



## شبیه‌سازی عددی اثر میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی، ترموهیدرولیکی و تولید انرژی در چاه‌گرمایی میکروکانالی سیلیکونی تحت شار حرارتی یکنواخت

مجتبی سپهرنیا<sup>۱\*</sup>، حسین خراسانی‌زاده<sup>۱</sup>، محمدبهشاد شفیعی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۱۷  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۷-۱۱  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۸-۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۲۳

### کلمات کلیدی:

عملکرد ترموهیدرولیکی  
انرژی مغناطیسی  
انرژی اصطکاکی  
انرژی حرارتی  
چاه‌گرمایی سیلیکونی

**خلاصه:** در این پژوهش به بررسی اثر میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی، ترموهیدرولیکی و تولید انرژی در چاه‌گرمایی میکروکانالی سیلیکونی دوزنقه‌ای شکل، با چهار آرایش مختلف، به صورت سه‌بعدی و عددی پرداخته شده است. تراشه الکترونیکی متصل به کف چاه‌گرمایی شار حرارتی یکنواخت ۵۰ کیلووات بر مترمربع تولید می‌کند. شبیه‌سازی‌ها برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه و اعداد هارتمن صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در مجموع آرایش A (ورودی به مرکز ناحیه توزیع‌کننده و خروجی از مرکز ناحیه جمع‌کننده) بهترین آرایش است. نتایج برای بهترین آرایش نشان می‌دهد برای همه دبی‌های جرمی با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۶، مقاومت حرارتی بین ۴/۳۹ تا ۹/۱۵ درصد، نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی بین ۱/۸۱ تا ۷/۹۱ درصد و معیار ارزیابی عملکرد بین ۸۱/۶۱ تا ۸۷/۱۵ درصد کاهش و تولید انرژی حرارتی کل بین ۱۰/۱۳ تا ۷۷/۰۷ درصد افزایش می‌یابد. در بهترین آرایش، بهترین عملکرد از دیدگاه حرارتی برای دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه و عدد هارتمن ۱۶ و از دیدگاه ترموهیدرولیکی و تولید انرژی برای دبی جرمی ۰/۰۲ گرم بر ثانیه و عدد هارتمن صفر رخ می‌دهد. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند به‌عنوان یک ابزار در طراحی میکروپمپ‌های هیدروپمپ‌های میکروکانالیکی مغناطیسی و قطعات میکروالکترونیک مورد استفاده قرار گیرد.

### ۱- مقدمه

به‌عنوان یک علم میان‌رشته‌ای حوزه‌های متعددی از جمله فیزیک، شیمی، الکترونیک، پلیمر، مکانیک، نانو و پزشکی را شامل می‌شود. از جمله مهم‌ترین کاربردهای میکروفلوئیدیک در حوزه پزشکی می‌توان به بیولوژی سلولی و مهندسی بافت اشاره کرد. سیستم‌های میکروفلوئیدیک به‌طور معمول دارای طول ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر هستند و معمولاً شامل مایعاتی نظیر خون، سوسپانسیون سلول‌های باکتریایی و محلول پادتن<sup>۱</sup> یا پروتئین هستند [۱ و ۲].

در سال‌های اخیر مطالعات تئوری و عملی پیرامون سیستم‌های میکروالکترومکانیکی<sup>۱</sup> شامل دستگاه‌های میکروفلوئیدیک<sup>۲</sup> و کاربردهای آن نظیر میکروپمپ<sup>۳</sup>، میکروشر<sup>۴</sup>، میکرومیکسر<sup>۵</sup>، میکرومبدل حرارتی<sup>۶</sup>، چاه‌گرمایی میکروکانالی<sup>۷</sup>، ابزارهای پزشکی در ابعاد میکرو<sup>۸</sup> و میکروپیل سوختی<sup>۹</sup> انجام شده است. میکروفلوئیدیک

امین‌الساداتی و همکاران [۳] جریان جابجایی اجباری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک میکروکانال افقی تحت اثر میدان مغناطیسی، که بخشی از آن تحت شار حرارتی یکنواخت قرار داشت، به‌صورت عددی و دوبعدی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد با

- 1 Microelectromechanical System
- 2 Microfluidic Devices
- 3 Micropump
- 4 Microvalve
- 5 Micromixer
- 6 Microheat Exchanger
- 7 Microchannel Heat Sink
- 8 Micromedical Instruments
- 9 Microfuel Cells

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: msepehr\_91@yahoo.com



افزایش اعداد هارتمن و رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد و حداکثر دمای دیواره میکروکانال کاهش می‌یابد. ملوندی و گنجی [۴] جریان نانوسیال آب-آلومینا را در یک میکروکانال دایره‌ای در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به صورت عددی و دوبعدی بررسی نمودند. نتایج نشان داد در حضور میدان مغناطیسی گرادیان سرعت نزدیک دیواره و همچنین سرعت لغزشی در دیواره‌ها افزایش می‌یابد و بنابراین نرخ انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابد. همچنین افزایش عدد هارتمن منجر به افزایش شدت میدان مغناطیسی شده و این امر موجب افزایش نیروی لورنتز می‌شود. نیروی لورنتز در برابر جریان مقاومت کرده و باعث کاهش سرعت جریان می‌شود. حاجی‌علی‌گل و همکاران [۵] به بررسی عددی و سه‌بعدی جابجایی ترکیبی نانوسیال آب-آلومینا در میکروکانال مستطیلی در حضور میدان مغناطیسی پرداختند. با افزایش عدد هارتمن بیشینه سرعت (در راستای جریان) در نواحی مرکزی میکروکانال کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت میدان مغناطیسی، انتقال حرارت از دیواره‌های میکروکانال به نانوسیال افزایش و تولید انرژی کاهشی می‌یابد. تولید انرژی کاهشی در مقایسه با تولید انرژی مغناطیسی و اصطکاکی سهم عمده تولید انرژی کل را دارد. کیاست‌فر و پورمحمد [۶] جریان سیال غیرنیوتونی در یک میکروکانال مربعی را در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به صورت عددی و سه‌بعدی بررسی نمودند. همچنین آن‌ها دو اثر گرمای ژول و اتلاف ویسکوز را در معادله انرژی لحاظ نمودند. نتایج نشان می‌دهد میدان سرعت به شدت از حضور میدان مغناطیسی تاثیر می‌پذیرد. افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش سرعت بیشینه و افزایش سرعت در نزدیکی دیواره‌ها شده و پروفیل سرعت مسطح‌تر می‌شود لذا می‌توان گفت میدان جریان سیال غیرنیوتونی در میکروکانال‌ها با اعمال میدان مغناطیسی می‌تواند کنترل شود. این روش در سیستم‌های زیست‌پزشکی و تجهیزات میکروسیالی کاربرد دارد. رحمتی و همکاران [۷] جریان گاز در یک میکروکانال را تحت اثر میدان مغناطیسی بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از روش شبکه بولتزمن جریان را با فرض لغزشی بودن به صورت دوبعدی شبیه‌سازی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از دقت مرتبه دو برای محاسبه سرعت لغزشی در دیواره‌های میکروکانال، باعث نزدیک شدن نتایج شبیه‌سازی به نتایج تحلیلی می‌شود. حمدان و همکاران [۸] اثر

شرایط مرزی لغزشی سرعت همراه با پرش دمایی را تحت اثر میدان مغناطیسی برای دو وضعیت ۱- جریان روی صفحه تخت ۲- جریان بین دو صفحه موازی (میکروکانال افقی) به روش عددی و تحلیلی بررسی نمودند. نتایج نشان داد اعمال میدان مغناطیسی متقاطع نیروی لورنتز را تولید می‌کند که باعث مقاومت در برابر حرکت جریان شده و سرعت سیال را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش شدت میدان مغناطیسی و عدد ناسن باعث کاهش ضخامت لایه مرزی سرعت، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک پوسته‌ای می‌شود. سلطانی‌پور و همکاران [۹] اثر موقعیت اعمال میدان مغناطیسی را بر تولید انرژی و انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا در میکروکانال دوبعدی به صورت عددی بررسی نمودند. نانوسیال از طریق میدان مغناطیسی که وابسته به جریان الکتریکی عبوری از سیم‌هاست به جریان در می‌آید. نتایج نشان می‌دهد جریان نانوسیال متاثر از میدان مغناطیسی است به طوری که گردابه‌ها نزدیک به محل اعمال میدان مغناطیسی تشکیل می‌شوند و تعداد و قدرت گردابه‌ها متاثر از عدد هارتمن است. همچنین با افزایش عدد هارتمن تولید انرژی کل کاهش می‌یابد. عباس‌زاده و همکاران [۱۰] جریان نانوسیال آب-اکسید مس در یک میکروکانال صفحه موازی را به صورت دوبعدی و عددی مطالعه نمودند. آن‌ها اثر میدان مغناطیسی را با در نظر گرفتن شرایط مرزی لغزشی سرعت و پرش دمایی بر روی دیواره‌ها بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش عدد ناسن تولید انرژی کل کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد هارتمن، عدد ناسلت و تولید انرژی کل افزایش می‌یابد. لویز و همکاران [۱۱] به آنالیز تولید انرژی جریان هیدرودینامیکی مغناطیسی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال عمودی متخلخل پرداختند. آن‌ها از شرط مرزی سرعت لغزشی و انتقال حرارت جابجایی-تشنه‌شی بر روی دیواره‌های میکروکانال استفاده نموده و با استفاده از روش رنگ-کوتا<sup>۱</sup> و تکنیک شوتینگ<sup>۲</sup> معادلات حاکم بر مسئله را به روش عددی حل نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد تولید انرژی با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز کاهش و با افزایش عدد گراشف، پارامتر تشنعه و پارامتر تشنعه-هدایت افزایش می‌یابد. حسینی و همکاران [۱۲] میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینا و آب-اکسید مس را تحت اثر میدان مغناطیسی در یک چاه

1 Runge-Kutta Method

2 Shooting Technique

دارد. کله و عابدین‌زاده [۱۵] جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک میکروکانال دوبعدی تحت اثر میدان مغناطیسی با استفاده از روش لیتیس بولتزمن<sup>۶</sup> به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش عدد رینولدز از ۵ به ۲۵ و با افزایش کسر حجمی از صفر به ۴ درصد، عملکرد انتقال حرارت به ترتیب ۱۹ و ۱۷ درصد بهبود می‌یابد. آن‌ها دریافتند با افزایش عدد هارتمن عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد؛ به عنوان نمونه در عدد رینولدز ۲۵، افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۰ منجر به افزایش حدود ۳ درصد در عدد ناسلت متوسط می‌شود. یانگ و همکاران [۱۶] جریان تراکم‌ناپذیر الکترواستمیک را در میکروکانال مستطیلی دوبعدی به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها اثرات الکترومغناطیسی و الکتروکینتیک را با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر راستای میدان الکتریکی بررسی نمودند. آن‌ها گرمای الکترومغناطیسی، گرمای ژول و اتلاف ویسکوز را در معادله انرژی لحاظ نمودند. نتایج نشان می‌دهد اعمال میدان الکتریکی باعث کنترل جریان می‌شود. بدون اعمال میدان الکتریکی، سرعت با افزایش عدد هارتمن کاهش می‌یابد اما با اعمال میدان الکتریکی، با افزایش عدد هارتمن، سرعت ابتدا روندی افزایشی و سپس روندی کاهشی دارد. اثر هال در برخی گازهای یونیزه شده زمانی اتفاق می‌افتد که قدرت میدان مغناطیسی یا فرکانس سیکلوترون<sup>۷</sup> بسیار قوی باشد [۱]. جیها و همکاران [۱] اثرات هال بر جریان جابجایی طبیعی هیدرودینامیکی مغناطیسی را در یک میکروکانال عمودی برای سیال تراکم‌ناپذیر و لزج بررسی نمودند. آن‌ها جریان را دائم و توسعه‌یافته در نظر گرفته و سرعت لغزشی و پرش دمایی را به عنوان شرایط مرزی بر روی دیواره‌های میکروکانال اعمال نمودند. افزایش پارامتر رقت باعث افزایش نرخ دبی حجمی می‌شود. همچنین نرخ دبی حجمی تابعی افزایشی از پارامتر جریان هال<sup>۸</sup> است. الکترواسمز یکی از پدیده‌های الکتروکینتیک است که در سطح اتفاق می‌افتد و وابسته به وجود دو لایه الکتریکی<sup>۹</sup> و اعمال میدان الکتریکی است. به عنوان نمونه یون‌های تلفن همراه در ناحیه بین دو لایه الکتریکی می‌توانند تحت اثر انرژی الکترواستاتیک حرکت کنند و منجر به حرکت مایع بالک با اثر ویسکوز می‌شوند؛ این نوع

گرمایی میکروکانالی با رویکرد محیط متخلخل به صورت دوبعدی بررسی نمودند. آن‌ها از دو روش عددی و تحلیلی برای حل مسئله استفاده نمودند؛ در روش عددی از نرم‌افزار میپل<sup>۱</sup> و در روش تحلیلی از روش همبستگی<sup>۲</sup> استفاده نمودند. نتایج نشان داد با اعمال میدان مغناطیسی، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم نسبت به نانوسیال آب-اکسید مس عملکرد انتقال حرارت بهتری دارد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانوسیال انتقال حرارت بهبود می‌یابد. نورین و همکاران [۱۳] جریان غیردائم نانوسیال در یک میکروکانال نامتقارن را با اعمال زتا پتانسیل و تحت اثر میدان مغناطیسی به صورت عددی و دوبعدی بررسی نمودند. آن‌ها اثرات اتلاف ویسکوز و گرمای ژول را لحاظ نمودند. در تحقیق آن‌ها جریان پریستالتیک<sup>۳</sup> در میکروکانال برقرار می‌شود یعنی با انتشار یک موج سینوسی در راستای دیواره‌های الاستیک مجرا جریان شکل می‌گیرد. همچنین اعمال میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی و گرادیان فشار جریان نانوسیال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش پارامتر الکترواستمیک<sup>۴</sup>، عدد هارتمن، تحرک محیط<sup>۵</sup> و اختلاف زتا پتانسیل مقدار گرادیان محوری فشار ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. سیواسانکاران و نارئین [۱۴] جریان دائم، آرام و سه‌بعدی نانوسیال در چاه گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای را به صورت عددی و به روش حجم محدود بررسی نمودند. هدف آن‌ها بررسی اثر میدان مغناطیسی، شکل هندسه میکروکانال و بررسی عملکرد نانوسیال‌های مختلف بود. آن‌ها با استفاده از چهار نوع نانوذره اکسیدی (اکسید آلومینیوم، اکسید مس، اکسید سلسیوم و اکسید روی) و دو سیال پایه (آب و اتیلن گلیکول) هشت نوع نانوسیال را به عنوان خنک‌کننده مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش شدت میدان مغناطیسی اگرچه افت فشار را افزایش می‌دهد اما موجب بهبود انتقال حرارت نیز می‌شود. همچنین زمانی که عرض بالای کانال افزایش می‌یابد عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین در شرایط عدم حضور میدان مغناطیسی، با افزایش عرض پایین کانال عدد ناسلت کاهش می‌یابد در حالی که در حضور میدان مغناطیسی، با افزایش عرض پایین کانال یک نقطه بهینه برای عدد ناسلت متوسط وجود

6 Lattice Boltzmann  
7 Cyclotron Frequency  
8 Hall Current Parameter  
9 Electric Double Layer (EDL)

1 Maple 18  
2 Collocation Method  
3 Peristaltic Flow  
4 Electroosmotic Parameter  
5 Mobility of the Medium

و تولید انتروپی مغناطیسی) به طور جداگانه ارزیابی می‌شود. از دیگر نوآوری‌های کار حاضر محاسبه نمودن تولید انتروپی حرارتی در بخش جامد چاه به عنوان یکی از ترم‌های تولید انتروپی کل است که در هیچ یک از مطالعات پیشین در مورد میکروکانال‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند به عنوان یک ابزار طراحی برای کاربردهایی در ساخت میکروپمپ هیدرودینامیک مغناطیسی<sup>۳</sup>، قطعات میکروالکترونیک<sup>۴</sup>، میکرومبدل‌های حرارتی و سیستم‌های خنک‌کاری در مقیاس میکرو<sup>۵</sup> مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- هندسه مسئله و شرایط مرزی

در مطالعه حاضر چاه گرمایی دوزنقه‌ای در چهار آرایش مختلف ورود و خروج جریان A، B، C و D مطابق شکل ۱ منظور شده است. در شکل ۲ هندسه چاه گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای آرایش A و نحوه اعمال شار حرارتی یکنواخت و میدان مغناطیسی یکنواخت-متقاطع نشان داده شده است. از لحاظ ابعاد هندسی چهار آرایش همانند هم هستند و فقط محل قرار گرفتن ورودی و خروجی جریان در آن‌ها متفاوت است. محل اعمال شار حرارتی کف چاه گرمایی است که محل تعبیه تراشه الکترونیکی است. شار حرارتی یکنواخت به صورت عمودی و رو به بالا وارد می‌شود و سیال خنک‌کننده با عبور از چاه گرمایی حرارت تولید شده را می‌زداید. برای همه آرایش‌ها میدان مغناطیسی یکنواخت به صورت متقاطع و رو به پایین اعمال می‌شود؛ به نحوی که راستای اعمال میدان مغناطیسی بر راستای جریان عمود است. هندسه پره‌ها و میکروکانال‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، ابعاد پره‌ها و میکروکانال‌ها یکسان هستند. پنج میکروکانال چاه گرمایی از سمت چپ و راست با پره‌های هم‌اندازه احاطه شده‌اند. به منظور راحت شدن بحث، میکروکانال‌ها از چپ به راست شماره‌گذاری شده‌اند. مقادیر مربوط به ابعاد چاه گرمایی، میکروکانال‌ها و پره‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. جنس پره‌ها و قسمت جامد چاه گرمایی، سیلیکون است و از آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود.

شرایط مرزی چاه گرمایی عبارتند از:

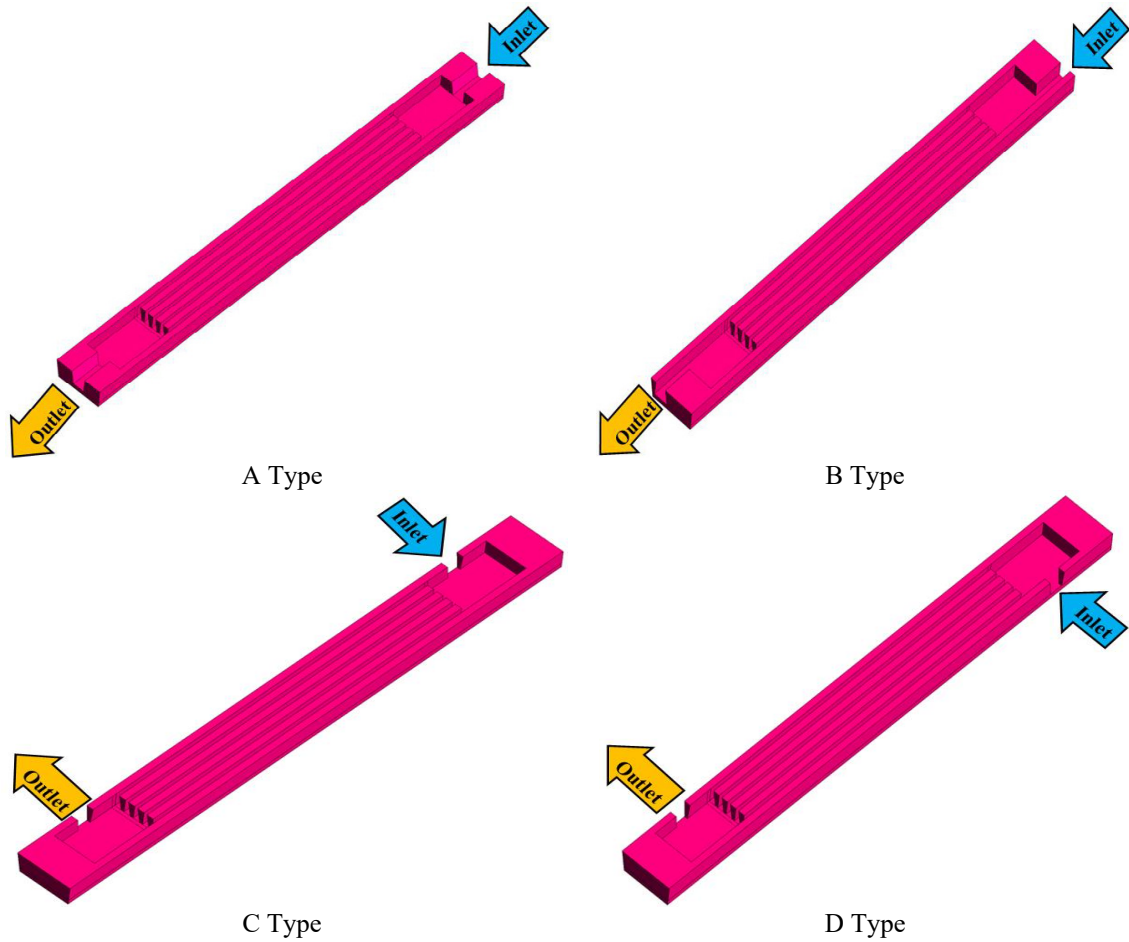
در ورودی جریان:

حرکت سیال، به جریان الکترواوسمیتیک<sup>۱</sup> معروف است [۲]. ژائو و همکاران [۲] انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در میکروتیوب متخلخل تحت اثرات الکتروکینتیک را به صورت تحلیلی- عددی بررسی نمودند. آن‌ها شرط تعادل حرارتی محلی را بین بخش جامد و سیال در محیط متخلخل و شار حرارتی یکنواخت بر روی دیواره میکروتیوب اعمال نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش ضخامت دو لایه الکتریکی سرعت نانوسیال در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد؛ سرعت بدون بعد با افزایش عدد داری افزایش و با افزایش کسر حجمی نانوسیال و عدد هارتمن کاهش می‌یابد؛ عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد هارتمن و کسر حجمی افزایش می‌یابد؛ تولید انتروپی کل با افزایش اعداد داری و برینکمن افزایش می‌یابد.

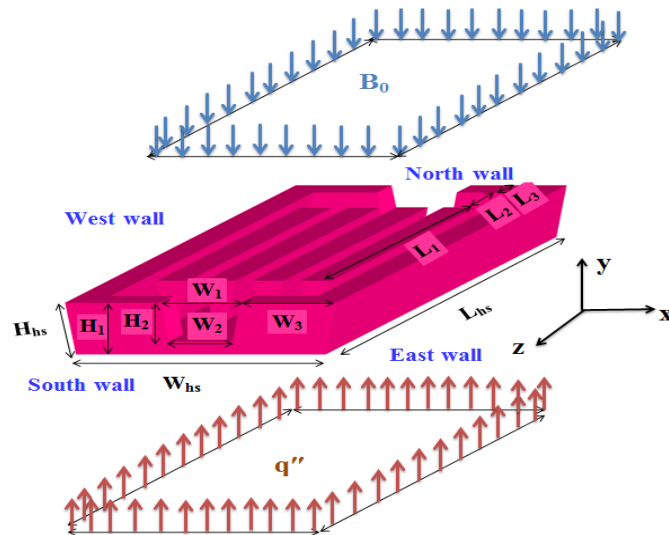
مرور تحقیقات پیشین نشان داد که تاکنون مطالعه‌ای پیرامون اثر میدان مغناطیسی بر میدان جریان، انتقال حرارت و تولید انتروپی برای آرایش‌های مختلف ورود و خروج جریان در یک چاه گرمایی دوزنقه‌ای صورت نگرفته است؛ لذا در این تحقیق به بررسی اثر میدان مغناطیسی بر عملکرد چهار نوع آرایش مختلف ورود و خروج جریان آب از دیدگاه حرارتی، ترموهیدرولیکی و تولید انتروپی در یک چاه گرمایی میکروکانالی دوزنقه‌ای پرداخته می‌شود و اثر میدان مغناطیسی بر میدان جریان، انتقال حرارت و تولید انتروپی بررسی می‌شود. شبیه‌سازی‌ها، همانند سایر مطالعات نویسندگان تحقیق حاضر [۲۱-۱۷]، به صورت سه بعدی و با لحاظ نمودن انتقال حرارت توأمان در بخش جامد و سیال صورت می‌گیرد. در تحقیقات پیشین از تولید انتروپی فقط به عنوان معیاری برای تحلیل عملکرد چاه حرارتی استفاده شده است، ولی در تحقیق حاضر همانند مطالعه پیشین خراسانی‌زاده و سپهرنیا [۲۲]، علاوه بر سه معیار عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی از تولید انتروپی به عنوان یک شاخص استفاده می‌شود. همچنین علاوه بر چهار شاخص مذکور، از معیار ارزیابی عملکرد<sup>۲</sup> معروف به شاخص ترموهیدرولیکی برای ارزیابی رفتار ترموهیدرولیکی جریان در چاه گرمایی استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر، برخلاف عمده تحقیقات پیشین که فقط تولید انتروپی کل را گزارش نموده‌اند، ترم‌های مختلف تولید انتروپی کل (تولید انتروپی اصطکاکی، تولید انتروپی حرارتی سیال، تولید انتروپی حرارتی جامد

3 MHD Micropumps  
4 Microelectronics  
5 Cooling Microdevices

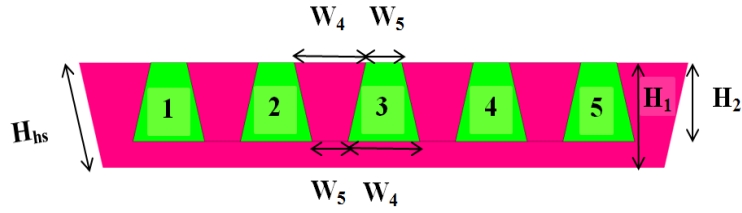
1 ElectroOsmotic Flow (EOF)  
2 Performance Evaluation Criterion (PEC)



شکل ۱. طرحواره ورود و خروج جریان در چهار آرایش A، B، C و D  
 Fig. 1. The A-, B-, C- and D-type inlet/outlet configurations



شکل ۲. هندسه چاه گرمایی میکروکانالی ذوزنقه‌ای و نحوه اعمال شار حرارتی و میدان مغناطیسی  
 Fig. 2. Trapezoidal microchannel heat sink (TMCHS) and application of the magnetic field and heat flux



شکل ۳. هندسه میکروکانال‌ها و پره‌ها  
Fig. 3. Microchannels and fins geometries

جدول ۱. ابعاد چاه گرمایی، میکروکانال‌ها و پره‌ها بر حسب میلی‌متر  
Table 1. The dimensions of the heat sink, microchannels and fins (mm)

$L_3$	$L_2$	$L_1$	$L_{hs}$	$H_2$	$H_1$	$H_{hs}$	$W_5$	$W_4$	$W_3$	$W_2$	$W_1$	$W_{hs}$
۱	۲	۱۰	۱۶	۰/۳	۰/۴	۰/۴۰۵۵۲	۰/۱	۰/۲	۰/۶	۰/۴	۰/۵	۱/۵۶۷

### ۳- فرضیات مسئله و معادلات حاکم

$$P = P_{in}, \quad T = T_{in} = 300 \text{ K} \quad (۱)$$

برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال در آرایش‌های مختلف چاه گرمایی میکروکانالی فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

در خروجی جریان:

۱. جریان سیال آرام، دائم و سه‌بعدی است.

$$P = P_{out} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (۲)$$

۲. خواص ترموفیزیکی سیال و قسمت جامد چاه گرمایی وابسته

به دما است.

۳. کف چاه گرمایی، که متصل به تراشه الکترونیکی است، شار

برای سطوح مشترک جامد-سیال:

حرارتی تولید می‌کند.

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \quad T_s = T_f, \quad \vec{V} = 0, \quad (۳)$$

۴. دیواره‌های جانبی و دیواره بالایی چاه گرمایی، که با محیط

اطراف در تماس هستند، عایق فرض می‌شود.

برای محل نصب تراشه الکترونیکی (کف چاه گرمایی):

۵. شار حرارتی و میدان مغناطیسی اعمال شده یکنواخت در نظر

گرفته می‌شود.

$$q_w'' = -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = 50 \text{ kW/m}^2 \quad (۴)$$

با توجه به فرضیات ذکر شده معادله پیوستگی، معادلات مومنوم

در سه راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  همچنین معادلات انرژی در بخش سیالی و

در قسمت جامد چاه گرمایی به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w u) = \quad (۶)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \sigma B_0^2 (u + w)$$

همان‌طور که از روابط فوق مشخص است جریان سیال با فشار و دمای اولیه وارد چاه گرمایی شده و با فشار نسبی صفر از آن خارج می‌شود. در مرز بین سیال و جامد شرط عدم لغزش و تعادل حرارتی برقرار است. همچنین شار حرارتی ۵۰ کیلووات بر مترمربع به صورت یکنواخت توسط تراشه الکترونیکی تولید شده و از طریق بخش جامد سیلیکونی به قسمت‌های مختلف چاه گرمایی هدایت می‌شود.  $T_{in}$ ،  $P_{out}$ ،  $P_{in}$  به ترتیب فشار ورودی سیال به چاه گرمایی، فشار خروجی سیال از چاه گرمایی، دمای ورودی سیال به چاه گرمایی و  $n$  جهت عمود بر دیوار یا سطح خروجی است.

#### ۴- شاخص‌های عملکرد

در تحقیقات پیشین مربوط به چاه گرمایی حداکثر از سه شاخص عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شارحرارتی برای بررسی عملکرد استفاده شده است [۱۹-۲۴، ۲۵]. در این تحقیق معیار ارزیابی عملکرد معروف به شاخص ترموهیدرولیکی و تولید انتروپی نیز در چاه گرمایی بررسی و از آن‌ها به عنوان شاخص‌های ارزیابی عملکرد چاه گرمایی استفاده می‌شود. تمام شاخص‌ها در بخش‌های بعدی توضیح داده شده‌اند.

#### ۴-۱- عدد ناسلت متوسط

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

$$Nu = \frac{\bar{h}D_h}{k_f} \quad (16)$$

$\bar{h}$  در رابطه (۱۶) ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط روی مرز جامد و سیال است و با استفاده از قانون سرماییش نیوتن متوسط شار حرارتی عبارت است از:

$$\bar{q}'' = \bar{h}(T_{\text{surface,avg}} - T_{\text{near-surface,avg}}) \quad (17)$$

$\bar{q}''$ ،  $T_{\text{surface,avg}}$  و  $T_{\text{near-surface,avg}}$  در رابطه (۱۷) به ترتیب متوسط شار حرارتی خروجی از مرزهای بین جامد و سیال، دمای متوسط سطح جامد سیلیکونی (مرز بین جامد و سیال) و دمای متوسط اولین المان سیال چسبیده به مرز جامد و سیال است. سه پارامتر مذکور به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{q}'' = \frac{\int q'' dA}{A} \quad (18)$$

$$T_{\text{surface,avg}} = \frac{\int T_{\text{surface}} dA}{A} \quad (19)$$

$$T_{\text{near-surface,avg}} = \frac{\int T_{\text{near-surface}} dA}{A} \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w v) = \quad (7)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = \quad (8)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w T) = \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_s \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_s \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_s \frac{\partial T}{\partial z}\right) = 0 \quad (10)$$

برای خواص ترموفیزیکی آب با استفاده از اطلاعات جداول ترمودینامیکی [۲۳] در محدوده دمایی K ۳۰۰-۳۲۵ روابط (۱۱) تا (۱۴) با استفاده از نرم افزار متلب به صورت تابعی از دما توسعه داده شده‌اند:

$$k_f = 0.3424 \exp(0.00195T) - 0.00163 \quad (11)$$

$$\mu_f = 57.83 \exp(-0.04053T) + 0.01473 \exp(-0.01095T) \quad (12)$$

$$\rho_f = 1130 \exp(-0.0004173T) \quad (13)$$

$$c_{p,f} = 6.747 \times 10^8 \exp(-0.05862T) + 3989 \exp(0.0001428T) \quad (14)$$

همچنین برای محاسبه ضریب رسانایی سیلیکون در بخش جامد از رابطه ذیل استفاده می‌شود که در آن دما بر حسب کلون است:

$$k_{\text{Silicon}} = 290 - 0.4T \quad (15)$$

الکترونیکی استفاده می‌شود و هرچه  $\theta$  بزرگ‌تر باشد توزیع دما غیر یکنواخت‌تر است.

#### ۴-۴- معیار ارزیابی عملکرد

یکی دیگر از شاخص‌هایی که می‌توان برای بررسی عملکرد چاه گرمایی از دیدگاه حرارتی (انرژی) استفاده نمود معیار ارزیابی عملکرد است. معیار ارزیابی عملکرد رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی چاه گرمایی را نشان می‌دهد، لذا به عنوان شاخص ترموهیدرولیکی شناخته می‌شود. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

$$PEC = \frac{\dot{Q}_{\text{flow}}}{PP} = \frac{\dot{m}c_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{\dot{v}(P_{\text{in}} - P_{\text{out}})} = \rho c_p \frac{\Delta T}{\Delta P} \quad (25)$$

$\dot{Q}_{\text{flow}}$  و  $PP$  به ترتیب حرارت دریافتی توسط خنک‌کننده و قدرت مورد نیاز برای پمپاژ خنک‌کننده است. هم‌چنین  $\dot{v}$  و  $\dot{m}$  به ترتیب دبی حجمی و دبی جرمی خنک‌کننده است.

#### ۴-۵- انرژی تولیدی

قوانین ترمودینامیک نشان می‌دهد که انتقال گرما و جریان سیال درون سیستم باعث بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی شده و تولید انرژی می‌نمایند. تولید انرژی برای ارزیابی عملکرد فرایندهای بازگشت‌ناپذیری بوده و می‌تواند برای ارزیابی عملکرد فرایندهای ترمودینامیکی و سیستم‌های حرارتی استفاده شود. در تحقیق حاضر انرژی تولیدی کل از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۷ و ۲۸]:

$$S = \frac{k_f}{T_{f,\text{avg}}^2} \left[ \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_f}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_f}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{k_s}{T_{s,\text{avg}}^2} \left[ \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_s}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\mu_f}{T_{f,\text{avg}}^2} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} + \frac{\sigma_f B_0^2}{T_{f,\text{avg}}} (u^2 + w^2) \quad (26)$$

انرژی تولیدی کل شامل انرژی تولیدی حرارتی سیال، انرژی

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 (۱۸) تا (۲۰) برای کلیه این سطوح محاسبه شده‌اند و  $A$  در مخرج این روابط اشاره به سطح کل مرزهای بین جامد و سیال در کل چاه گرمایی دارد. بنابراین عدد ناسلت متوسط از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Nu_{\text{avg}} = \frac{\bar{q}'' D_h}{k_f (T_{\text{surface,avg}} - T_{\text{near-surface,avg}})} = \frac{\bar{q}'' D_h}{k_f (\Delta T)} \quad (21)$$

$D_h$  در رابطه (۲۱) قطر هیدرولیکی میکروکانال است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_h = \frac{4A}{P_{\text{wet}}} \quad (22)$$

$A$  مساحت مقطع میکروکانال و  $P_{\text{wet}}$  محیط ترشده است.

#### ۴-۲- مقاومت حرارتی

مقاومت حرارتی به عنوان دیگر شاخص عملکرد حرارتی از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۵]:

$$R_{\text{th}} = \frac{T_{\text{CPU,max}} - T_{\text{in}}}{q_w'' W_{\text{hs}} L_{\text{hs}}} \quad (23)$$

$T_{\text{CPU,max}}$  در رابطه (۲۳) بیش‌ترین دمای تراشه الکترونیکی است.

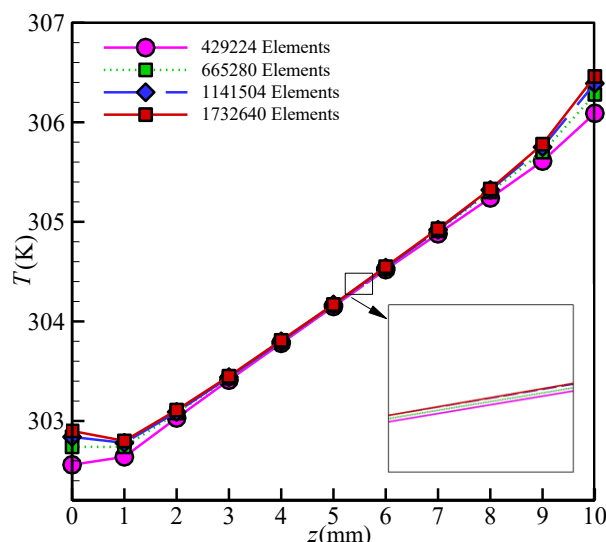
#### ۴-۳- نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی

یکی از اهداف اصلی طراحی ساختارهای جدید برای چاه‌های گرمایی میکروکانالی یکنواخت کردن توزیع دمای بستر چاه گرمایی است. یک تراشه الکترونیکی با خنک‌کاری یکنواخت دارای اختلاف حداکثر و حداقل دمای کم‌تری خواهد بود. نسبت اختلاف حداکثر و حداقل دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی  $\theta$  نامیده می‌شود و عبارت است از [۲۵]:

$$\theta = \frac{T_{\text{CPU,max}} - T_{\text{CPU,min}}}{q_w''} \quad (24)$$

از  $\theta$  به عنوان معیاری برای سنجش میزان یکنواختی دمای تراشه





شکل ۴. تغییرات دما در راستای جریان در کف میکروکانال سوم چاه گرمایی برای آرایش A با چهار شبکه بندی مختلف برای دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه و عدد هارتمن ۱۶

Fig. 4. Temperature variations along bottom center of microchannel #3 using four different grids for the water flow, A-type,  $\Delta P=30$  kPa and  $Ha=16$

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

در این بخش ابتدا نوع شبکه بندی معرفی و سپس استقلال نتایج از شبکه مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه به منظور اعتبارسنجی روش شبیه سازی و نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر، نتایج بدست آمده برای چاه گرمایی میکروکانالی مستطیلی در کار تجربی فیلیپس [۲۹] و کار عددی چین و چن [۲۴] ارائه و مقایسه می شود. حل معادلات حاکم با کمک روش حجم محدود<sup>۱</sup> بر مبنای المان محدود<sup>۲</sup> و با استفاده از نرم افزار انسیس-سی.اف.اکس<sup>۳</sup> انجام شده است. برای حل همزمان میدان سرعت و فشار از الگوریتم کاپلد<sup>۴</sup> استفاده شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی  $10^{-9}$  در نظر گرفته شده است.

به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، تغییرات دما در طول میکروکانال سوم و دقیقاً در مرکز ضلع پایین آن (مرز جامد و سیال) در آرایش A برای سیال آب با دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه و عدد هارتمن ۱۶ برای چهار نوع شبکه بندی بدست آمده و در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد شبکه با تعداد

تولیدی حرارتی جامد، انتروپی تولیدی اصطکاکی و انتروپی تولیدی مغناطیسی است که به ترتیب عبارتند از:

$$S_{h,fluid} = \frac{k_f}{T_{f,avg}^2} \left[ \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_f}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_f}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (27)$$

$$S_{h,solid} = \frac{k_s}{T_{s,avg}^2} \left[ \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_s}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (28)$$

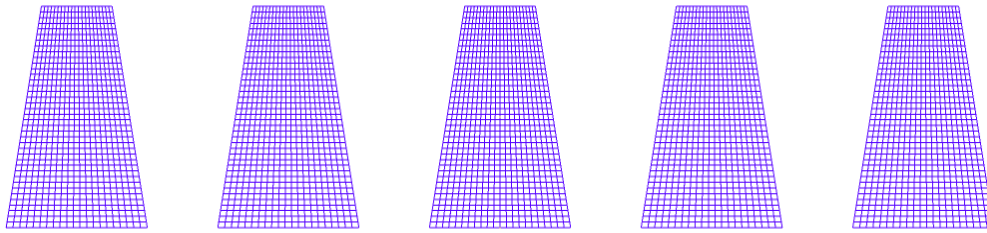
$$S_f = \frac{\mu_f}{T_{f,avg}^2} \left\{ \begin{aligned} &2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ &\left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$S_{MHD} = \frac{\sigma_f B_0^2}{T_{f,avg}} (u^2 + w^2) \quad (30)$$

همچنین عدد بدون بعد هارتمن به صورت زیر تعریف می شود:

$$Ha = B_0 D_h \sqrt{\frac{\sigma_f}{\mu_f}} \quad (31)$$

1 Finite Volume  
2 Finite Element  
3 Ansys CFX  
4 Coupled Algorithm



شکل ۵. مقطعی از شبکه‌بندی میکروکانال‌ها در  $z=8\text{ mm}$

Fig. 5. A cross section of grids in microchannels at  $z=8\text{ mm}$

جدول ۲. درصد اختلاف نسبی حرارت جذب شده توسط سیال و حرارت اعمال شده به چاه‌گرمایی در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی برای دبی جرمی  $0.02\text{ g/s}$  گرم بر ثانیه

Table 2. Heat absorbed by water and the relative difference between the absorbed and applied heats for mass flow rate of  $0.02\text{ g/s}$  in the presence and absence of magnetic field

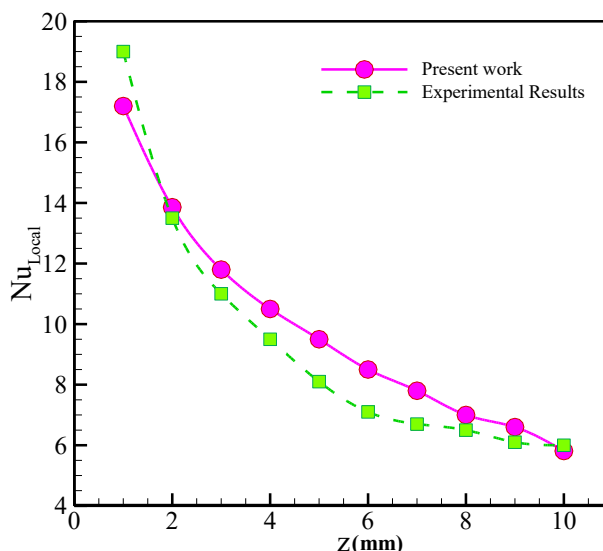
D	C	B	A	نوع آرایش
۱۱۳۴۱۷۲	۱۱۳۴۲۵۰	۱۱۳۴۲۵۰	۱۱۴۱۵۴۰	تعداد المان شبکه
۱/۰۵ درصد	۲/۲۹ درصد	۳/۸۱ درصد	۳/۸۴ درصد	$Ha=0$
۱/۰۴ درصد	۱/۰۴ درصد	۲/۴۵ درصد	۲/۵۲ درصد	$Ha=16$

بقیه آرایش‌ها بحرانی است. در روش‌های عددی، معادلات گسسته‌سازی شده روی هر المان شبکه اعمال شده و سپس میانگین گرفته می‌شود. بنابراین برای شبکه‌هایی که المان‌های قابل قبول بیش‌تری دارند، جواب دقیق‌تری به دست می‌آید. اما در صورتی که تفاوت بین نتایج بدست آمده ناچیز باشد می‌توان از شبکه ایجاد شده برای شبیه‌سازی‌های دیگر هم استفاده نمود. به همین دلیل تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از تعداد المان‌های ذکر شده در جدول ۲ انجام شده‌اند.

به منظور اعتبارسنجی روش عددی به کار گرفته شده و نتایج بدست آمده، با توجه به فقدان نتایج تجربی برای هندسه دوزنقه‌ای شبیه‌سازی برای چاه‌گرمایی میکروکانالی مستطیلی مطالعه تجربی فیلیپس [۲۹] با ۱۱ میکروکانال مستطیلی برای افت فشار ۵۰ کیلوپاسکال انجام شد. بدین منظور تمام مشخصات هندسی و شرایط مرزی مطالعه تجربی فیلیپس [۲۹] اعمال و شار حرارتی  $1000\text{ W/m}^2$  کیلووات بر مترمربع به کف چاه‌گرمایی اعمال شد. در شکل ۶ مقادیر عدد ناسلت محلی در طول میکروکانال پنجم با نتایج تجربی فیلیپس [۲۹] مقایسه شده‌اند. مقادیر عدد ناسلت محلی بدست 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

$1141504$  المان مناسب است زیرا تغییر تعداد المان‌ها از  $1141504$  به  $1732640$  باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در دمای کف میکروکانال سوم نشده است. در شکل ۵ مقطعی از شبکه‌بندی میکروکانال‌ها نشان داده شده است.

به منظور شناسایی آرایش بحرانی با استفاده از تعداد مش تقریباً یکسان شبیه‌سازی برای سایر آرایش‌ها تکرار شد. از آنجایی که در حالت پایدار اختلاف بین حرارت اعمال شده به چاه‌گرمایی و حرارت جذب شده صفر است، می‌توان نتیجه گرفت تفاوتی که دیده می‌شود ناشی از کیفیت شبکه مورد استفاده است. به عنوان یک نمونه در مطالعه چین و چن [۲۴] حداکثر این اختلاف نسبی برای آرایش ورودی و خروجی مستقیم و مقدار آن  $5/4\%$  درصد بوده است. مطالعه برای دو عدد هارتمن صفر و ۱۶ و برای دبی جرمی  $0.02\text{ g/s}$  گرم بر ثانیه انجام شده است و در جدول ۲ اختلاف نسبی بین حرارت اعمال شده به چاه‌گرمایی و حرارت جذب شده برای ۴ آرایش مورد بررسی به درصد و تعداد نقاط استفاده شده برای هر آرایش نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود شبکه‌های انتخاب شده نتایج قابل قبولی تولید نموده و حداکثر اختلاف نسبی در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی به ترتیب  $3/84\%$  و  $2/52\%$  درصد و مربوط به آرایش A است؛ بنابراین در بین چهار آرایش انتخاب شده آرایش A در مقایسه با



شکل ۶. عدد ناسلت محلی در طول میکروکانال پنجم بدست آمده برای کار تجربی فیلیپس [۲۹] و فشار ۵۰ کیلوپاسکال  
 Fig. 6. Local Nusselt number along microchannel #5 obtained in this study for the experimental study of Philips [29],  $\Delta P=50$  kPa

جدول ۳. مقایسه عدد ناسلت متوسط با مطالعات عددی چین و چن [۲۴] و قاسمی و همکاران [۳۰]

Table 3. Comparison of the average Nusselt number obtained in the present study with those of numerical studies of Chein and Chen [24] and Ghasemi et al. [30]

درصد اختلاف نسبی	قاسمی و همکاران [۳۰]	چین و چن [۲۴]	مطالعه حاضر	شرایط مسئله
۱/۱	-	۸/۴۵	۸/۳۵	$\Delta P=25$ kPa
۱/۳	-	۹/۱۳	۹/۰۱	$\Delta P=35$ kPa
۲/۶	-	۹/۹	۹/۶۴	$\Delta P=50$ kPa
۰/۸۸	۱/۱۴	-	۱/۱۳	$Ra=10^3, Ha=30$ Water-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (۰/۳)
۰	۳/۲۰	-	۳/۲۰	$Ra=10^5, Ha=30$ Water-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (۰/۳)

شرایطی که میدان مغناطیسی بر مسئله حاکم است، مقایسه‌ای با مطالعه عددی قاسمی و همکاران [۳۰]، که به بررسی اثر میدان مغناطیسی بر جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی پرداخته‌اند، انجام شده‌است که نتایج آن نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

### ۶- نتایج و بحث

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی‌ها برای جریان آب در دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه و برای اعداد هارتمن صفر،

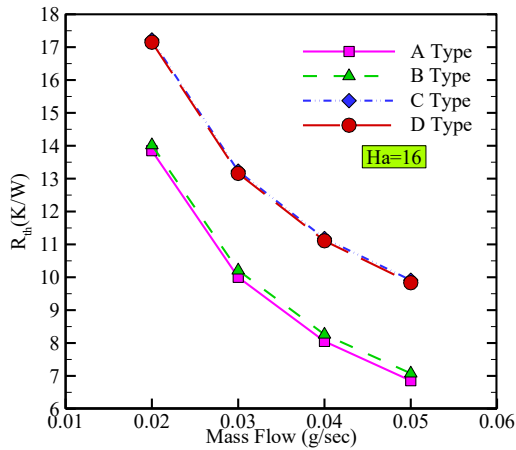
نتایج عددی سایر محققان و اطمینان از دقت نتایج شبیه‌سازی‌ها، شبیه‌سازی برای چاه‌گرمایی میکروکانالی مستطیلی در مطالعه عددی چین و چن [۲۴] برای چند افت فشار انجام شد. لازم به ذکر است که هندسه تحقیق عددی چین و چن [۲۴] همانند هندسه مطالعه تجربی فیلیپس [۲۹] است. نتایج مربوط به عدد ناسلت متوسط برای چند افت فشار، که در جدول ۳ با نتایج عددی چین و چن [۲۴] مقایسه شده‌اند، مطابقت خوبی نشان می‌دهند و لذا از صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها اطمینان بیشتری حاصل می‌شود.

همچنین به منظور صحت نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار در

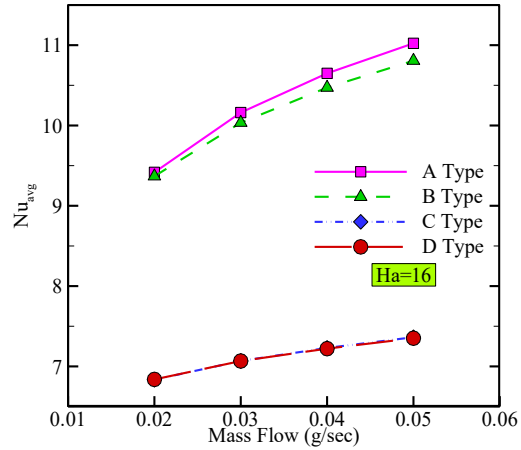
الف) تشخیص آرایش بهینه

به عنوان نمونه در شکل ۷ شاخص‌های حرارتی، ترموهیدرولیکی و تولید انتروپی برای چهار آرایش مختلف و دبی‌های جرمی مختلف ولی فقط برای عدد هارتمن ثابت ۱۶ ارائه و با یکدیگر مقایسه شده

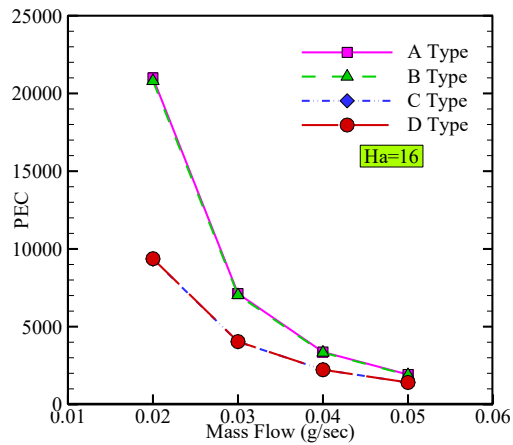
۲، ۴، ۸ و ۱۶ انجام شده است. در ادامه، در زیربخش اول چگونگی تشخیص آرایش بهینه بحث می‌شود. سپس در زیر بخش دوم به بررسی اثر تغییرات دبی جرمی و عدد هارتمن بر شاخص‌های حرارتی، ترموهیدرولیکی و تولید انتروپی در آرایش بهینه پرداخته می‌شود.



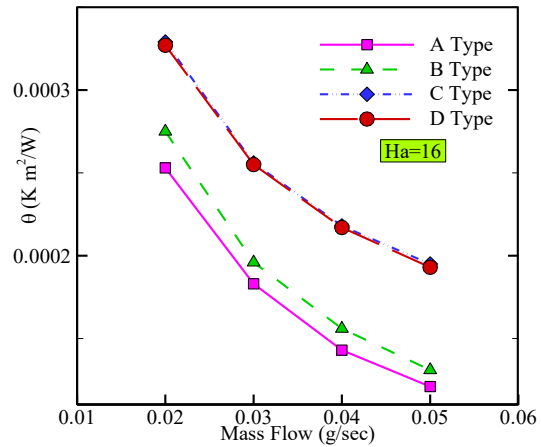
(ب)



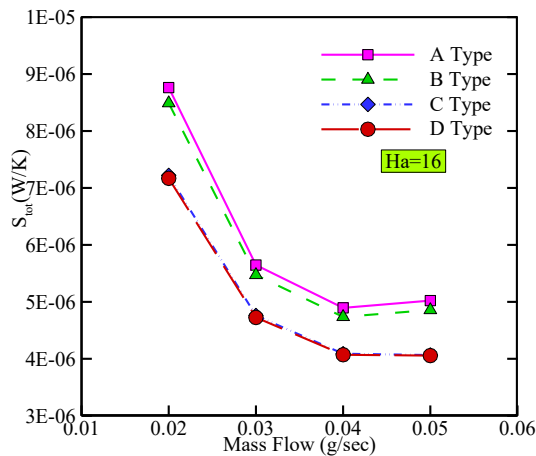
(الف)



(ت)

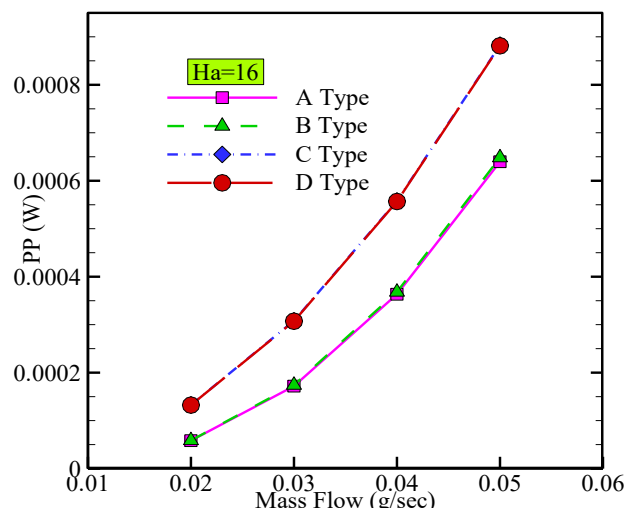


(پ)



(ث)

شکل ۷. تغییرات شاخص‌های عملکردی بر حسب دبی جرمی برای آرایش‌های مختلف در عدد هارتمن ثابت ۱۶  
Fig. 7. Performance indicators versus mass flow rate for different configurations and  $Ha=16$

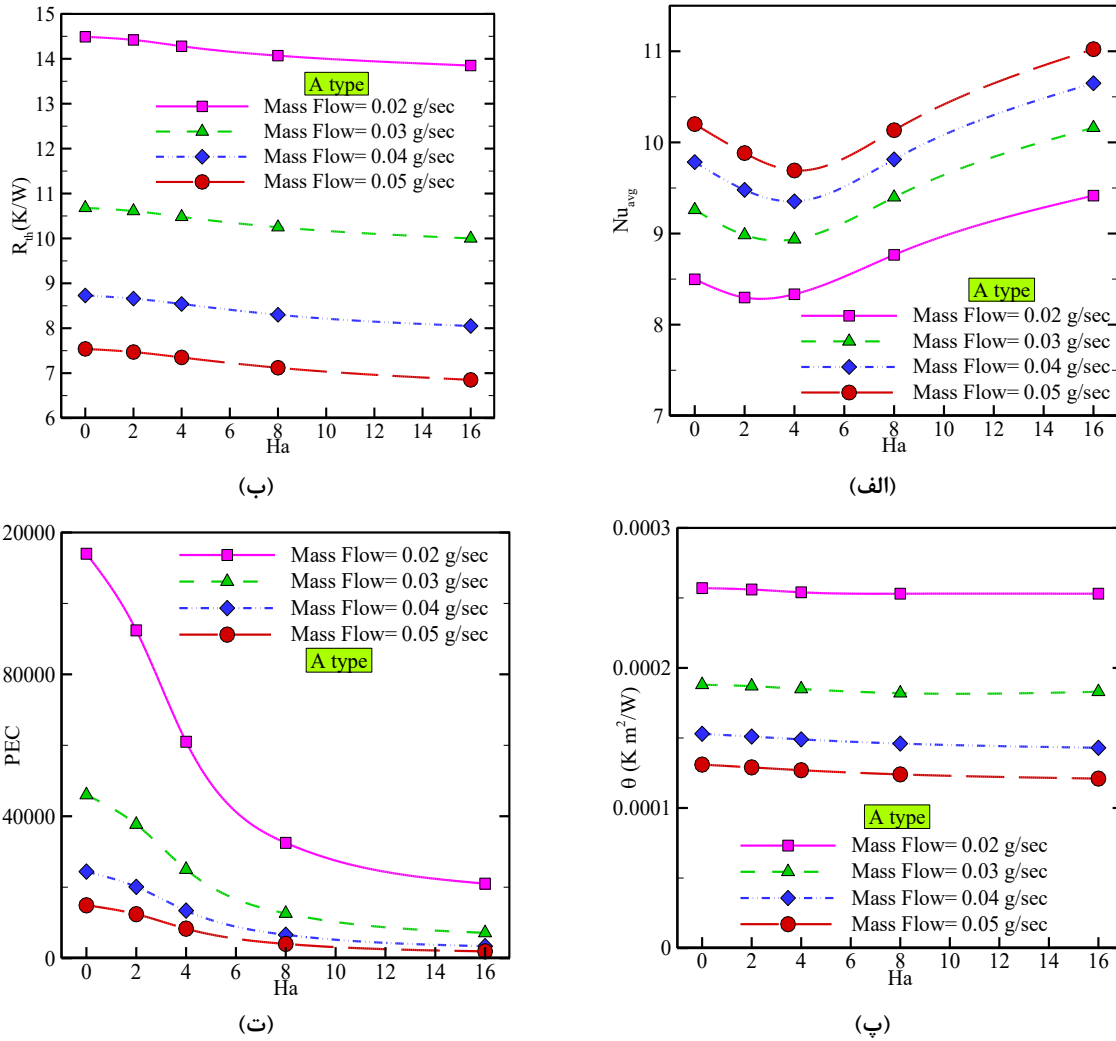


شکل ۸. توان پمپاژ بر حسب دبی جرمی در آرایش‌های مختلف در عدد هارتمن ثابت ۱۶  
**Fig. 8. Variation of pumping power versus mass flow rate for different configurations and  $Ha=16$**

از شبیه‌سازی برای هارتمن ۱۶ بدست آمد و برای همه اعداد هارتمن آرایش A بهینه تشخیص داده شد.

در شکل ۸ توان پمپاژ بر حسب دبی جرمی در آرایش‌های مختلف برای عدد هارتمن ثابت ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه آرایش‌ها با افزایش دبی جرمی توان پمپاژ افزایش می‌یابد زیرا با افزایش دبی جرمی افت فشار بیشتر می‌شود، در نتیجه طبق رابطه (۲۵) توان پمپاژ افزایش می‌یابد. سیواسانکاران و نارثین [۱۴]، که جریان در چاه گرمایی میکروکانالی ذوزنقه‌ای را به صورت عددی بررسی نمودند، نیز نشان دادند که با افزایش دبی جرمی افت فشار افزایش می‌یابد. در بین چهار آرایش مورد مطالعه، مقادیر توان پمپاژ در آرایش A حداقل است و به آرایش B نزدیک است. این تفاوت اندک مربوط به تفاوت در محل قرارگیری ورودی و خروجی جریان است. همچنین آرایش‌های C و D، به دلیل شباهت‌های هندسی مربوط به محل قرارگیری خروجی جریان و مسیر تقریباً یکسان برای عبور جرم، مقادیر توان پمپاژ مشابهی دارند. توان مورد نیاز برای پمپاژ تأثیری مستقیم بر رفتار ترموهیدرولیکی جریان در چاه گرمایی دارد؛ با مقایسه نتایج شکل ۸ با نتایج شکل ۷-ت می‌توان دریافت که در یک عدد هارتمن ثابت آرایشی که توان پمپاژ کمتری لازم دارد دارای معیار ارزیابی عملکرد بالاتری است. در خصوص نقش موثر توان مورد نیاز پمپاژ بر معیار ارزیابی عملکرد چاه گرمایی در بخش بعد بیشتر بحث می‌شود.

است. به طور کلی آرایش A و B و نیز آرایش C و D به دلیل مشابهت در ساختارشان از لحاظ شاخص‌های عملکردی رفتاری نزدیک به هم دارند. نتایج نشان می‌دهد از لحاظ شاخص‌های حرارتی (عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمایی تراشه الکترونیکی به شار حرارتی) آرایش A بر سایر آرایش‌ها برتری دارد؛ البته این برتری نسبت به آرایش C و D چشمگیرتر است. با این وجود از لحاظ تولید انترپوی کلی آرایش D نسبت به سایر آرایش‌ها عملکرد بهتری دارد، در صورتی که از لحاظ شاخص‌های حرارتی و ترموهیدرولیکی عملکرد ضعیف‌تری دارد. آرایش A نسبت به آرایش D از نظر عدد ناسلت متوسط بین ۲۷/۳۸ تا ۳۳/۳۱ درصد، از نظر مقاومت حرارتی بین ۲۳/۸۲ تا ۴۳/۵ درصد، از نظر نسبت بیشینه اختلاف دمایی تراشه الکترونیکی به شار حرارتی بین ۲۹/۲۴ تا ۵۹/۵۰ درصد و از نظر معیار ارزیابی عملکرد بین ۲۶/۵۶ تا ۵۵/۲۴ درصد برتری دارد، در حالی که از لحاظ تولید انترپوی کلی آرایش D نسبت به آرایش A بین ۱۹/۴۵ تا ۲۳/۶۴ درصد برتری دارد. از نظر همه شاخص‌های حرارتی به خصوص بیشینه اختلاف دمایی تراشه الکترونیکی به شار حرارتی برتری آرایش A بر آرایش D قابل ملاحظه است، لذا با توجه به انتظاری که از یک چاه حرارتی وجود دارد آرایش A بر آرایش D ارجح و در مجموع آرایش بهینه است. پس از آن به ترتیب آرایش B، D و C قرار دارند. لازم به ذکر است که برای سایر اعداد هارتمن نیز نتایج مشابه با نتایج بدست آمده



شکل ۹. تغییرات شاخص‌های حرارتی و معیار ترموهیدرولیکی بر حسب عدد هارتمن در دبی‌های جرمی مختلف برای آرایش A  
 Fig. 9. Variations of thermal and thermo-hydraulic indicators versus Hartmann number for different mass flow rate and A-type

۱۵، ۲۴] نیز در مطالعات خود نشان داده‌اند که افزایش دبی جرمی (یا افت فشار و عدد رینولدز) که منجر به افزایش سرعت جریان می‌شود، موجب افزایش عدد ناسلت متوسط و بهبود انتقال حرارت می‌شود. همچنین نتایج شکل ۹-الف نشان می‌دهد در یک دبی جرمی ثابت با افزایش عدد هارتمن ابتدا عدد ناسلت متوسط کاهش و سپس افزایش می‌یابد. عدد ناسلت متوسط در دبی جرمی ۰/۰۲ گرم بر ثانیه در عدد هارتمن ۲ و در دبی‌های جرمی ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه در عدد هارتمن ۴ حداقل است. در حالی که حداکثر عدد ناسلت متوسط در همه دبی‌های جرمی مربوط به عدد هارتمن ۱۶ است.

محققان نتایج متفاوتی از تاثیر عدد هارتمن بر تغییرات عدد ناسلت مشاهده نمودند؛ در برخی مطالعات افزایش عدد هارتمن

(ب) اثر تغییرات دبی جرمی و عدد هارتمن بر شاخص‌های عملکردی با توجه به انتخاب آرایش A به عنوان آرایش بهینه در زیربخش قبلی، در این زیربخش به بررسی اثر تغییر دبی جرمی و عدد هارتمن بر شاخص‌های عملکردی در آرایش بهینه پرداخته می‌شود. در شکل ۹ تغییر مقادیر شاخص‌های حرارتی (عدد ناسلت متوسط، مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی) و شاخص ترموهیدرولیکی (معیار ارزیابی عملکرد) با تغییر عدد هارتمن در دبی‌های جرمی مختلف برای آرایش A نشان داده شده است.

نتایج شکل ۹-الف نشان می‌دهد که برای همه اعداد هارتمن با افزایش دبی جرمی ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. سایر محققان [۱۴،

میدان مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی تقریباً ثابت می‌ماند، یا به عبارت بهتر کاهش آن بسیار جزئی است؛ دلیل این روند این است که با افزایش عدد هارتمن دمای بیشینه و کمینه تراشه الکترونیکی تقریباً به یک اندازه کاهش می‌یابد و سبب می‌شود که اختلاف این دو دما تقریباً ثابت بماند. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۶ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه به ترتیب ۱/۸۱، ۲/۵۹، ۶/۱۸ و ۷/۹۱ درصد کاهش یافته است. در یک عدد هارتمن ثابت، با افزایش دبی جرمی دمای بیشینه و کمینه تراشه الکترونیکی کاهش می‌یابد اما مقدار کاهش دمای بیشینه بیشتر است لذا باعث کاهش نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی می‌شود. به عنوان نمونه در عدد هارتمن ۱۶ با افزایش دبی جرمی از ۰/۰۳ گرم بر ثانیه به ۰/۰۵ گرم بر ثانیه دمای بیشینه و کمینه تراشه الکترونیکی به ترتیب ۴/۰۳ و ۰/۹۱ کلین کاهش می‌یابد.

نتایج شکل ۹-ت نشان می‌دهد در یک دبی جرمی ثابت با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن معیار ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد. با افزایش عدد هارتمن نیروی لورنتز افزایش یافته و موجب افزایش افت فشار می‌شود در نتیجه توان پمپاژ افزایش می‌یابد. این در شرایطی است که حرارت جذب شده توسط جریان عبوری از روی چاه گرمایی ثابت است، بنابراین معیار ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه در دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه با افزایش عدد هارتمن از ۲ به ۱۶ افت فشار از ۲۱۳۱/۸۴ پاسکال به ۲۲۴۳۲/۹ پاسکال می‌رسد که منجر به افزایش ۵۵۳/۳۸ درصدی توان پمپاژ می‌شود. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۶ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه معیار ارزیابی عملکرد به ترتیب ۸۱/۶۱، ۸۴/۵۱، ۸۶/۱۵ و ۸۷/۱۵ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین در یک عدد هارتمن ثابت، با افزایش دبی جرمی معیار ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد، زیرا افزایش دبی جریان منجر به افزایش سرعت ورودی می‌شود؛ افزایش سرعت ورودی منجر به افزایش فشار ورودی و کاهش دمای خروجی می‌شود، در نتیجه حرارت جذب شده کاهش و توان پمپاژ افزایش می‌یابد و منجر به کاهش معیار ارزیابی عملکرد می‌شود.

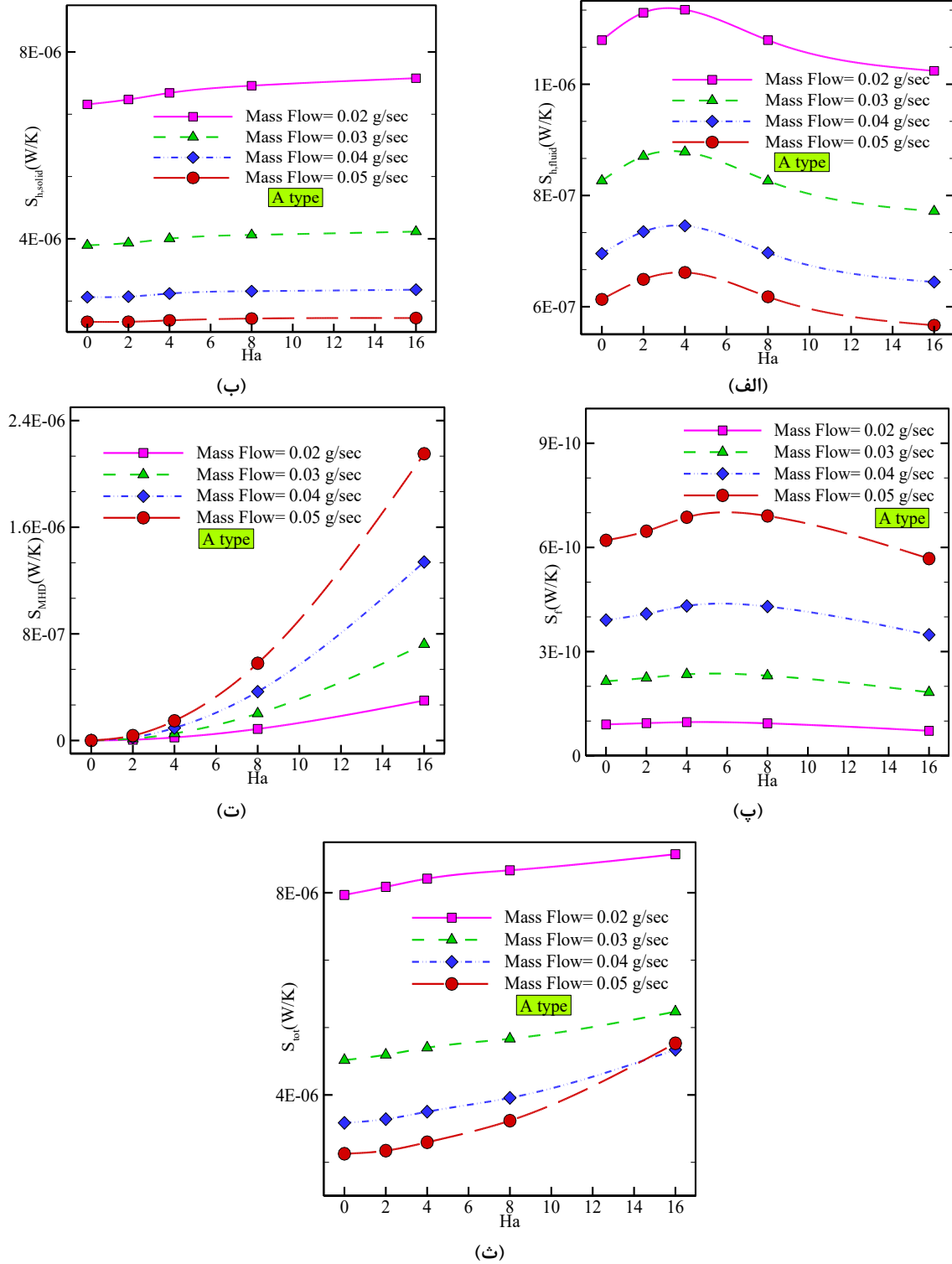
موجب کاهش گرادیان‌های دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی و به تبع آن موجب کاهش عدد ناسلت متوسط شده است [۸، ۳۱-۳۳] و در برخی دیگر از مطالعات موجب افزایش گرادیان‌های دما، ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت متوسط شده است [۶-۳، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵]. به عنوان نمونه در مطالعه حاضر برای دبی جرمی ۰/۰۲ گرم بر ثانیه با افزایش عدد هارتمن از صفر به ۲ ضریب انتقال حرارت جابجایی از  $26285/1 \text{ W/m}^2\text{K}$  به  $25667 \text{ m}^2\text{K}$  کاهش می‌یابد لذا عدد ناسلت متوسط ۲/۳۵ درصد کاهش می‌یابد؛ سپس با افزایش عدد هارتمن از ۲ به ۱۶ ضریب انتقال حرارت جابجایی از  $25667 \text{ W/m}^2\text{K}$  به  $29124/5 \text{ W/m}^2\text{K}$  افزایش می‌یابد در نتیجه عدد ناسلت متوسط ۱۳/۴۷ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۴ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه عدد ناسلت متوسط به ترتیب ۳/۴۹، ۴/۴۱ و ۴/۹۸ درصد کاهش و با افزایش عدد هارتمن از ۴ تا ۱۶ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه به ترتیب ۹/۷۳، ۸/۸۴ و ۸/۰۶ درصد افزایش یافته است.

نتایج شکل ۹-ب نشان می‌دهد در یک دبی جرمی ثابت با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن مقاومت حرارتی با شیب کمی کاهش می‌یابد. با اعمال و افزایش شدت میدان مغناطیسی دمای متوسط و نیز دمای حداکثر سیلیکون (دمای بیشینه چاه گرمایی یا تراشه الکترونیکی) کاهش می‌یابد در نتیجه مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. حاجی‌علی‌گل و همکاران [۵] نیز نشان دادند با افزایش عدد هارتمن مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد مقاومت حرارتی با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۶ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه به ترتیب ۴/۳۹، ۶/۳۱، ۷/۸۷ و ۹/۱۵ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین با افزایش دبی جرمی مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. با افزایش دبی ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش یافته و نرخ انتقال حرارت از بخش سیلیکونی چاه گرمایی به آب افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه باعث کاهش بیشینه دمای تراشه الکترونیکی می‌شود. در چنین شرایطی اختلاف دمای ورودی سیال و بیشینه دمای تراشه الکترونیکی کاهش یافته و باعث کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. حاجی‌علی‌گل و همکاران [۵] نیز به نتایج مشابهی دست یافتند.

نتایج شکل ۹-پ نشان می‌دهد در یک دبی جرمی ثابت با اعمال

سیال با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۴ افزایش و سپس با افزایش عدد هارتمن از ۴ تا ۱۶ کاهش می‌یابد. مطابق رابطه (۲۷) روند این تغییرات به گرادیان‌های دما وابسته است. به عنوان نمونه برای

در شکل ۱۰ تغییرات ترم‌های مختلف تولید انترופی بر حسب عدد هارتمن در دبی‌های جرمی مختلف برای آرایش A نشان داده شده است. شکل ۱۰-الف می‌دهد تولید انترופی حرارتی



شکل ۱۰. تغییر ترم‌های مختلف تولید انترופی با عدد هارتمن در دبی‌های جرمی مختلف برای آرایش A  
 Fig. 10. Variations of different entropy generation components versus Hartmann number for different mass flow rate and A-type



تولید انترویی حرارتی جامد با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۶ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه به ترتیب ۸/۱۶، ۷/۵۹، ۵/۷۹ و ۳/۶۵ درصد افزایش یافته است. مشابه با آنچه در تولید انترویی حرارتی سیال بیان شد، با افزایش دبی جرمی، به دلیل کاهش گرادیان‌های دما، تولید انترویی حرارتی جامد کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۰-پ تولید انترویی اصطکاکی بر حسب عدد هارتمن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود روند کلی تغییرات تولید انترویی اصطکاکی مشابه با روند تغییرات تولید انترویی حرارتی سیال است. مقادیر مربوط به تولید انترویی اصطکاکی در اعداد هارتمن ۴ و ۸ به هم نزدیک هستند در حالی که مقادیر مربوط به تولید انترویی حرارتی سیال در اعداد هارتمن ۲ و ۴ به هم نزدیک هستند. در دبی‌های جرمی ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ گرم بر ثانیه تولید انترویی اصطکاکی در عدد هارتمن ۴ و ۱۶ به ترتیب بیشینه و کمینه است، در شرایطی که در دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه در عدد هارتمن ۸ و ۱۶ به ترتیب بیشینه و کمینه است. تغییرات تولید انترویی اصطکاکی با تغییر عدد هارتمن وابسته به اثرات: ۱- گرادیان‌های سرعت ۲- لزجت دینامیکی ۳- دمای متوسط سیال است. به عنوان نمونه برای دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه، در اعداد هارتمن صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ مجذور متوسط گرادیان‌های سرعت بر حسب  $1/s^2$  به ترتیب برابر با ۵۷۶۹۲، ۵۹۹۹۸/۵، ۶۳۴۴۶/۱، ۶۳۵۱۸/۹ و ۵۲۰۶۴/۵؛ دمای متوسط سیال بر حسب کلویین به ترتیب برابر با ۳۰۳/۷۷۸، ۳۰۳/۶۷۵، ۳۰۳/۴۹۷، ۳۰۳/۳۲۲ و ۳۰۳/۲ لزجت دینامیکی بر حسب پاسکال ثانیه به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۷۸۹، ۰/۰۰۰۷۹۱، ۰/۰۰۰۷۹۴ و ۰/۰۰۰۷۹۷ و ۰/۰۰۰۷۹۹ هستند. روند افزایشی لزجت دینامیکی و روند کاهش دمای متوسط سیال منجر به افزایش ترم تولید انترویی اصطکاکی می‌شود اما چون تغییرات گرادیان‌های سرعت با افزایش عدد هارتمن چشمگیرتر از تغییرات دو پارامتر لزجت دینامیکی و دمای متوسط سیال با عدد هارتمن است لذا اثرگذاری بیشتری خواهد داشت؛ همان طور که بیان شد مجذور متوسط گرادیان‌های سرعت در دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه، برای عدد هارتمن ۸ بیشینه و برای عدد هارتمن ۱۶ کمینه است و این نتیجه با نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰-پ مطابقت دارد. حاجی‌علی‌گل و همکاران [۵] و سلطانی‌پور و همکاران [۹] نشان دادند که با افزایش عدد هارتمن تولید انترویی اصطکاکی

دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه، مجذور متوسط گرادیان‌های دما بر حسب  $K^2/m^2$  در اعداد هارتمن صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ به ترتیب برابر است با  $۲/۲۱ \times 10^7$ ،  $۲/۳۴ \times 10^7$ ،  $۲/۳۹ \times 10^7$ ،  $۲/۲۳ \times 10^7$  و  $۲/۰۴ \times 10^7$  است. همان‌طور که مشخص است در عدد هارتمن ۴ و ۱۶ به ترتیب بیشینه و کمینه مجذور متوسط گرادیان‌های دما رخ می‌دهد که با روند نشان داده شده در شکل ۱۰-الف مطابقت دارد. در مطالعات حاجی‌علی‌گل و همکاران [۵] و سلطانی‌پور و همکاران [۹] با افزایش عدد هارتمن تولید انترویی حرارتی سیال به صورت پیوسته کاهش یافت. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد تولید انترویی حرارتی سیال با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۴ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه به ترتیب ۷/۸۹ و ۷/۱۸، ۶/۲۶، ۵/۰۸، ۱۳/۵۵ و ۱۴/۳۶ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش دبی جرمی، به دلیل کاهش گرادیان‌های دما، تولید انترویی حرارتی سیال کاهش یافته است. سایر محققین [۵، ۹، ۳۴] نیز نشان داده‌اند با افزایش عدد رینولدز، که منجر به افزایش مولفه‌های سرعت و کاهش گرادیان‌های دما می‌شود، تولید انترویی حرارتی سیال کاهش می‌یابد.

نتایج در شکل ۱۰-ب نشان می‌دهد با افزایش عدد هارتمن تولید انترویی حرارتی جامد با شیب کم افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه برای دبی جرمی ۰/۰۴ گرم بر ثانیه، در اعداد هارتمن صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ مجذور متوسط گرادیان‌های دما در بخش جامد بر حسب  $K^2/m^2$  به ترتیب برابر با ۲۴۳۹۹۱، ۲۴۴۷۹۲، ۲۵۰۲۹۴، ۲۵۴۱۹۹ و ۲۵۶۴۲۵؛ متوسط دمای جامد بر حسب کلویین به ترتیب برابر با ۳۰۶/۲۴۵، ۳۰۶/۱۷۶، ۳۰۵/۷۶۹ و ۳۰۵/۵۱۴ و ضریب هدایت حرارتی سیلیکون بر حسب  $W/m.K$  به ترتیب برابر با ۱۶۷/۵۳، ۱۶۷/۵۰۲ و ۱۶۷/۵۹۲، ۱۶۷/۶۹۲ و ۱۶۷/۷۹۴ هستند. با افزایش عدد هارتمن دمای متوسط بخش جامد کاهش و گرادیان‌های دما افزایش می‌یابد؛ از طرفی با کاهش دمای متوسط سیلیکون، ضریب هدایت حرارتی آن افزایش می‌یابد. مطابق با رابطه (۲۸) افزایش ضریب هدایت حرارتی سیلیکون و کاهش دمای متوسط آن منجر به افزایش تولید انترویی حرارتی جامد می‌شود. افزایش گرادیان‌های دما نیز منجر به افزایش تولید انترویی حرارتی جامد می‌شود. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد

افزایش می‌یابد. آقای و همکاران [۳۵] نشان دادند با افزایش عدد هارتمن تولید انتروپی اصطکاکی کاهش می‌یابد. حسین و همکاران [۳۱] نشان دادند روند تغییرات تولید انتروپی اصطکاکی با عدد هارتمن نامنظم است، به طوری که برای اعداد ریچاردسون ۰.۱ و ۱۰ و ۲۰ در یک نقطه تولید انتروپی اصطکاکی حداقل می‌شود و برای اعداد ریچاردسون ۰/۱ و ۰/۱ تولید انتروپی اصطکاکی با افزایش عدد هارتمن پیوسته افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر گرادیان‌های سرعت با افزایش عدد هارتمن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند در نتیجه تغییرات تولید انتروپی اصطکاکی نیز مشابه آن است؛ در حالی که در دو تحقیق [۵ و ۹] با افزایش عدد هارتمن گرادیان‌های سرعت پیوسته افزایش می‌یابند و لذا تولید انتروپی اصطکاکی پیوسته افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است ثابت در نظر گرفتن خواصی مثل لزجت دینامیکی علی‌رغم تغییر دما باعث خطای محاسباتی می‌شود و در بدست آوردن توزیع سرعت و دما و نیز محاسبه تولید انتروپی اصطکاکی نقش مهمی دارد؛ به این نکته مهم در این تحقیق توجه شده است. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد تولید انتروپی اصطکاکی با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۴ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ گرم بر ثانیه به ترتیب ۷/۳۵، ۹/۳۹ و ۱۰/۴۲ درصد افزایش و با افزایش عدد هارتمن از ۴ تا ۱۶ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ گرم بر ثانیه به ترتیب ۲۵/۸۸، ۲۲/۱۰ و ۱۹/۲۹ درصد کاهش یافته است. برای دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه تولید انتروپی اصطکاکی با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۸ به مقدار ۱۱/۳۱ درصد افزایش و با افزایش عدد هارتمن از ۸ تا ۱۶ به مقدار ۱۷/۷۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی جرمی به دلیل افزایش سرعت، تولید انتروپی اصطکاکی افزایش می‌یابد؛ سایر محققین [۵، ۹، ۳۴، ۳۶، ۳۷] نیز در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که با افزایش افت فشار، سرعت و یا عدد رینولدز تولید انتروپی اصطکاکی افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰-ت تولید انتروپی مغناطیسی بر حسب عدد هارتمن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد هارتمن تولید انتروپی مغناطیسی افزایش می‌یابد. به‌طور کلی تولید انتروپی مغناطیسی وابسته به: ۱- شدت میدان مغناطیسی، ۲- دمای متوسط سیال و ۳- مولفه‌های سرعت سیال در دو راستای عمود بر جهت اعمال میدان مغناطیسی است. با افزایش عدد هارتمن شدت میدان

مغناطیسی افزایش یافته و طبق رابطه (۳۰) با افزایش شدت میدان مغناطیسی تولید انتروپی مغناطیسی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در تحلیل شکل ۱۰-ب بیان شد با افزایش عدد هارتمن دمای متوسط سیال کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد هارتمن مولفه‌های سرعت سیال در دو راستای  $x$  و  $y$  کاهش می‌یابد. از آنجایی که در هر مرحله با افزایش عدد هارتمن، اثر کاهش دمای متوسط سیال و افزایش شدت میدان مغناطیسی بیش‌تر از اثر کاهش مولفه‌های سرعت است، تولید انتروپی مغناطیسی افزایش می‌یابد. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد تولید انتروپی حرارتی مغناطیسی با افزایش عدد هارتمن از ۲ تا ۱۶ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه به ترتیب ۵۰۶۴/۸۰، ۵۳۶۰/۷۷، ۵۵۵۹/۱۰ و ۵۶۹۳/۲۶ درصد افزایش یافته است. سایر محققان [۵ و ۹] نیز نشان دادند که با افزایش عدد هارتمن تولید انتروپی مغناطیسی افزایش می‌یابد. نتایج شکل ۱۰-ت نشان می‌دهد با افزایش دبی جرمی تولید انتروپی مغناطیسی افزایش یافته است. با افزایش دبی جرمی، سرعت سیال افزایش و دمای متوسط سیال کاهش یافته و مطابق با رابطه (۳۰) موجب افزایش تولید انتروپی مغناطیسی می‌شود. سایر محققان نیز نشان داده‌اند با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان و به تبع آن تولید انتروپی مغناطیسی افزایش می‌یابد [۵ و ۹].

در شکل ۱۰-ث تولید انتروپی کل بر حسب عدد هارتمن نشان داده شده است. تغییرات تولید انتروپی کل متأثر از تغییرات چهار مولفه تولید انتروپی است که در مورد آن بحث شد. از لحاظ کمی، مقادیر تولید انتروپی حرارتی جامد بیشتر از مقادیر تولید انتروپی حرارتی سیال، مغناطیسی و اصطکاکی هستند بنابراین نقش مهم‌تری در روند تغییرات تولید انتروپی کل دارند؛ از این‌رو همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات تولید انتروپی کل، مشابه روند تغییرات تولید انتروپی حرارتی جامد است، به‌گونه‌ای که با افزایش عدد هارتمن تولید انتروپی کل افزایش و با افزایش دبی جرمی تولید انتروپی کل کاهش یافته است. البته در عدد هارتمن ۱۶ با افزایش دبی جرمی از ۰/۰۴ به ۰/۰۵ گرم بر ثانیه مقدار تولید انتروپی کل اندکی افزایش یافته است، و دلیل آن افزایش چشمگیر تولید انتروپی مغناطیسی با افزایش دبی جرمی از ۰/۰۴ به ۰/۰۵ گرم بر ثانیه است. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد تولید انتروپی حرارتی کل با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۶ برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم

دبی جرمی عدد ناسلت متوسط، تولید انتروپی اصطکاکی و تولید انتروپی مغناطیسی افزایش و مقاومت حرارتی، نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی، معیار ارزیابی عملکرد، تولید انتروپی حرارتی سیال، تولید انتروپی حرارتی جامد و تولید انتروپی کل کاهش می‌یابد.

### مراجع

- [1] B.K. Jha, P.B. Malgwi, B. Aina, Hall effects on MHD natural convection flow in a vertical microchannel, *Alexandria Engineering Journal*, 993-983 (2018) (2)57.
- [2] G. Zhao, Z. Wang, Y. Jian, Heat transfer of the MHD nanofluid in porous microtubes under the electrokinetic effects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 830-821 (2019) 130.
- [3] S. Aminossadati, A. Raisi, B. Ghasemi, Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 1382-1373 (2011) (10)46.
- [4] A. Malvandi, D. Ganji, Brownian motion and thermophoresis effects on slip flow of alumina/water nanofluid inside a circular microchannel in the presence of a magnetic field, *International Journal of Thermal Sciences*, 206-196 (2014) 84.
- [5] N. Hajjaligol, A. Fattahi, M.H. Ahmadi, M.E. Qomi, E. Kakoli, MHD mixed convection and entropy generation in a -3D microchannel using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 46 42-30 (2015).
- [6] M. Kiyasatfar, N. Pourmahmoud, Laminar MHD flow and heat transfer of power-law fluids in square microchannels, *International Journal of Thermal Sciences*, -26 (2016) 99 35.
- [7] A.R. Rahmati, H. Khorasanizadeh, M.R. Arabyarmohammadi, Application of Lattice Boltzmann Method for Simulating MGD in a Microchannel under Magnetic Field Effects, *Modares Mechanical Engineering*, 240-229 (2016) (7)16.
- [8] M.A. Hamdan, A.H. Al-Assaf, M.A. Al-Nimr, The effect of slip velocity and temperature jump on the hydrodynamic

بر ثانیه به ترتیب ۱۰/۱۳، ۲۰/۴۸، ۴۱/۹۹ و ۷۷/۰۷ درصد افزایش یافته است.

### ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی، ترموهیدرولیکی و تولید انتروپی جریان آب در چاه گرمایی میکروکانالی سیلیکونی با چهار آرایش مختلف ورود و خروج جریان بررسی شده است. چاه گرمایی میکروکانالی دارای شکل کلی دوزنقه‌ای و شامل ۵ میکروکانال دوزنقه‌ای است. معادلات حاکم با روش حجم محدود و الگوریتم کاپلد حل شده‌اند. انتقال حرارت توأمان در چاه گرمایی لحاظ شده است، به طوری که معادله انرژی در هر دو بخش جامد و سیال حل شده‌اند. حرارت تولیدی توسط تراشه الکترونیکی، تعبیه شده در کف چاه گرمایی، ۵۰ کیلووات بر مترمربع، دبی جرمی ورودی به چاه گرمایی ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ گرم بر ثانیه و اعداد هارتمن صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان دادند:

- ۱- با در نظر گرفتن همه شاخص‌های عملکردی آرایش A بهترین آرایش است؛ بعد از آن به ترتیب آرایش B، D و C قرار دارند.
- ۲- در بهترین آرایش، بهترین عملکرد حرارتی برای دبی جرمی ۰/۰۵ گرم بر ثانیه و عدد هارتمن ۱۶ رخ می‌دهد که در آن عدد ناسلت متوسط حداکثر و مقاومت حرارتی و نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی حداقل است.
- ۳- با بررسی معیار ارزیابی عملکرد به عنوان معیاری از رفتار ترموهیدرولیکی جریان و با محاسبه تولید انتروپی کل به عنوان معیاری از قانون دوم ترمودینامیک در بهترین آرایش، بهترین عملکرد برای دبی جرمی ۰/۰۲ گرم بر ثانیه و عدد هارتمن صفر رخ می‌دهد.
- ۴- در بهترین آرایش برای یک دبی جرمی ثابت با افزایش عدد هارتمن عدد ناسلت متوسط ابتدا کاهش و سپس افزایش، تولید انتروپی حرارتی سیال و تولید انتروپی اصطکاکی ابتدا افزایش و سپس کاهش، مقاومت حرارتی، معیار ارزیابی عملکرد و نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی پیوسته کاهش، تولید انتروپی حرارتی جامد، تولید انتروپی مغناطیسی و تولید انتروپی کل پیوسته افزایش می‌یابد.
- ۵- در بهترین آرایش برای یک عدد هارتمن ثابت با افزایش

- [16] C. Yang, Y. Jian, Z. Xie, F. Li, Heat transfer characteristics of magnetohydrodynamic electroosmotic flow in a rectangular microchannel, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 190-180 (2019) 74.
- [17] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, Performance Evaluation of a Trapezoidal Microchannel Heat Sink with Various Entry/Exit Configurations Utilizing Variable Properties, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, (6)10 1559-1547 (2017).
- [18] 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*, 38-27 (2017) (12)16.
- [19] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, Three dimensional numerical study on a trapezoidal microchannel heat sink with different inlet/outlet arrangements utilizing variable properties nanofluid, *Transp Phenom Nano Micro Scales*, 151-133 (2018) (2)6.
- [20] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, R. Sadeghi, "Investigation of nanofluid flow field and conjugate heat transfer in a MCHS with four different arrangements", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2)51 116-113 (2019) (In Persian).
- [21] A.R.Rahmati, M. Sepehrnia, "Three Dimensional Simulation of Helium Gas Flow in an Aluminum Heat Sink with Rectangular Microchannel in Slip Flow Regime", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (DOI: 10.22060/mej.2018) ,(2018.13345.5604) (In Persian).
- [22] H. Khorasanizadeh, M. Sepehrnia, "Thermal performance and entropy generation analysis of nanofluid flow in a trapezoidal heat sink with different arrangements", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (DOI: 10.22060/mej.2018) ,(2018.13070.5521) (In Persian).
- [23] F.P. Incropera, A.S. Lavine, T.L. Bergman, D.P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Wiley, 2007.
- [24] R. Chein, J. Chen, Numerical study of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance, *International Journal of Thermal Sciences*, 1638-1627 (2009) (8)48.
- and thermal behaviors of MHD forced convection flows in horizontal microchannels, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 103-95 (2016) (2)40.
- [9] H. Soltanipour, S. Khalilarya, S.Y. Motlagh, I. Mirzaee, The effect of position-dependent magnetic field on nanofluid forced convective heat transfer and entropy generation in a microchannel, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, -345 (2017) (1)39 355.
- [10] M. Abbaszadeh, A. Ababaei, A.A.A. Arani, A.A. Sharifabadi, MHD forced convection and entropy generation of CuO-water nanofluid in a microchannel considering slip velocity and temperature jump, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 790-775 (2017) (3)39.
- [11] A. López, G. Ibáñez, J. Pantoja, J. Moreira, O. Lastres, Entropy generation analysis of MHD nanofluid flow in a porous vertical microchannel with nonlinear thermal radiation, slip flow and convective-radiative boundary conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 994-982 (2017) 107.
- [12] S. Hosseini, M. Sheikholeslami, M. Ghasemian, D. Ganji, Nanofluid heat transfer analysis in a microchannel heat sink (MCHS) under the effect of magnetic field by means of KKL model, *Powder Technology*, 47-36 (2018) 324.
- [13] S. Noreen, S. Waheed, A. Hussanan, Peristaltic motion of MHD nanofluid in an asymmetric micro-channel with Joule heating, wall flexibility and different zeta potential, *Boundary Value Problems*, 12 (2019) (1)2019.
- [14] S. Sivasankaran, K. Narrein, Influence of Geometry and Magnetic Field on Convective Flow of Nanofluids in Trapezoidal Microchannel Heat Sink, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 10-1.
- [15] M. Kalteh, S.S. Abedinzadeh, Numerical investigation of MHD nanofluid forced convection in a microchannel using lattice Boltzmann method, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 34-23 (2018) (1)42.

- [32] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G. Sheikhzadeh, M. Abbaszadeh, Numerical study of magnetic field on mixed convection and entropy generation of nanofluid in a trapezoidal enclosure, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 145-133 (2016) 403.
- [33] M. Pirmohammadi, M. Ghassemi, G.A. Sheikhzadeh, The effect of a magnetic field on buoyancy-driven convection in differentially heated square cavity, in: 2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, IEEE, 2008, pp. 6-1.
- [34] N. Pourmahmoud, H. Soltanipour, I. Mirzaee, THE EFFECTS OF LONGITUDINAL RIBS ON ENTROPY GENERATION FOR LAMINAR FORCED CONVECTION IN A MICRO-CHANNEL, *Thermal Science*, 2016) (6)20).
- [35] A. Aghaei, G. Sheikhzadeh, H. Ehteram, M. Hajiahmadi, MHD natural convection and entropy generation of variable properties nanofluid in a triangular enclosure, *Transp Phenom Nano Micro Scales*, 45-37 (2015) (1)3.
- [36] J. Guo, M. Xu, J. Cai, X. Huai, Viscous dissipation effect on entropy generation in curved square microchannels, *Energy*, 5423-5416 (2011) (8)36.
- [37] J. Guo, M. Xu, Y. Tao, X. Huai, The effect of temperature-dependent viscosity on entropy generation in curved square microchannel, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 91-85 (2012) 52.
- [25] V.L. Vinodhan, K. Rajan, Computational analysis of new microchannel heat sink configurations, *Energy Conversion and Management*, 604-595 (2014) 86.
- [26] S. Ferrouillat, A. Bontemps, J.-P. Ribeiro, J.-A. Gruss, O. Soriano, Hydraulic and heat transfer study of SiO<sub>2</sub>/water nanofluids in horizontal tubes with imposed wall temperature boundary conditions, *International journal of heat and fluid flow*, 439-424 (2011) (2)32.
- [27] M. Rashidi, S. Abelman, N.F. Mehr, Entropy generation in steady MHD flow due to a rotating porous disk in a nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 525-515 (2013) 62.
- [28] H. Abbassi, Entropy generation analysis in a uniformly heated microchannel heat sink, *Energy*, (2007) (10)32 1947-1932.
- [29] R.J. Phillips, *Microchannel Heat Sinks*, Lincoln Laboratory Journal, 1988) (1)1).
- [30] B. Ghasemi, S. Aminossadati, A. Raisi, Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, 1756-1748 (2011) (9)50.
- [31] S. Hussain, S.E. Ahmed, T. Akbar, Entropy generation analysis in MHD mixed convection of hybrid nanofluid in an open cavity with a horizontal channel containing an adiabatic obstacle, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1066-1054 (2017) 114.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Sepehrnia, H. Khorasanizadeh, M.B. Shafii, Numerical Simulation of Magnetic Field Effect on Thermal and Thermo-Hydraulic Performance and Entropy Generation of a Silicon Microchannel Heat Sink Under Uniform Heat Flux, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 517-538.*

DOI: 10.22060/mej.2019.16269.6316



