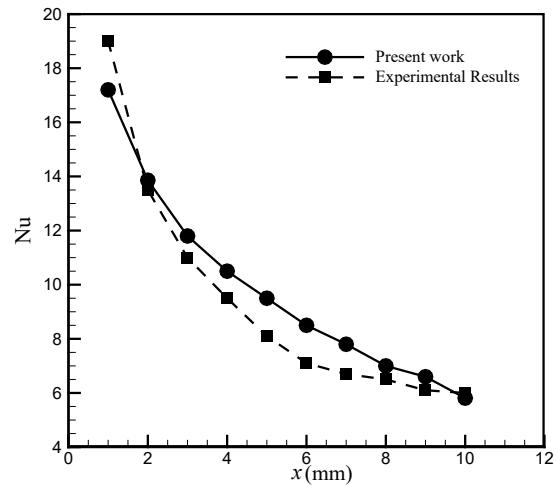
چاه گرمایی میکروکانالی مستطیلی در کار تجربی فیلیپس [۲۸] ارائه و مقایسه می شود. حل معادلات حاکم با کمک روش حجم محدود^۱ و گسسته سازی آن ها با روش بالادست^۲ مرتبه دوم و با استفاده از نرم افزار انسیس-سی اف اکس^۳ انجام شده است. برای حل همزمان میدان سرعت و فشار از الگوریتم کاپلده^۴ استفاده شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی ۶-۱۰ در نظر گرفته شده است.

در شکل های ۴ و ۵ به ترتیب شبکه بندی استفاده شده در ابتدای چاه گرمایی برای نیمی از مقطع قسمت جامد و مقطع ورودی جریان برای آرایش نوع A نشان داده شده است. به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، تغییرات دما در طول میکروکانال ۳ و دقیقاً در مرکز ضلع پایین آن (مرز جامد و سیال)، برای آرایش A برای سیال آب با افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و شار حرارتی ۲۰۰ کیلووات بر متر مربع برای سه نوع شبکه بندی به دست آمده و در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد شبکه با تعداد ۶۷۳۹۲۰ المان مناسب است زیرا افزایش تعداد المان ها به دو برابر باعث تغییر قابل ملاحظه دما در هر نقطه نشده است.

به منظور شناسایی آرایش بحرانی با استفاده از تعداد مش تقریباً یکسان شبیه سازی برای سایر آرایش ها تکرار شد. در جدول ۳ اختلاف نسبی بین حرارت اعمال شده به چاه گرمایی و حرارت جذب شده برای ۴ آرایش مورد بررسی به درصد و تعداد نقاط استفاده شده برای هر آرایش نشان داده شده است. از آنجایی که در حالت پایدار اختلاف بین حرارت اعمال شده به چاه گرمایی و حرارت جذب شده صفر است، می توان نتیجه گرفت تفاوتی که دیده می شود ناشی از کیفیت شبکه مورد استفاده است. به عنوان یک نمونه در مطالعه چین و چن [۴] حداکثر این اختلاف نسبی برای آرایش ورودی و خروجی مستقیم و مقدار آن ۵/۴٪ بوده است. همان طور که از جدول ۳ ملاحظه می شود شبکه های انتخاب شده نتایج قابل قبولی تولید نموده و حداکثر اختلاف نسبی ۵/۴٪ و مربوط به آرایش A است و لذا در بین چهار آرایش انتخاب شده از این نظر بحرانی تر است. در روش های عددی، معادلات

- 1 Finite volume
- 2 Upwind
- 3 Ansys CFX
- 4 Coupled

برای نانوسیال آب-آلومینا با قطر ۲۵ نانومتر با کسر حجمی نانوذرات در محدوده صفر تا ۴ درصد برای کلیه آرایش‌ها انجام شده است و در تمامی شبیه‌سازی‌ها شارحرارتی ورودی به کف چاه‌گرمایی ۲۰۰ کیلووات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. در این بخش ابتدا برخی نتایج مربوط به سرعت متوسط جریان در میکروکانال‌ها و توزیع دما در بخش جامد چاه گرمایی برای آرایش‌های مختلف ارائه می‌شوند. سپس به بررسی اثر کسر حجمی و افت فشار بر شاخص‌های عملکردی چاه گرمایی شامل عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی، نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی و آنتروپی تولیدی (اصطکاک، حرارتی و کل) برای آرایش‌های مختلف پرداخته می‌شود.



شکل ۷: عدد ناسلت محلی در طول میکروکانال پنجم به دست آمده برای کار تجربی فیلیپس [۲۸] و فشار ۵۰ کیلوپاسکال

۶-۱- بررسی سرعت متوسط سیال در میکروکانال‌ها

در شکل ۸ سرعت متوسط سیال به عنوان نمونه برای افت فشار ۱۰ کیلوپاسکال در کسرهای حجمی مختلف در میکروکانال‌های چاه‌گرمایی برای هر چهار آرایش نشان داده شده است. با افزایش کسر حجمی، لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد و به طور عمومی موجب کاهش سرعت متوسط جریان در میکروکانال‌ها می‌شود. برای آرایش A با توجه به نحوه ورود جریان به چاه‌گرمایی، میکروکانال شماره ۳ به طور مستقیم در راستای ورود جریان است، بنابراین افت فشار ناشی از جریان در ناحیه پخش‌کننده تا ورودی به میکروکانال شماره ۳ در مقایسه با سایر میکروکانال‌ها کمتر است و لذا حداکثر سرعت در این میکروکانال اتفاق می‌افتد؛ همچنین به علت تقارن نسبت به خط مرکزی توزیع سرعت در میکروکانال‌های چپ و راست متقارن است. در آرایش B حداکثر سرعت در میکروکانال شماره ۴، که در راستای جریان ورودی به چاه‌گرمایی قرار گرفته است، اتفاق می‌افتد. از آن جایی که جریان ورودی در مسیر رسیدن به میکروکانال شماره ۵، به علت هم‌جواری با دیواره جامد چاه‌گرمایی در ناحیه پخش‌کننده، افت فشار بیشتری متحمل می‌شود سرعت متوسط در میکروکانال شماره ۵ نسبت به میکروکانال شماره ۴ کمتر است. برای آرایش‌های C و D، که سیال به ترتیب از دیوارهای غربی و شرقی وارد چاه‌گرمایی می‌شوند، سیال به طور مستقیم به سمت میکروکانال‌های دورتر از ورودی می‌رود و وارد آن‌ها می‌شود. البته بخشی از جریان پس از برخورد با دیواره‌ی روبرویی به سمت میکروکانال‌های نزدیک به ورودی باز می‌گردد و وارد آن‌ها می‌شود. به همین دلایل برای آرایش‌های C و D حداکثر سرعت به ترتیب در میکروکانال‌های شماره ۵ و ۱ اتفاق می‌افتد. برای سایر افت فشارها (۵ و ۱۵ کیلوپاسکال) نیز توزیع سرعت در میکروکانال‌ها مشابه توزیع سرعت برای افت فشار ۱۰ کیلوپاسکال است. همان‌طور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود برای افت فشار ۱۰ کیلوپاسکال سرعت متوسط در میکروکانال‌ها در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۹۵ متر بر ثانیه است، بنابراین و بر اساس قطر هیدرولیکی میکروکانال‌ها عدد رینولدز در محدوده ۱۵۰ تا ۲۲۰ است، که نشان‌دهنده صحت فرض آرام بودن جریان در میکروکانال‌ها است.

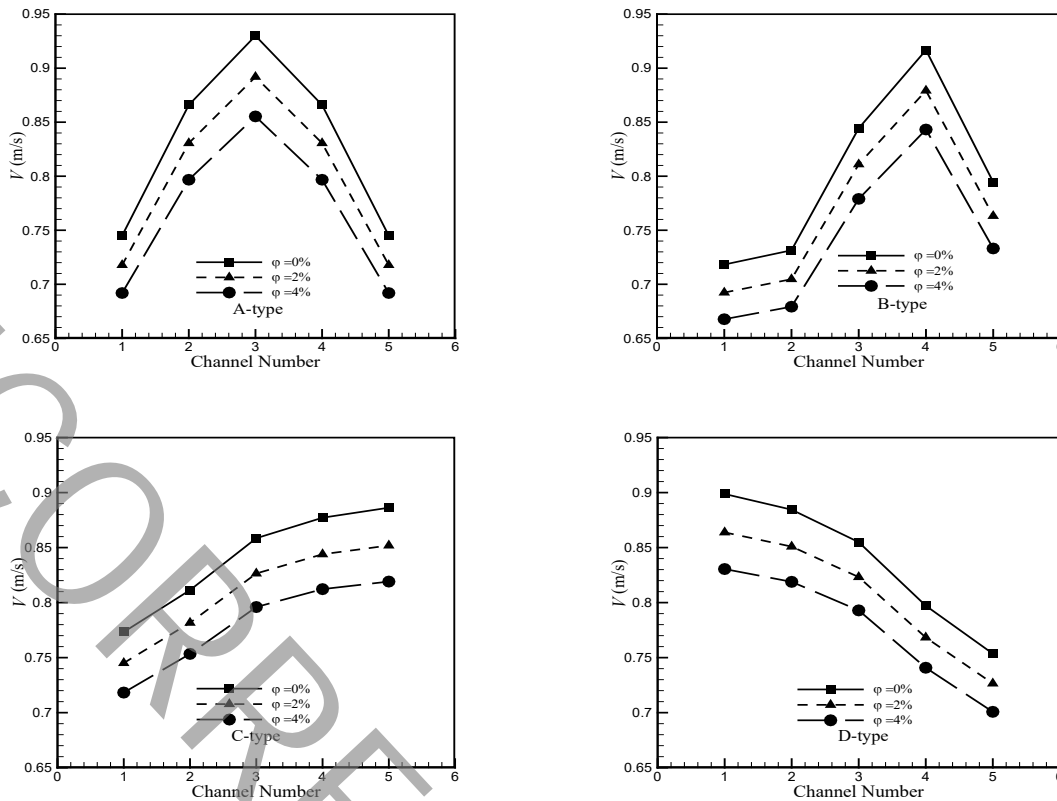
اعمال و شار حرارتی ۱۰۰۰ کیلووات بر متر مربع به کف چاه‌گرمایی اعمال شد. در شکل ۷ مقادیر عدد ناسلت محلی در طول میکروکانال پنجم با نتایج تجربی فیلیپس [۲۸] مقایسه شده‌اند. مقادیر عدد ناسلت محلی به دست آمده و به خصوص روال تغییرات آن مطابقت خوبی با نتایج تجربی فیلیپس نشان می‌دهند، لذا از صحت روش عددی استفاده شده و نتایج تحقیق حاضر اطمینان حاصل می‌شود. همچنین به منظور بازتولید نتایج عددی دیگران و اطمینان از دقت نتایج شبیه‌سازی‌ها، شبیه‌سازی برای چاه‌گرمایی میکروکانالی مستطیلی در مطالعه عددی چین و چن [۴] برای چند افت فشار انجام شد. لازم به ذکر است که هندسه تحقیق عددی چین و چن [۴] همانند هندسه مطالعه تجربی فیلیپس [۲۸] است. نتایج مربوط به عدد ناسلت متوسط برای چند افت فشار، که در جدول ۴ با نتایج عددی چین و چن [۴] مقایسه شده‌اند، مطابقت خوبی نشان می‌دهند و لذا از صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها اطمینان بیشتری حاصل می‌شود.

جدول ۴: عدد ناسلت متوسط به دست آمده برای چاه‌گرمایی میکروکانالی مستطیلی در کار عددی چین و چن [۴] برای سه فشار مختلف ۲۵، ۳۵ و ۵۰ کیلوپاسکال

	$P = 50 \text{ kPa}$	$P = 35 \text{ kPa}$	$P = 25 \text{ kPa}$	
مطالعه حاضر	۹/۶۴	۹/۰۱	۸/۳۵	
چین و چن [۴]	۹/۹	۹/۱۳	۸/۴۵	
اختلاف نسبی به درصد	۲/۶	۱/۳	۱/۱	

۶-۲ بحث و نتایج

شبیه‌سازی‌ها برای اختلاف فشار در محدوده ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال و



شکل ۸: سرعت متوسط سیال در میکروکانال‌های مختلف برای $\Delta P = 10 \text{ kPa}$ و کسر حجمی‌های مختلف

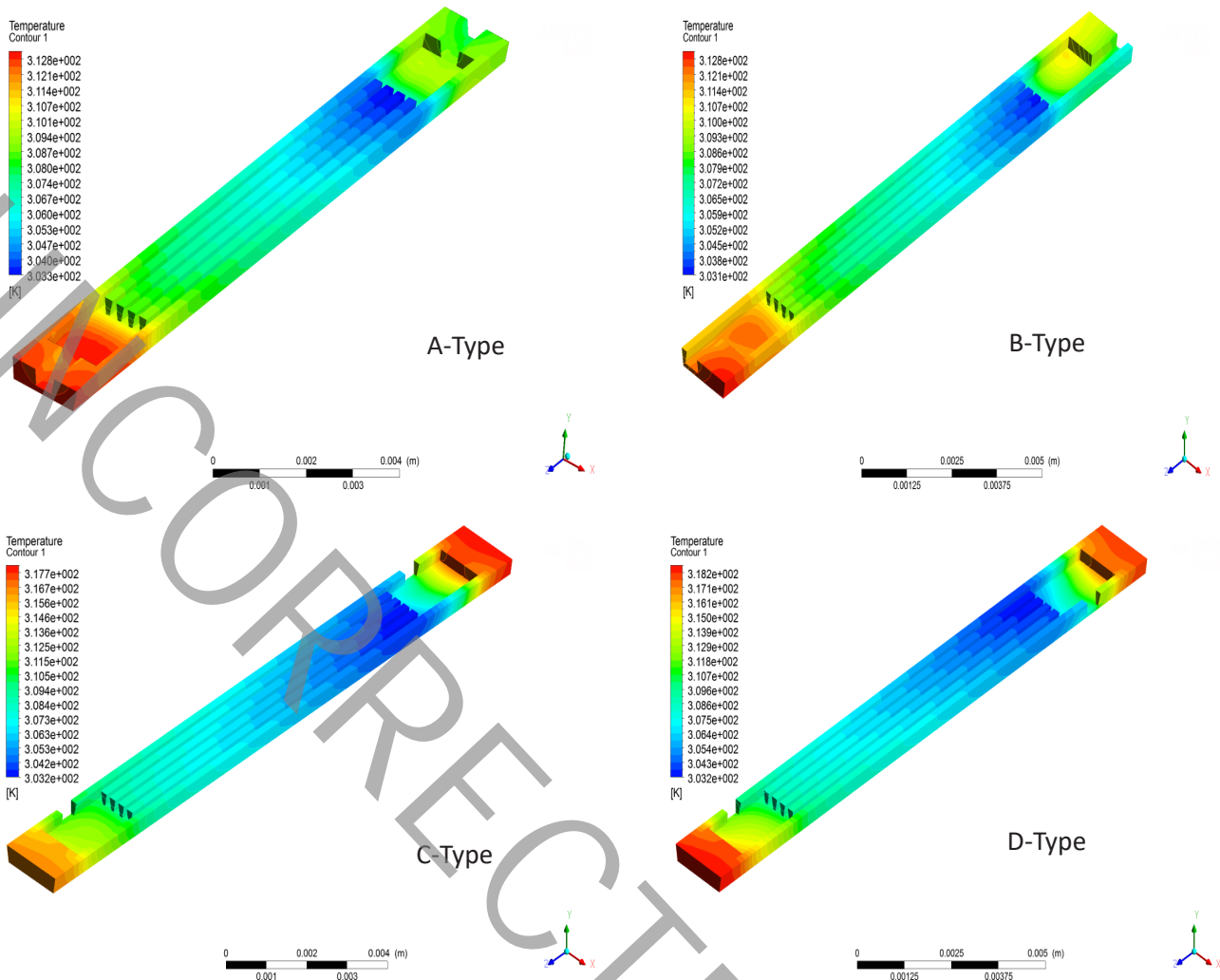
۶-۲- بررسی توزیع دما در بخش جامد چاه‌گرایی

در چاه‌گرایی برای دفع حرارت تولید شده از جابه‌جایی سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود. نحوه توزیع دما برای قسمت سیلیکونی چاه‌گرایی برای چهار نوع آرایش ورود و خروج و جریان آب در فشار ۱۵ کیلوپاسکال در شکل ۹ نشان داده شده است. برای هر ۴ نوع آرایش بررسی شده، مشاهده می‌شود که ناحیه با درجه حرارت بالا در ابتدا یا انتهای قسمت جامد چاه‌گرایی اتفاق می‌افتد، زیرا هیچ گونه دفع حرارت توسط جابه‌جایی سیال در آنجا وجود ندارد. در آرایش‌های A و B به دلیل این که جریان از دیوار شمالی وارد چاه‌گرایی می‌شود ابتدای قسمت جامد در سطح دمایی پایین‌تری نسبت به انتهای قسمت جامد قرار می‌گیرد اما در آرایش‌های C و D هم ابتدا و هم انتهای قسمت جامد سطح دمایی بالاتری نسبت به سایر نقاط جامد چاه‌گرایی دارند. 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. بنابراین با توجه به شکل ۸ که نشانگر سرعت متفاوت در هر میکروکانال می‌باشد، انتظار می‌رود که توزیع دما در قسمت جامد چاه‌گرایی غیر یکنواخت باشد و همان‌طور که چین و چن [۴] نشان دادند این غیریکنواختی به نوع آرایش ورودی و خروجی وابسته است.

۶-۳- بررسی اثر کسر حجمی بر شاخص‌های عملکردی

در شکل ۱۰ تغییرات عدد ناسلت متوسط با کسر حجمی به عنوان نمونه برای فشار ۱۵ کیلوپاسکال نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بیشینه عدد ناسلت به ترتیب برای آرایش‌های A، B، C و D اتفاق افتاده است. در همه آرایش‌ها با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ عدد ناسلت متوسط بین ۱۱/۸۸٪ (آرایش C) تا ۱۲/۰۶٪ (آرایش A) افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از افزایش دمای متوسط سیال و کاهش دمای متوسط جامد است. در یک فشار ثابت با افزایش کسر حجمی، سرعت سیال خنک‌کننده به دلیل افزایش لزجت نانوسیال، کاهش یافته و موجب افزایش دمای متوسط سیال می‌شود. از طرف دیگر با افزایش کسر حجمی، رسانایی نانوسیال افزایش می‌یابد که باعث افزایش انتقال حرارت از جامد به سیال می‌شود و بنابراین دمای متوسط جامد کاهش می‌یابد. لذا کاهش اختلاف دمای متوسط سیال و جامد، که در مخرج رابطه (۳۰) ظاهر می‌شوند، باعث افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود.

از شکل ۱۱، که تغییرات مقاومت حرارتی با کسر حجمی در فشار ۱۵ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد، دیده می‌شود که با افزایش کسر حجمی تغییرات مقاومت حرارتی بسیار جزئی است؛ به طوری که با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ تغییرات مقاومت حرارتی کمتر از ۱٪ است. برای این که بتوان



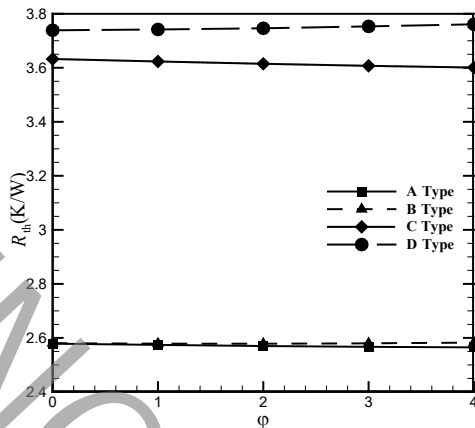
شکل ۹: توزیع دما در بخش سیلیکونی چاه گرمایی برای جریان آب در آرایش‌های مختلف و افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال

سیف و نیک‌آیین [۶] نیز در مطالعه‌ی خود نشان دادند که تغییرات مقاومت حرارتی با کسر حجمی، وابسته به شرایط کاری میکروکانال است. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است کمترین مقاومت حرارتی به ترتیب برای آرایش‌های A، B، C، و D تحقیق حاضر اتفاق افتاده است.

در شکل ۱۲ تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه گرمایی به شار حرارتی با کسر حجمی در فشار ۱۵ کیلوپاسکال نشان داده شده است. با توجه به اینکه مطالبی که پیش‌تر در مورد تغییرات مقاومت حرارتی با کسر حجمی بیان شد، برای نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه گرمایی به شار حرارتی نیز صادق است از تکرار آن‌ها خودداری می‌شود.

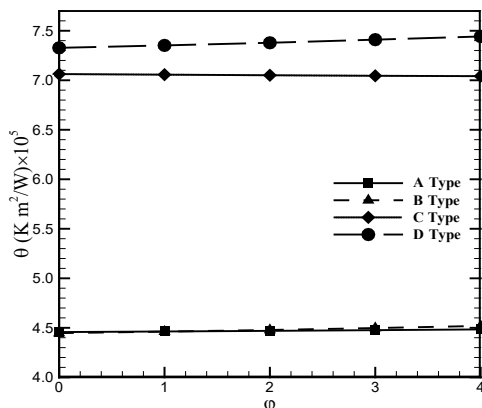
در شکل ۱۳ تولید آنتروپی حرارتی سیال، تولید آنتروپی حرارتی جامد، تولید آنتروپی اصطکاکی و تولید آنتروپی کل بر حسب کسر حجمی در افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال نشان داده شده است. در اکثر سیستم‌های انتقال حرارت تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک سیال در مقایسه با تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت بسیار ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر است. همان‌طور که

دلیل تغییرات جزئی و نامنظم مقاومت حرارتی با کسر حجمی را تحلیل نمود باید به اثرات استفاده از نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت توجه شود. استفاده از نانوذرات دو اثر مخالف یکدیگر بر ضریب انتقال حرارت و مقاومت حرارتی دارد. اثر مطلوب ناشی از افزایش رسانایی با افزایش کسر حجمی نانوذرات و اثر نامطلوب ناشی از افزایش لزجت با افزایش کسر حجمی نانوذرات است. افزایش رسانایی باعث افزایش دمای سیال خنک‌کننده می‌شود. بنابراین طبق قانون سرمایش نیوتون، در یک شار حرارتی ثابت، ضریب انتقال حرارت بین سیال و دیواره‌ها افزایش می‌یابد. با این وجود مقاومت حرارتی به علت افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد، زیرا اختلاف دمایی کمتری بین سیال و دیواره‌های چاه گرمایی حاصل می‌شود. از طرف دیگر با افزایش کسر حجمی لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد که باعث کاهش سرعت می‌شود، که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را کاهش و مقاومت حرارتی را افزایش می‌دهد. لذا با توجه به نوع آرایش و شرایط حاکم بر فیزیک مسئله و همچنین تحت تأثیر تغییر ضریب جابه‌جایی افزایش یا کاهش مقاومت حرارتی اتفاق می‌افتد.

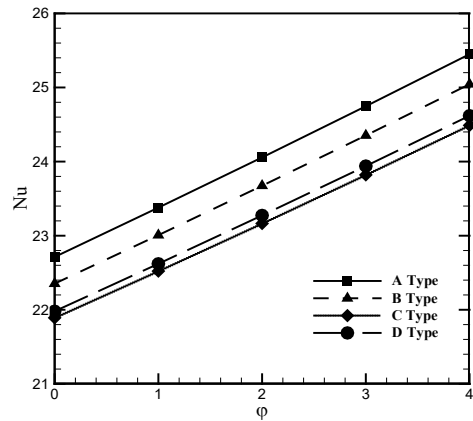


شکل ۱۱: تغییرات مقاومت حرارتی بر حسب کسر حجمی برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و آرایش‌های مختلف ورود/خروج

کاهش دمای متوسط سیال است، اختلاف این دو دما نیز کاهش می‌یابد و لذا طبق رابطه (۳۰) باعث افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد که با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال عدد ناسلت متوسط بین ۱/۷۸٪ (آرایش D) تا ۱/۸۸٪ (آرایش A) افزایش می‌یابد. در شکل ۱۵ تغییرات مقاومت حرارتی با افت فشار برای نانوسیال آب-آلومینا با کسر حجمی ۴ درصد نشان داده شده است. در همه آرایش‌ها با افزایش فشار مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد و بیشینه مقاومت حرارتی به ترتیب برای آرایش‌های B، C، D، A است. با افزایش فشار، سرعت جریان سیال افزایش می‌یابد و در نتیجه بیشینه دمای جامد کاهش می‌یابد، در نتیجه اختلاف دمای ورودی و بیشینه دمای جامد کاهش می‌یابد و لذا مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. بنابراین از آنجایی که با افزایش فشار ورودی دبی جرمی افزایش می‌یابد، در فشار ورودی بالاتر (یا دبی جرمی بالاتر) چاه‌گرایی مقاومت حرارتی کمتری دارد. بر اساس نتایج نشان داده



شکل ۱۲: تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه‌گرایی به شار حرارتی بر حسب کسر حجمی برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و آرایش‌های مختلف ورود/خروج

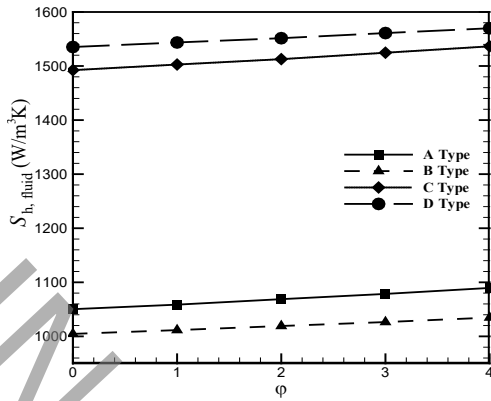


شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و آرایش‌های مختلف ورود/خروج

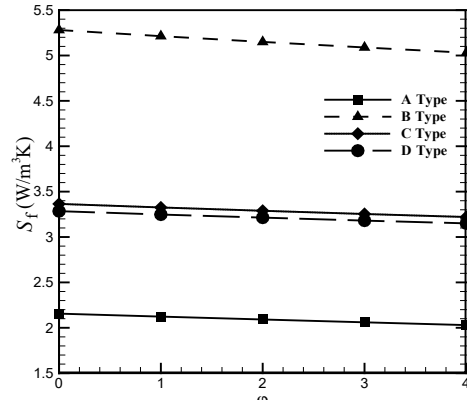
در شکل ۱۳ نشان داده شده است، بیشینه سهم آنتروپی اصطکاکی در حدود ۰/۱ درصد است، ولی با افزایش کسر حجمی به طور عمومی سرعت متوسط نانوسیال کاهش یافته و روند تغییرات آنتروپی اصطکاکی کاهش است به طوری که با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ آنتروپی اصطکاکی بین ۳/۹۶٪ (آرایش D) تا ۶/۰۴٪ (آرایش A) کاهش می‌یابد. با این وجود همان‌طور که از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش کسر حجمی نانوذرات تولید آنتروپی حرارتی بخش سیال و جامد و نیز تولید آنتروپی کل افزایش می‌یابد. مطابق انتظار با افزایش کسر حجمی، گرادیان‌های دما کاهش می‌یابند اما به دلیل افزایش قابل ملاحظه رسانایی مؤثر نانوسیال نسبت به سیال پایه و بهبود شرایط انتقال حرارت و در نتیجه عدد ناسلت متوسط، تولید آنتروپی حرارتی سیال، جامد و کل افزایش می‌یابند. با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ تولید آنتروپی حرارتی سیال بین ۲/۲۶٪ (آرایش D) تا ۳/۷۳٪ (آرایش A) افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ تولید آنتروپی حرارتی جامد کمتر از ۲٪ افزایش می‌یابد. بیشترین و کمترین افزایش تولید آنتروپی کل با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ به ترتیب مربوط به آرایش A با ۲/۳۷٪ و آرایش D با ۱/۷۷٪ است.

۶-۴- بررسی اثر افت فشار بر شاخص‌های عملکردی

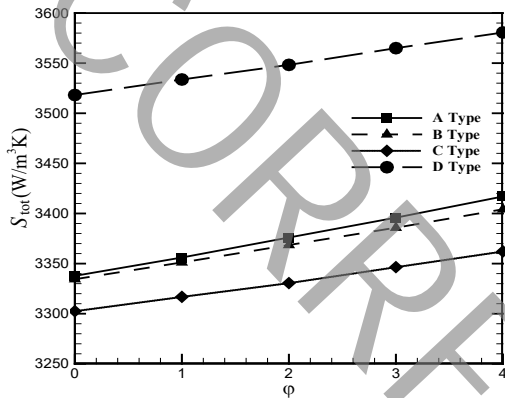
به منظور بررسی مستقل اثر افت فشار بر شاخص‌های عملکردی در شکل ۱۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط با افت فشار برای نانوسیال آب-آلومینا به عنوان نمونه برای کسر حجمی ۴ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک کسر حجمی ثابت با افزایش افت فشار، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. با افزایش افت فشار، دبی جرمی افزایش یافته و موجب افزایش سرعت متوسط جریان سیال خنک‌کننده می‌شود و بنابراین دمای متوسط نانوسیال کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت سیال ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز افزایش یافته و باعث کاهش دمای متوسط جامد می‌شود. از آنجایی که کاهش دمای متوسط جامد بیشتر از



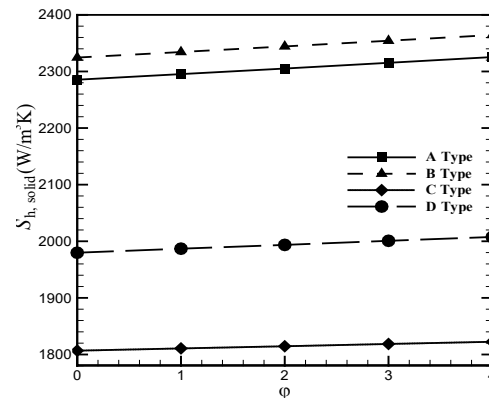
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۳: تغییرات (الف) تولید آنتروپی اصطکاکی (ب) تولید آنتروپی حرارتی سیال (پ) تولید آنتروپی حرارتی جامد (ت) تولید آنتروپی کل با کسر حجمی برای افت فشار ۱۵ کیلوپاسکال و آرایش‌های مختلف ورود/خروج

نانوسیال آب-آلومینا با کسر حجمی ۴ درصد نشان داده شده است. مطابق انتظار با افزایش افت فشار تولید آنتروپی اصطکاکی افزایش می‌یابد، زیرا افت فشار و اصطکاک رابطه مستقیم دارند. همچنین آنتروپی حرارتی در بخش سیال و جامد با افزایش افت فشار کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش افت فشار گرادیان‌های دما کاهش یافته و موجب کاهش تولید آنتروپی حرارتی سیال و جامد می‌شود. از آنجایی که تولید آنتروپی کل متأثر از مجموع تولید آنتروپی حرارتی سیال و جامد است روند تغییرات آن مشابه با روند تغییرات تولید آنتروپی حرارتی سیال و جامد است. با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال آنتروپی تولیدی کل بین ۲۴/۳۴٪ (آرایش B) تا ۲۷/۱۵٪ (آرایش A) کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد از نقطه نظر آنتروپی تولیدی اصطکاکی، آنتروپی تولیدی در بخش سیال و آنتروپی تولیدی در بخش جامد به ترتیب آرایش‌های A، B و C هستند.

۴-۵- تشخیص آرایش بهینه با توجه هم‌زمان به تولید آنتروپی و انتقال حرارت

به عنوان نمونه شاخص‌های عملکردی چاه گرمایی برای کسر حجمی

شده در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که چاه گرمایی نوع A دارای بهترین عملکرد است، در حالی که چاه گرمایی نوع D بدترین عملکرد را دارد. این نتایج با مقادیر عدد ناسلت متوسط نشان داده شده در شکل ۱۴ سازگار است، یعنی چاه گرمایی با کمترین مقاومت حرارتی دارای بهترین عملکرد انتقال حرارتی است. با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال مقاومت حرارتی بین ۳۵/۹۴٪ (آرایش C) تا ۴۰/۴۱٪ (آرایش B) کاهش می‌یابد.

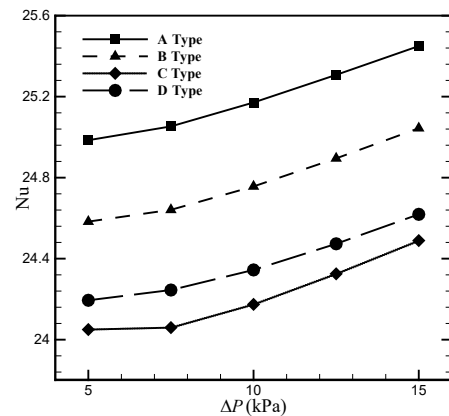
در شکل ۱۶ تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی با افت فشار برای نانوسیال آب-آلومینا با کسر حجمی ۴ درصد نشان داده شده است. با مقایسه نتایج شکل ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود که روند تغییرات مقاومت حرارتی با کسر حجمی به دلایل یکسان کاملاً مشابه روند تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی با افت فشار است. با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی بین ۳۳/۹۰٪ (آرایش C) تا ۴۱/۶۰٪ (آرایش B) کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۷ تولید آنتروپی حرارتی سیال، تولید آنتروپی حرارتی جامد، تولید آنتروپی اصطکاکی و تولید آنتروپی کل بر حسب افت فشار برای

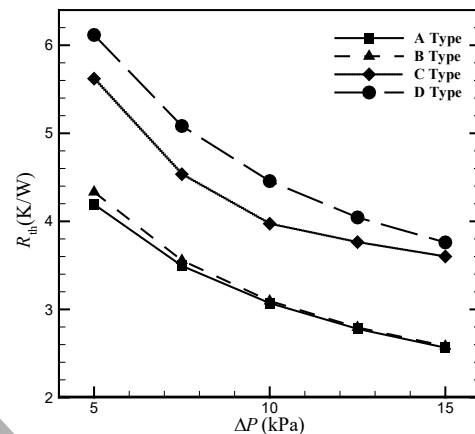
۴ درصد و افت فشارهای مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول پس از آن که با توجه به هر شاخص مورد بررسی بهترین آرایش مشخص شده است، سایر آرایش‌ها با آن مقایسه شده و تفاوت نسبی مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه افت فشارها از نظر عدد ناسلت متوسط به ترتیب آرایش A، B، C و D بهترین عملکرد را دارند؛ همچنین از نظر دو شاخص مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی به ترتیب آرایش‌های A، B، C و D عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. از نظر آنتروپی کل، در افت فشار ۵ کیلوپاسکال آرایش B بهترین عملکرد را دارد و پس از آن به ترتیب آرایش A، C و D عملکرد بهتری دارند؛ در افت فشار ۱۰ و ۱۵ کیلوپاسکال آرایش C بهترین عملکرد را دارد و پس از آن به ترتیب آرایش A، B و D عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به دست آمده و از نظر تمامی شاخص‌ها آرایش D ضعیف‌ترین عملکرد را دارد. از مقایسه دو آرایش A و B برای تمامی افت فشارها مشخص می‌شود از نظر سه شاخص عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی آرایش A همواره بهتر از آرایش B است، اما از لحاظ آنتروپی تولیدی آرایش B در مقایسه با آرایش A همواره عملکرد بهتری دارد. از آنجایی که یکی از مهم‌ترین اهداف طراحی چاه‌گرمایی یکنواخت‌سازی دمایی تراشه الکترونیکی (کف چاه‌گرمایی) است و در این خصوص نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی برای آرایش A همواره بهتر از آرایش B است و توجه به این نکته که آرایش B از لحاظ عملکرد تولید آنتروپی برتری چشمگیری بر آرایش A ندارد، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از آرایش A در مقایسه با آرایش B ارجح است. در مقایسه بین دو آرایش B و C، اگرچه آرایش C در افت فشارهای ۱۰ و ۱۵ کیلوپاسکال از دیدگاه تولید آنتروپی نسبت به آرایش B برتری اندکی دارد (حداکثر ۲/۳ درصد)، برتری آرایش B بر آرایش C از دیدگاه سه شاخص مهم دیگر به خصوص از نظر نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی چشمگیرتر است، بنابراین آرایش B از آرایش C بهتر است. لذا در مجموع و با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به خنک‌کاری تراشه الکترونیکی به ترتیب آرایش‌های A، B، C و D بهترین عملکرد را دارند.

۷- نتیجه‌گیری

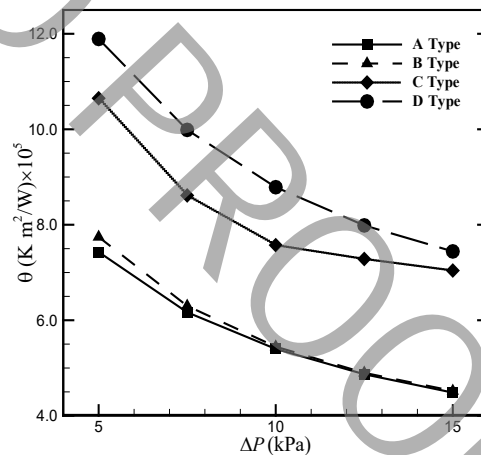
در این تحقیق عددی اثر چهار آرایش مختلف از نظر ورود و خروج جریان، برای چاه‌گرمایی میکروکانالی، با هندسه کلی ذوزنقه‌ای و شامل پنج میکروکانال ذوزنقه‌ای متساوی‌الساقین، بر شاخص‌های حرارتی و تولید آنتروپی نانوسیال آب-آلومینا به صورت سه‌بعدی بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها برای اختلاف فشار در محدوده ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال و برای نانوسیال آب-آلومینا با قطر ۲۵ نانومتر با کسر حجمی نانوذرات در محدوده ۰ تا ۴ درصد با اعمال شار حرارتی ۲۰۰ کیلووات بر متر مربع ورودی به کف چاه‌گرمایی انجام شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده وابستگی خواص



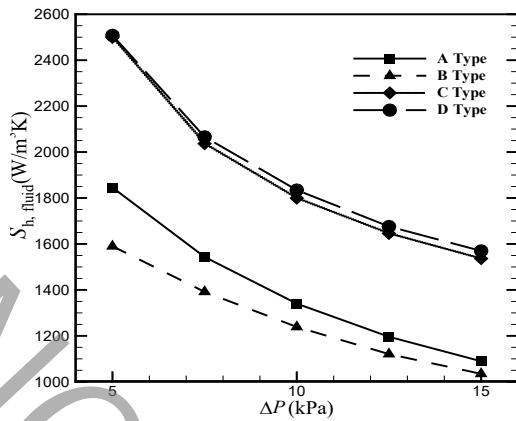
شکل ۱۴: تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب افت فشار برای آرایش‌های مختلف ورود/خروج در کسر حجمی ۴ درصد



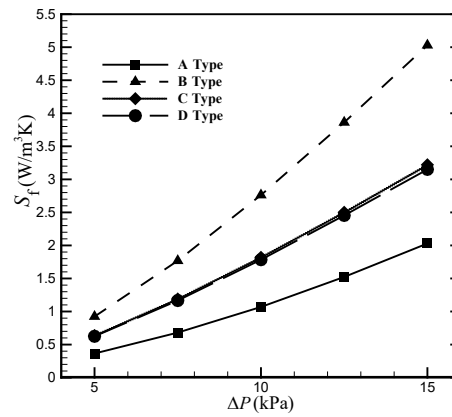
شکل ۱۵: تغییرات مقاومت حرارتی بر حسب افت فشار برای آرایش‌های مختلف ورود/خروج در کسر حجمی ۴ درصد



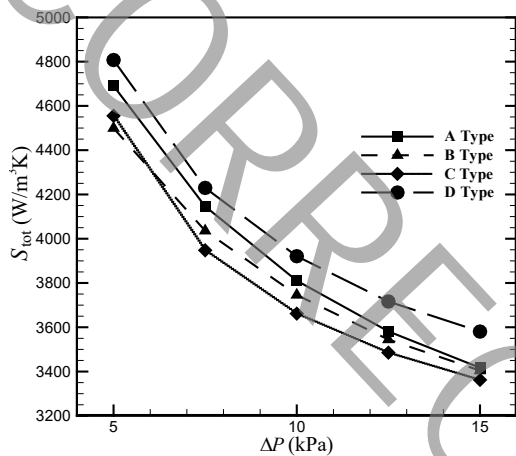
شکل ۱۶: تغییرات نسبت بیشینه اختلاف دمایی کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی بر حسب افت فشار برای آرایش‌های مختلف ورود/خروج در کسر حجمی ۴ درصد



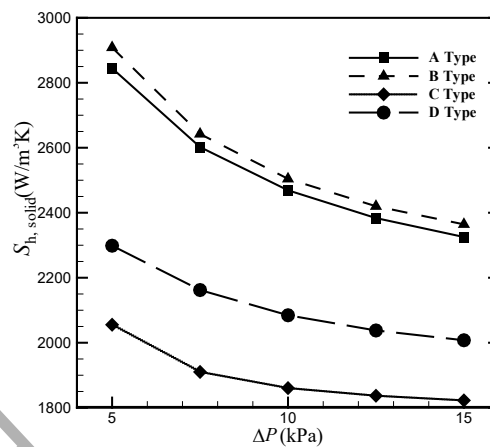
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۷: تغییرات (الف) تولید آنتروپی اصطکاکی (ب) تولید آنتروپی حرارتی جامد (پ) تولید آنتروپی اصطکاکی (ت) تولید آنتروپی کل با افت فشار برای آرایش‌های مختلف ورود/خروج در کسر حجمی ۴ درصد

است. به همین دلیل روند تغییرات تولید آنتروپی کل با کسر حجمی و افت فشار مشابه روند تولید آنتروپی حرارتی است.

(ج) در یک افت فشار ثابت تولید آنتروپی حرارتی در هر دو بخش سیال و جامد با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد، ولی برای یک کسر حجمی ثابت با افزایش افت فشار کاهش می‌یابد.

۲. با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ عدد ناسلت متوسط بین ۱۱/۸۸٪ تا ۱۲/۰۶٪ افزایش، آنتروپی تولیدی اصطکاکی بین ۳/۹۶٪ تا ۶/۰۴٪ کاهش و آنتروپی تولیدی حرارتی بخش سیال بین ۲/۲۶ تا ۳/۷۳٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی از صفر تا ۴٪ تغییرات مقاومت حرارتی، بیشینه اختلاف دمای کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی، آنتروپی تولیدی بخش جامد و آنتروپی تولیدی کل به ترتیب کمتر ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۲٪ است.

۳. با افزایش افت فشار از ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال عدد ناسلت متوسط بین

ترمودینامیکی سیال پایه، نانوسیال و بخش جامد به دما و همچنین اثر حرکت براونی نانوذرات لحاظ شده است. نتایج عددی نشان دادند که:

۱. در همه آرایش‌ها:

(الف) عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی و افت فشار افزایش می‌یابد.

(ب) مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی با افزایش افت فشار کاهش می‌یابد.

(پ) تغییرات مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه‌گرمایی به شار حرارتی با کسر حجمی ناچیز و نامنظم است.

(ت) با افزایش کسر حجمی در یک افت فشار ثابت، تولید آنتروپی اصطکاکی با شیب ملایم کاهش می‌یابد ولی در یک کسر حجمی ثابت با افزایش افت فشار با شیب قابل توجه افزایش می‌یابد.

(ث) سهم تولید آنتروپی اصطکاکی از تولید آنتروپی کل بسیار اندک است، لذا تولید آنتروپی کل متأثر از مجموع تولید آنتروپی حرارتی سیال و جامد

۵. ازدیدگاه قانون دوم ترمودینامیک و به دلیل کمترین آنتروپی تولیدی کل، در افت فشار ۵ کیلوپاسکال آرایش B و در افت فشار ۱۰ و ۱۵ کیلوپاسکال آرایش C بهترین آرایش هستند. از لحاظ عملکرد انتقال حرارت و خنک کاری تراشه الکترونیکی (واقع شده در کف چاه گرمایی) آرایش A بهترین آرایش است. با توجه به این که از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک برتری آرایش B و C بر آرایش A چشمگیر نیست ولی از لحاظ شاخص های حرارتی به ویژه نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی برتری آرایش A بر آرایش B و C قابل توجه تر است می توان گفت آرایش A بهترین آرایش است.

۱/۷۸٪ تا ۱/۸۸٪ افزایش، مقاومت حرارتی بین ۳۵/۹۴٪ تا ۴۰/۴۱٪ کاهش، نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شار حرارتی بین ۳۳/۹۰٪ تا ۴۱/۶۰٪ کاهش و آنتروپی تولیدی کل بین ۲۴/۳۴٪ تا ۲۷/۱۵٪ کاهش می یابد.

۴. از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک، کمترین آنتروپی تولیدی حرارتی سیال و جامد به ترتیب مربوط به آرایش B و C است؛ در حالی که آنتروپی تولیدی اصطکاکی در آرایش A نسبت به سایر آرایش ها حداقل است.

جدول ۵: مقایسه نسبی شاخص های عملکردی چاه گرمایی میکروکانالی برای آرایش های مختلف در افت فشارهای مختلف و کسر حجمی ۴ درصد

فهرست علائم

علائم انگلیسی

علائم انگلیسی	شرح
A	سطح مقطع میکروکانال (m^2)
c	گرمای ویژه ($^{\circ}K \cdot J/kg$)
D_h	قطر هیدرولیکی میکروکانال (m)
H	ارتفاع (m)
\bar{h}	متوسط ضریب جابه جایی ($^{\circ}K \cdot Wm$)
k	رسانایی ($^{\circ}K \cdot Wm$)
L	طول (m)
m	دبی جرمی ($^{\circ}kgs$)
Nu	عدد ناسلت متوسط
P	فشار ($^{\circ}s \cdot kgm$)
p	محیط تر شده (m)
Q	حرارت جذب شده (W)
q_w	شار حرارتی ورودی به کف چاه ($^{\circ}Wm$)
q	شار حرارتی عبوری از مرز جامد و سیال ($^{\circ}Wm$)
\bar{q}	متوسط شار حرارتی عبوری از مرز جامد و سیال ($^{\circ}Wm$)
R_{th}	مقاومت حرارتی ($^{\circ}KW$)
S	آنتروپی تولیدی ($^{\circ}K \cdot Wm$)
T	دما (K)
u	مؤلفه سرعت در راستای x ($^{\circ}ms$)
v	مؤلفه سرعت در راستای y ($^{\circ}ms$)
w	مؤلفه سرعت در راستای z ($^{\circ}ms$)
W	عرض (m)
x,y,z	مؤلفه های مختصاتی
ϕ	کسر حجمی
μ	لزجت دینامیکی ($^{\circ}s \cdot kgm$)

علائم یونانی

افت فشار (kPa)	شاخص های عملکردی	A	B	C	D
۵	Nu	۲۴/۹۸	۲۴/۵۸	۲۴/۰۵	۲۴/۱۹
	تفاوت نسبی (%)	-	۱/۶۰	۳/۷۲	۳/۱۶
۱۰	Nu	۲۵/۱۷	۲۴/۷۶	۲۴/۱۷	۲۴/۳۴
	تفاوت نسبی (%)	-	۱/۶۳	۳/۹۷	۳/۳۰
۱۵	Nu	۲۵/۴۵	۲۵/۰۴	۲۴/۴۹	۲۴/۶۲
	تفاوت نسبی (%)	-	۱/۶۱	۳/۷۷	۳/۲۶
۵	$R_{th} (KW^{-1})$	۴/۱۹	۴/۳۳	۵/۶۲	۶/۱۲
	تفاوت نسبی (%)	-	۳/۳۴	۳۴/۱۳	۴۶/۰۶
۱۰	$R_{th} (KW^{-1})$	۳/۰۷	۳/۰۹	۳/۹۷	۴/۴۶
	تفاوت نسبی (%)	-	۰/۶۵	۲۹/۳۱	۴۵/۲۷
۱۵	$R_{th} (KW^{-1})$	۲/۵۶	۲/۵۸	۲/۶۰	۳/۷۶
	تفاوت نسبی (%)	-	۰/۷۸	۴۰/۶۲	۴۶/۸۷
۵	$\theta (Km^{\circ}W^{-1})$	$7/43E-5$	$7/74E-5$	$10/6E-5$	$11/9E-5$
	تفاوت نسبی (%)	-	۴/۱۷	۴۳/۳۴	۶۰/۰۷
۱۰	$\theta (Km^{\circ}W^{-1})$	$5/40E-5$	$5/45E-5$	$7/57E-5$	$8/79E-5$
	تفاوت نسبی (%)	-	۰/۹۲	۴۰/۱۸	۶۲/۷۸
۱۵	$\theta (Km^{\circ}W^{-1})$	$4/48E-5$	$4/52E-5$	$7/04E-5$	$7/44E-5$
	تفاوت نسبی (%)	-	۰/۸۹	۵۷/۱۴	۶۶/۰۷
۵	$S_{tot} (Wm^{\circ}K^{-1})$	۴۶۹۰/۵۵	۴۴۹۹/۲۶	۴۵۵۵/۰۹	۴۸۰۷/۲۵
	تفاوت نسبی (%)	-	۴/۲۵	۱/۲۴	۶/۸۴
۱۰	$S_{tot} (Wm^{\circ}K^{-1})$	۳۸۱۰/۵۰	۳۷۴۵/۸۵	۳۶۶۱/۶۵	۳۹۲۰/۹۷
	تفاوت نسبی (%)	-	۲/۳۰	-	۷/۰۸
۱۵	$S_{tot} (Wm^{\circ}K^{-1})$	۳۴۱۶/۹۷	۳۴۰۴/۱۷	۳۳۶۲/۱۴	۳۵۸۰/۵۹
	تفاوت نسبی (%)	-	۱/۶۳	-	۶/۵۰

sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 9, pp. 1342-1347, 2012.

- [6] H. R. Seyf, B. Nikaeein, Analysis of Brownian motion and particle size effects on the thermal behavior and cooling performance of microchannel heat sinks, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 58, pp. 36-44, 2012.
- [7] V. L. Vinodhan, K. Rajan, Computational analysis of new microchannel heat sink configurations, *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp. 595-604, 2014.
- [8] 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*, Vol. 26, No. 1, pp. 83-90, 2015.
- [9] V. Duryodhan, A. Singh, S. Singh, A. Agrawal, Convective heat transfer in diverging and converging microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, pp. 424-438, 2015.
- [10] M. Dehghan, M. Daneshpour, M. S. Valipour, R. Rafee, S. Saedodin, Enhancing heat transfer in microchannel heat sinks using converging flow passages, *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, pp. 244-250, 2015.
- [11] M. Kalteh, A. Alipour, Investigating the effect of velocity slip and temperature jump on heat transfer of nanofluid in a microchannel under constant heat flux with lattice Boltzmann method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, doi: 10.22060/mej.2016.857. 2016. (in Persian)
- [12] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, Effects of different inlet/outlet arrangements on performance of a trapezoidal porous microchannel heat sink, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 269-280, 2016. (in Persian)
- [13] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, R. Sadeghi, Three dimensional investigations of inlet/outlet arrangements and nanofluid utilization effects on a triangular microchannel heat sink performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 27-38, 2016. (in Persian)
- [14] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, R. Sadeghi, Investigation of nanofluid flow field and conjugate heat transfer in a MCHS with four different, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, doi: 10.22060/mej.2017.12473.5347. (in Persian)
- [15] 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*, Vol. 230, pp. 550-556,

چگالی (kgm^{-3}) ρ

نسبت بیشینه اختلاف دمای کف چاه گرمایی به شارحرارتی Θ
($^{\circ}K m^2 W^{-1}$)

زیرنویس‌ها

مقدار متوسط avg

کف چاه گرمایی b

Brownian برآونی

ch کانال

eff مؤثر

f سیال

hs چاه گرمایی

in ورودی

max حداکثر

min حداقل

nf نانوسیال

np نانوذره

out خروجی

s جامد

surface سطح جامد (مرز بین جامد و سیال)

Silicon سیلیکون

Static استاتیکی

tot کل

w دیوار

مراجع

- [1] D. B. Tuckerman, R. Pease, High-performance heat sinking for VLSI, *IEEE Electron device letters*, Vol. 2, No. 5, pp. 126-129, 1981.
- [2] C. B. Sobhan, S. V. Garimella, A comparative analysis of studies on heat transfer and fluid flow in microchannels, *Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 293-311, 2001.
- [3] R. Chein, G. Huang, Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 17, pp. 3104-3114, 2005.
- [4] R. Chein, J. Chen, Numerical study of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 8, pp. 1627-1638, 2009.
- [5] T.-C. Hung, W.-M. Yan, Effects of tapered-channel design on thermal performance of microchannel heat

- generation using nanofluid flow through the circular microchannel and minichannel heat sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 85-91, 2013.
- [23] N. Pourmahmoud, H. Soltanipour, I. Mirzaee, The effects of longitudinal ribs on entropy generation for laminar forced convection in a microchannel, *Thermal Science*, No. 00, pp. 110-110, 2014.
- [24] K. Leong, H. C. Ong, Entropy generation analysis of nanofluids flow in various shapes of cross section ducts, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 72-78, 2014.
- [25] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of heat and Mass transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, 2000.
- [26] R. Hamilton, O. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, 1962.
- [27] J. Li, *Computational Analysis of Nanofluid Flow in Microchannels with Applications to Micro-heat Sinks and Bio-MEMS*: ProQuest.2008.
- [28] R. J. Phillips, Microchannel Heat Sinks, *Lincoln Laboratory Journal*, Vol. 1, No. 1, 1988.
- 2017.
- [16] A. Bejan, Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture, *International journal of energy research*, Vol. 26, No. 7, pp. 0-43, 2002.
- [17] A. Bejan, A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer, *J. Heat Transfer*, Vol. 101, No. 4, pp. 718-725, 1979.
- [18] H. Abbassi, Entropy generation analysis in a uniformly heated microchannel heat sink, *Energy*, Vol. 32, No. 10, pp. 1932-1947, 2007.
- [19] P. K. Singh, K. Anoop, T. Sundararajan, S. K. Das, Entropy generation due to flow and heat transfer in nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 21, pp. 4757-4767, 2010.
- [20] J. Guo, M. Xu, J. Cai, X. Huai, Viscous dissipation effect on entropy generation in curved square microchannels, *Energy*, Vol. 36, No. 8, pp. 5416-5423, 2011.
- [21] W. H. Mah, Y. M. Hung, N. Guo, Entropy generation of viscous dissipative nanofluid flow in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 15, pp. 4169-4182, 2012.
- [22] M. Sohel, R. Saidur, N. Hassan, M. Elias, S. Khaleduzzaman, I. Mahbulbul, Analysis of entropy

Please cite this article using:

H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, Thermal Performance And Entropy Generation Analysis Of Nanofluid Flow In A Trapezoidal Heat Sink With Different Arrangements, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-18.

DOI:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



UNCORRECTED PROOF