

بررسی عددی افزایش انتقال گرما از چاه گرمایی کامپیوترها با به کارگیری فوم‌های فلزی

فرشید اصلانی*

فارغ‌التحصیل، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تورج یوسفی

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

امروزه با پیشرفت فناوری، به وسایل الکترونیکی با سرعت‌های بالا در پردازش و در اندازه‌های کوچک نیاز است. فوم‌های فلزی با توجه به چگالی کمی که دارند، برای کاربردهای زیادی به‌منظور جذب انرژی و مقاصد انتقال گرمایی، توصیه می‌شوند. در این مقاله چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم‌های فلزی شبیه‌سازی شده و نتایج آن با چاه گرمایی ساده پره‌دار مقایسه شده است. در چاه گرمایی ساخته شده از فوم‌های آلومینیومی با تخلخل ۹۵/۶ درصد مقدار ضریب انتقال گرمایی جابجایی تا ۳۱/۱۲۷ درصد افزایش می‌یابد در قسمت دیگری از این مقاله چاه گرمایی پره‌دار را که در بین پره‌های آن فوم فلزی قرار گذاشته شده، مدل‌سازی شده و با توجه به نتایج، عدد نوسلت در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی با تخلخل ۹۵/۶ درصد در حالت پره‌دار می‌تواند تا ۲ برابر نسبت به حالت بدون پره افزایش یابد؛ و در نهایت در قسمت پایانی تأثیر پارامترهایی همچون دبی جرمی، ارتفاع چاه گرمایی و تخلخل فوم چاه گرمایی از چاه گرمایی‌ها مشخص شده است.

واژه‌های کلیدی: چاه گرمایی، فوم فلزی، انتقال گرما.

Numerical Study of Heat Transfer Enhancement from Computer Heat Sinks by Using Metal Foams

F. Aslani

Department of Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran

T. Yousefi

Department of Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran

Abstract

Nowadays, with the advancement of technology, high-speed electronic instruments with small sizes are required. Regarding the low density of metal foams, they are recommended for many applications in order to energy absorption and heat transfer purposes. In this paper, the heat sinks made of metal-foams are simulated and the results are compared with simple finned heat sinks. In the heat sinks that made from aluminum foams with porosity value of 95.6%, the amount of heat transfer coefficient of displacement increases up to 31.127%. In another part of the dissertation, a finned heat sink, which metal-foam is placed between its fins is modeled. Obtained results show that, the Nusselt number in the heat sinks that made of aluminum foam with porosity of 95.6%, in the finned mode could increase up to two times. Finally, the effects of parameters such as the amount of mass discharge, the heat sink height and the amount of porosity of heat sink foam on the amount of heat transfer through heat sinks is determined at the end part.

Keywords: Heat sink, Metal Foam, Heat transfer.

۱- مقدمه

در ساخت پردازشگر کامپیوترها، به دلیل تولید گرمای زیاد در سطح‌های کم، باید تجهیزات دفع‌کننده‌ی گرما در فضاهای کوچک با قدرت دفع‌کنندگی بالا پیش‌بینی شود، که در صورت عدم دفع گرمای تولیدی از پردازشگرهای کامپیوتر باعث می‌شود که طول عمر پردازشگر کم‌تر شود.

به‌طور مثال، برای هر ۱۰ درجه سلسیوس کم کردن دمای کارکرد سطح تجهیزات الکترونیکی، عمر آن‌ها تا ۲ برابر افزایش می‌یابد [۱]. در میان همه تکنیک‌های دفع گرما، استفاده از جابجایی اجباری به‌وسیله هوا، هم مفیدتر و هم کم‌هزینه‌تر خواهد بود [۲].

توانایی انتقال گرما یک چاه گرمایی تابعی از جنس، شکل و اندازه چاه گرمایی و همچنین شرایط جریان سیال خنک‌کننده می‌باشد. جنس چاه گرمایی، باید دارای رسانندگی گرمایی بالا باشد، تا بتواند گرما را سریع منتقل کند و همچنین باید سبک باشد. معمولاً چاه گرمایی‌ها را

از جنس آلومینیوم و مس می‌سازند و به خاطر پایین بودن چگالی آلومینیوم نسبت به مس، چاه گرمایی‌های ساخته شده از آلومینیوم نسبت به چاه گرمایی‌های مسی ارجحیت دارند. در دهه‌های اخیر ظهور مواد متخلخل نظر بسیاری از محققان را در جنبه‌های انتقال گرمایی به خود جذب کرده است. مواد متخلخل با بهره‌گیری از افزایش سطح تبادل گرما در حجم محدود موجب بهبود انتقال گرما می‌شوند.

استفاده از مواد متخلخل در چاه گرمایی‌ها، به جریان اجازه می‌دهد تا از داخل سوراخ‌ها جریان عبور کند و انتقال گرما بهتر و سریع‌تر انجام شود. بیشتر متال فوم‌های در دسترس که کاربردهای تجاری هم دارند معمولاً از آلیاژهای آلومینیوم، مس، نیکل و آهن ساخته می‌شوند [۳]. ایزدپناه و همکاران [۴] نشان دادند که سهم انتقال گرما به روش جابجایی طبیعی، در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم‌های فلزی ناچیز است و سهم عمده انتقال گرما از چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم‌های فلزی به جابجایی اجباری مربوط می‌شود. همچنین آن‌ها نشان دادند، که چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی سبک‌تر بوده و حجم کمتری اشغال می‌کنند.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: aslani.farshid@stu.razi.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۱۳

کالمیدی و همکاران [۴ و ۵] مشاهده کردند که عدد نوسلت، رابطه‌ی مستقیمی با تعداد حفره‌ها در هر اینچ (PPI) دارد و همچنین ضریب انتقال گرما، با افزایش سرعت باد و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. چو و یانگ [۶] مطالعاتی روی چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم‌های آلومینیومی و همچنین چاه گرمایی‌های پره‌دار انجام دادند. آن‌ها عملکرد این چاه گرمایی‌ها را بررسی و آن‌ها را با هم مقایسه کردند. در سرعت وزش $3/6 \text{ m/s}$ ، برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی با تخلخل $91/4\%$ درصد، ضریب انتقال گرمای کلی 25% درصد بیشتر از چاه گرمایی‌های آلومینیومی پره‌دار گزارش شده است. هسیه و همکاران [۷] دریافتند که با افزایش تخلخل، عدد نوسلت نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین طی آزمایش‌هایی دریافتند که هرچه مقدار PPI یک نمونه بیشتر باشد، مقدار عدد نوسلت نیز بیشتر خواهد بود. دوخان و چن [۸] با مطالعه انتقال گرما در درون یک نمونه چاه گرمایی از جنس فوم فلزی در دسترس (تجاری)، که توسط یک وسیله الکترونیکی شار گرمایی ثابتی به آن داده می‌شد، دریافتند که با افزایش فاصله از سطح گرما داده‌شده، دما در آن به سرعت پایین می‌آید. کالمیدی و همکاران [۹ و ۱۰] رسانایی گرمایی موثر را برای فوم آلومینیومی در یک تحقیق به دست آوردند. بوید و هومن [۱۱] پی‌بردند که مبادله‌کن گرما ساخته شده از فوم فلزی با سیال خنک‌کننده‌ی هوا با همان اختلاف فشار می‌تواند جایگزین خوبی برای همان نمونه با سیال خنک‌کننده آب باشد. ادبایی و هومن [۱۲] در مبادله‌کن‌های گرمایی با به کارگیری فوم‌های فلزی، به جای لوله‌های پره‌دار در چگالنده خنک‌شونده با آب دریافتند که استفاده از این فوم‌های فلزی، می‌تواند ۲ تا ۶ برابر، عملکرد بهتری از لحاظ انتقال گرما (برای افزایش افت فشارهای منطقی و قابل قبول) داشته باشد. لین و همکاران [۱۳] طی آزمایشاتی بر روی فوم‌های فلزی دریافتند که استفاده از فوم مسی دارای انتقال گرمای بالاتر و همچنین دارای افت فشار کم‌تری است. چو و یانگ [۱۴] با مطالعاتی روی چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی دریافتند که در سرعت وزش $3/6 \text{ m/s}$ ، برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی با تخلخل $91/4\%$ درصد، ضریب انتقال گرمای کلی 25% درصد بیشتر از چاه گرمایی‌های آلومینیومی پره‌دار می‌باشد. مانجین و زلیو [۱۵]، آزمایش‌هایی را روی عبور جریان هوا از ۷ نوع فوم آلومینیومی انجام دادند و دریافتند که برای همه‌ی نمونه‌ها و برای همه‌ی آزمایش‌ها ضریب کلی انتقال گرما با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد و همچنین این ضریب کلی انتقال گرما از مقدار شار گرما مستقل است. هوانگ و همکاران [۱۶] روی ضریب انتقال گرمای جابجایی درون شبکه‌ای فوم‌های آلومینیومی مطالعه‌ای را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال گرما با افزایش سرعت جرمی هوای دمیده شده، افزایش می‌یابد و همچنین این ضریب انتقال گرما با افزایش تخلخل، کاهش می‌یابد. کیم و همکاران [۱۷] با استفاده از فرمول‌های تجربی، مقدار ضریب انتقال گرمای جابجایی را برای ۳ نمونه فوم آلومینیومی با مشخصات 40PPI و 20PPI و 10PPI و با تخلخل ثابت $0/92$ ، که در معرض جریان هوا قرار دارند را به دست آوردند. تمایل و هومن [۱۸] به صورت عددی با استفاده از تعریف مقاومت گرمایی، جریان عبوری هوا به وسیله‌ی دمنده از داخل یک مبادله‌کن گرمایی ساخته شده از فوم‌های فلزی را شبیه‌سازی و تحلیل کردند. شی و همکاران [۱۹] یک

چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی استوانه‌ای شکل را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق جریان هوا به صورت جت برخوردی از بالا (قسمت استوانه‌ای شکل)، وارد چاه گرمایی شده و طرف مقابل آن در مقابل شار گرمایی ثابت قرار گرفته است. آن‌ها روی نسبت $\frac{H}{D}$ (نسبت ارتفاع به قطر استوانه) و تاثیرات آن روی عدد نوسلت کار کردند و دریافتند که هنگامی که $\frac{H}{D}$ از $0/92$ به $0/15$ تغییر می‌یابد، عدد نوسلت چاه گرمایی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که افزایش آن، به دلیل افزایش رسیدن مقدار هوای وارد شده به قسمت انتهایی چاه گرمایی می‌باشد و کاهش آن نیز، به دلیل کاهش سطح انتقال گرما بین هوا و قسمت جامدی فوم آلومینیومی می‌باشد. یک چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی استوانه‌ای شکل را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که هنگامی که نسبت ارتفاع به قطر $\frac{H}{D}$ از $0/92$ به $0/15$ تغییر می‌یابد، عدد نوسلت چاه گرمایی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

در مقاله حاضر، چاه گرمایی‌های ساخته شده از جنس فوم آلومینیومی و همچنین چاه گرمایی‌های ساخته شده از جنس فوم آلومینیومی که در بین آن‌ها پره قرار داده شده، مدل‌سازی شده و در مقایسه با حالت‌های قبلی مقدار بهبود انتقال گرمای آن‌ها مشخص شده است و همچنین در قسمت دیگر تاثیر پارامترهایی همچون ارتفاع چاه گرمایی، تعداد پره‌ها و همچنین دبی هوای ورودی بررسی شده است. برای صحت نتایج به دست آمده، نتایج مقاله حاضر با نتایج دیگر تحقیقات انجام گرفته مورد ارزیابی قرار گرفته است.

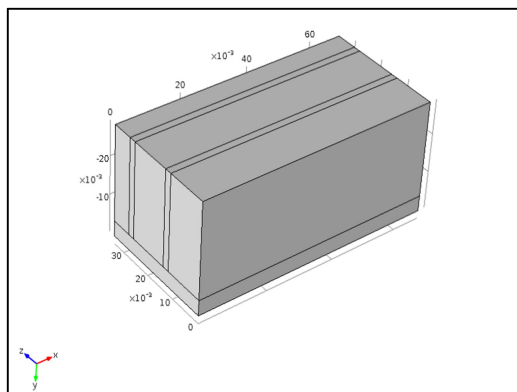
۲- هندسه مورد بحث

۲-۱- ابعاد چاه گرمایی

در ساختن چاه گرمایی‌ها محدودیت‌هایی از قبیل فضای اشغال شده توسط چاه گرمایی و وزن آن‌ها وجود دارد. در این مقاله ابعاد چاه گرمایی با توجه به این محدودیت‌ها و همچنین چاه گرمایی‌های رایج و موجود در بازار در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ نصف چاه گرمایی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics نشان داده شده است. طول و عرض چاه گرمایی برابر $68 \times 68 \text{ mm}$ و ارتفاع آن برابر 25 mm فرض شده است و برای چاه گرمایی ۴ پره به ضخامت 2 mm ، در نظر گرفته شده است. پایه چاه گرمایی از جنس آلومینیوم به ضخامت 4 mm است. بین پره‌ها فوم آلومینیومی قرار داده شده است. برای شبیه‌سازی، چون شرایط کاملاً متقارن است، فقط نصف چاه گرمایی‌ها در نظر گرفته و شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱- خصوصیات هوای عبوری از داخل چاه گرمایی

مقدار	خاصیت
$۱/۲۹۳ \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	چگالی
$۴۸۳/۷ \times ۱۰^{-۵} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$	لزجت سینماتیکی
$۶/۱۸۴ \times ۱۰^{-۵} \left(\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}\right)$	لزجت دینامیکی
$۰/۰۲۷۵ \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	رسانندگی گرمایی
$۱۰۰۵ \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	گرمای ویژه
$۱/۴$	نسبت گرمای ویژه



شکل ۱- نمایی از ابعاد نصف چاه گرمایی شبیه سازی شده

۲-۲- شرایط مرزی

در این مقاله به دو دلیل هوای ورودی، بر اساس دبی جرمی در نظر گرفته شده است:

۱- چون در کاربردهای عملی، مشخص کردن مقدار دبی ورودی بسیار آسان تر از مشخص کردن سرعت متوسط هوای ورودی است.
۲- در حالت دبی مساوی مقایسه کردن مقدار انتقال گرما منطقی تر به نظر می رسد. چون برای مقایسه کردن چاه گرمایی های پرده دار با چاه گرمایی هایی که فقط از فوم های فلزی ساخته شده است، سرعت متوسط هوای ورودی نمی تواند شرایط یکسانی را ایجاد کند.

دبی جرمی در این مقاله، برابر $۱/۶۶ \times ۱۰^{-۳} (\text{kg/s})$ در نظر گرفته شده است و دمای هوای ورودی برابر دمای محیط، و بر طبق استاندارد برابر $۲۹۳/۱۵ \text{K}$ در نظر گرفته شده است. فشار در خروجی هوا طبق کاربردهای عملی، برابر فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. پایه چاه گرمایی به ضخامت ۴mm از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شده است. رسانندگی گرمایی این آلومینیوم برابر $۲۰۲ \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ در نظر گرفته شده است. مقدار گرمای دفع شده از چاه گرمایی، بر اساس مسأله های کاربردی، برابر ۱۰۰W در نظر گرفته شده است. این گرما و در واقع شار گرمایی مستقیم به پایه از طریق صفحه ی زیرین آن منتقل می شود. جنس پرده ها از آلومینیوم و مقدار رسانندگی گرمایی پرده ها در این مقاله برابر $۲۰۲ \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ در نظر گرفته شده است. ضخامت پرده ها ۲mm است. تخلخل فوم آلومینیومی به کار برده شده، برابر $۰/۹۵۶$ و مقدار نفوذپذیری برابر $۳/۱۴ \times ۱۰^{-۷} \text{m}^2$ در نظر گرفته شده است. سیال خنک کننده در مقاله هوا است که خصوصیات آن در جدول ۱ آمده است.

در این مسأله فقط انتقال گرمای اجباری در نظر گرفته شده است

۲-۳- فرضیات حل مسأله

دیواره های چاه گرمایی، نفوذناپذیر و آدیاباتیک هستند و هیچ گونه انتقال انرژی و انتقال جرم از دیواره بالا و دیواره های اطراف صورت نمی گیرد. مقاومت سطح تماسی بین فوم آلومینیومی و سطح چاه گرمایی، نادیده گرفته شده است. فوم آلومینیومی یک ماده همگن و ایزوتروپیک (دارای خواص مشابه در هر جهت) در نظر گرفته شده است. جریان عبوری از چاه گرمایی، یک جریان لایه ای و پایا و تراکم ناپذیر، فرض شده است. خواص فیزیکی و گرمای سیال، فوم آلومینیومی و آلومینیوم جامد خالص، مستقل از دما می باشند. بر اساس شرایط متقارن، مسأله فقط برای نصف چاه گرمایی شبیه سازی شده است.

۲-۴- معادلات حاکم بر مسأله

معادلات برینگمن در واقع رفتار سیالات در داخل مواد متخلخل را تشریح می کند، که انتقال مومنوم در داخل سیال، که بر اثر تنش های برشی ایجاد می شود در این معادلات در نظر گرفته می شود. این معادلات در واقع یک صورت گسترش یافته از معادلات دارسی است که در آن یک عبارت بیشتر وجود دارد و این عبارت برای به دست آوردن انتقال لزجت در تعادل مومنوم است و همچنین باعث می شود که هم فشار و هم سرعت جریان به صورت متغیرهای مستقلی، تلقی شوند. همان طوری که گفته شد، متغیرهای فشار و سرعت در معادلات برینگمن به صورت کاملاً مستقل تلقی می شوند. معادلات جریان سیال در داخل متال فوم ها (مواد متخلخل) را به وسیله ترکیب کردن معادلات پیوستگی و مومنوم می توان به دست آورد که این ترکیب و ساده سازی منجر به به دست آمدن معادلات برینگمن می شود [۲۰].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_p p) + \nabla \cdot (\rho u) = Q_{br} \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{\epsilon_p} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\epsilon_p} \left\{ \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right\} \right] - \left(\frac{\mu}{k} + \frac{Q_{br}}{\epsilon_p^2} \right) u + F$$

در معادله (۱) μ لزجت دینامیکی سیال (واحد در SI: $\frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$), u

بردار (واحد در SI: $\frac{\text{m}}{\text{s}}$), ρ چگالی سیال (واحد در SI: $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), P

فشار سیال (واحد در SI: Pa), ϵ_p تخلخل سیال، k ماتریس نفوذ-

پذیری ماده متخلخل (واحد در SI: m^2) می باشد و سرعت تأثیرگذاری

نیروی جاذبه و سایر نیروهای حجمی را هم می‌توان در جمله F دید. Q_{br} هم انتشار منبع جرم بوده و برحسب واحد $(\frac{kg}{m^3s})$ در سیستم SI بیان می‌شود.

انتقال گرما در داخل یک ماده‌ی متخلخل، با انتقال گرما در داخل یک بلوک جامد و انتقال گرما در داخل یک سیال مشابه است. معادله‌ی انتقال گرما داخل یک ماده‌ی متخلخل به صورت زیر است [۲۱]:

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + Q \quad (2)$$

رسانندگی گرمایی معادل یا مؤثر را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$k_{eq} = \theta_p k_p + \theta_F k_F \quad (3)$$

و همچنین $(\rho C_p)_{eq}$ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$(\rho C_p)_{eq} = \theta_p \rho_p C_{p,p} + \theta_F \rho_F C_{p,F} \quad (4)$$

θ_p نسبت حجمی مواد جامد است که به وسیله نسبت حجمی

مایع θ_F به صورت زیر به هم مربوط می‌شوند:

$$\theta_p + \theta_L = 1 \quad (5)$$

اندیس p مربوط به ماده سازنده مثال فوم است.

۳- روش حل عددی

نرم افزار Comsol Multi-physics معادلات دیفرانسیل جزئی انتقال گرما در فوم‌های فلزی را با استفاده از روش المان محدود گالکین حل می‌کند. در واقع در این روش از تابع‌های وزنی به جای چند جمله‌ای-های درونی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا معادله دیفرانسیل‌های پیوسته به وسیله ضرب شدن در تابع‌های وزنی به معادلات دیفرانسیل ساده‌تر تبدیل می‌شوند. سپس معادلات جبری حاصل از روش چند گره جبری در این نرم افزار حل می‌شود.

۳-۱- مش بندی و استقلال حل مسأله از مش

برای حل مسأله و مش بندی و بررسی استقلال حل مسأله از مش، چاه گرمایی با تعداد مش‌های مختلف بررسی شده است. برای چاه گرمایی فوم آلومینیومی بدون پره بر اساس نوع و تعداد مش، دمای متوسط سطح پایه چاه گرمایی در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲- مقدار دمای متوسط سطح زیرین چاه گرمایی بر حسب تعداد مش برای چاه گرمایی فوم آلومینیومی بدون پره

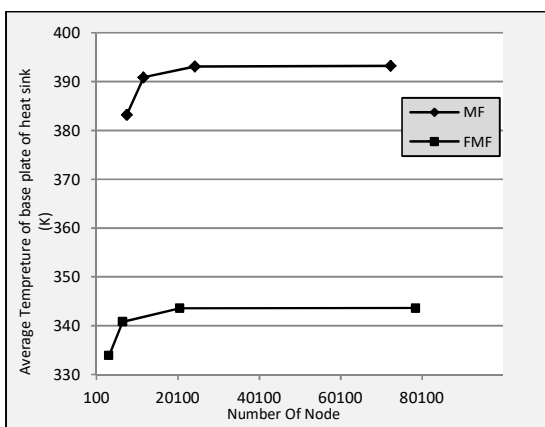
تعداد مش ها	دمای متوسط سطح پایه چاه گرمایی	نوع مش
۷۵۵۲	۳۸۳/۲۲۲	Normal
۱۱۶۷۱	۳۹۰/۸۷۱	Fine
۲۴۲۶۳	۳۹۳/۱۰۵	Finer
۷۲۴۳۴	۳۹۳/۲۳۲	Extra Fine

و برای چاه گرمایی فوم آلومینیومی پره‌دار دمای متوسط سطح پایه چاه گرمایی بر اساس نوع مش بندی و تعداد مش‌ها در جدول ۳ داده شده است:

جدول ۳- مقدار دمای متوسط سطح زیرین چاه گرمایی بر حسب تعداد مش برای چاه گرمایی فوم آلومینیومی پره دار

تعداد مش	دمای متوسط سطح پایه چاه گرمایی (K)	نوع مش بندی
۳۱۶۷	۳۳۳/۹۲	Normal
۶۵۳۷	۳۴۰/۸۱۱	Fine
۲۰۵۶۷	۳۴۳/۵۸۳	Finery
۷۸۵۳۹	۳۴۶/۶۱۹	Extra Fine

در شکل ۲ استقلال حل مسأله از مش برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره (MF) و برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی پره دار (FMF) نشان شده است.



شکل ۲- استقلال حل مسأله از مش بندی برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره (MF) و برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی پره دار (FMF)

بر اساس جدول و نمودارهای بالا، در حالت مش بندی از نوع Finer دما و جواب مسأله با میزان خطای ۰.۰۳۴٪ به دست می‌آید و دیگر لازم نیست که مش‌ها ریزتر شود.

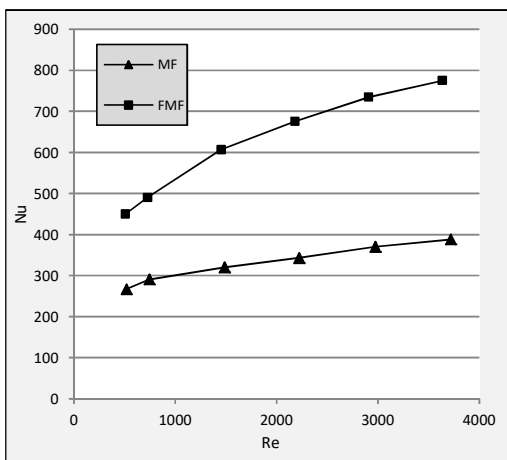
۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبار سنجی

در ابتدا مسأله ارائه شده توسط فنگ و همکاران با شرایط جریان برخوردی از داخل تیوپ مدل‌سازی شده و نتایج به دست آمده با نتایج فنگ و همکاران مقایسه شده است.

بر اساس نتایجی که در شکل ۳ برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و در شکل ۴ برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار، به دست آمده است، شبیه‌سازی ارائه شده در این مقاله با خطای قابل قبولی (کمتر از ۶ درصد) با نتایج فنگ و همکاران همخوانی دارد.

آلومینیومی نسبت به چاه گرمایی ساده پره‌دار آلومینیومی است. در قسمت دیگری از مقاله تأثیر سرعت جریان و در نهایت عدد رینولدز، روی مقدار عدد نوسلت بررسی شده است و در سرعت‌های مختلف در شکل ۵ مقدار عدد نوسلت برحسب عدد رینولدز، هم برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار نشان داده شده است.

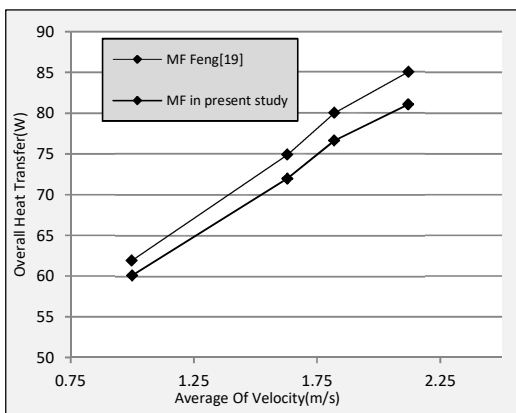


شکل ۵- تأثیر عدد رینولدز روی عدد نوسلت، برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره (MF) و برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار (FMF)

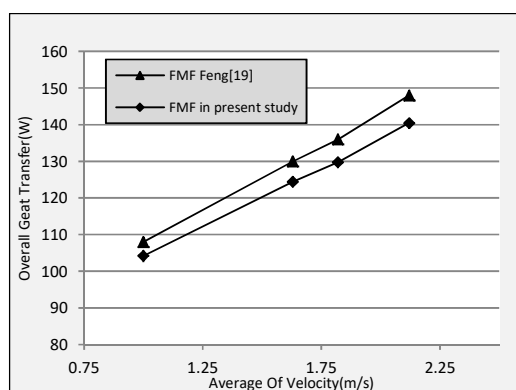
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، عدد نوسلت هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار، همواره افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز، به خاطر افزایش نسبت نیروهای اینرسی نسبت به نیروهای لزجی، ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد و با کاهش ضخامت لایه مرزی ضریب انتقال گرما جابجایی و بر همین اساس عدد نوسلت نیز افزایش می‌یابد.

سرعت افزایش عدد نوسلت با افزایش عدد رینولدز در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار بیشتر از حالت بدون پره است و این ناشی از این است که، به دلیل عبور جریان از بین پره‌ها، لایه‌های مرزی علاوه بر سطح چاه گرمایی، روی پره‌ها نیز شکل می‌گیرد و در واقع افزایش عدد رینولدز، هم بر لایه مرزی تشکیل شده روی چاه گرمایی، و هم بر لایه مرزی تشکیل شده روی پره‌ها، تأثیر می‌گذارد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عدد نوسلت در چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی در حالت پره‌دار می‌تواند تا ۲ برابر نسبت به حالت بدون پره افزایش یابد. چون رسانندگی پره‌ها، نسبت به فوم آلومینیومی بالاتر است، در نتیجه در حالتی که پره روی هیت‌سینک و بین فوم آلومینیومی قرار داده می‌شود، باعث می‌شود که رسانندگی گرمایی مؤثر کل چاه گرمایی افزایش یابد و همچنین باعث می‌شود که سطح بیشتری از چاه گرمایی با دمای نزدیک‌تر به پایه در معرض جریان سیال قرار بگیرد و در این حالت انتقال گرما از چاه گرمایی به محیط افزایش می‌یابد.



شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی شده چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره (MF) و نتایج فنگ و همکاران



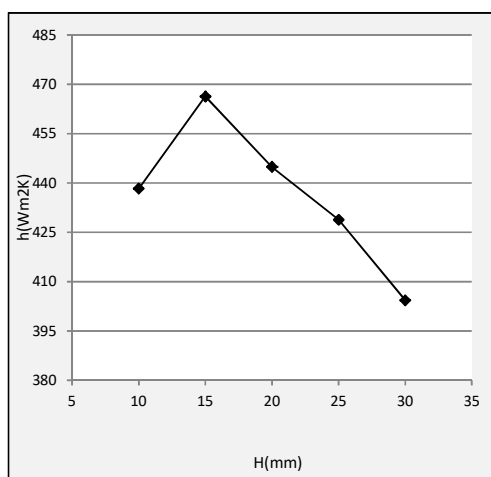
شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی شده چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار (FMF) و نتایج فنگ و همکاران

در این قسمت از مقاله، شبیه‌سازی برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار انجام شده و مسأله برای حالت دبی جرمی $(\frac{kg}{s})$ $1/6 \times 10^{-3}$ با مقدار انتقال گرما $q = 100 W$ به سطح پایه چاه گرمایی، حل شده و مقدار ضریب انتقال گرما به دست آمده و با حالت چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره، مقایسه شده است. این نتایج در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مقدار ضریب انتقال گرما برای چاه گرمایی آلومینیومی پره‌دار و چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره

نوع چاه گرمایی	$h \frac{W}{m^2 K}$
چاه گرمایی آلومینیومی پره‌دار	۱۶۵
چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره	۲۱۶/۳۶

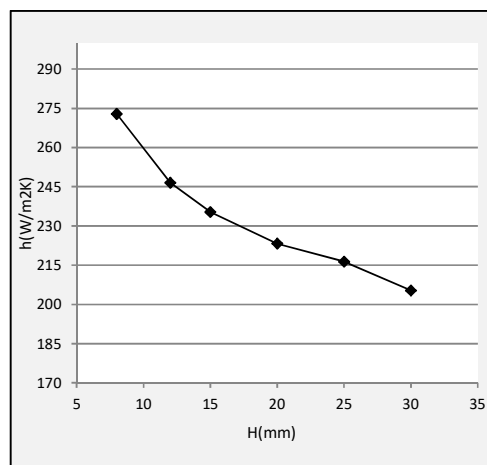
همان‌طوری که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با استفاده از به‌کارگیری فوم آلومینیومی در ساخت چاه گرمایی، ضریب انتقال گرما می‌تواند تا ۳۱/۱۲۷ درصد افزایش یابد. که این افزایش انتقال گرما به دلیل افزایش سطح تماس با محیط در چاه گرمایی ساخته شده از فوم



شکل ۷- تأثیر ارتفاع چاه گرمایی روی ضریب انتقال گرمای جابجایی برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره-دار (FMF)

در شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار، ابتدا ضریب انتقال گرما افزایش و سپس کاهش می‌یابد. چون رسانندگی موثر پرها بالاتر از فوم است، با افزایش ارتفاع تا یک مقدار مشخص به دلیل رسانندگی بالای پرها و بالا بردن رسانندگی گرمایی مؤثر کل چاه گرمایی و افزایش سطح بیشتر، با اختلاف دمای بیشتر نسبت به محیط، باعث افزایش انتقال گرمای جابجایی می‌شود. اما افزایش ارتفاع تا یک حد مشخصی می‌تواند باعث افزایش انتقال گرما شود چون در مبحث پرها نیز افزایش طول تا یک حد مشخصی می‌تواند مؤثر واقع شود و بعد از آن، با افزایش ارتفاع تأثیر چندانی در انتقال گرمای پرها به وجود نمی‌آید و فقط افزایش ارتفاع باعث کاهش عدد رینولدز جریانی می‌شود و در نتیجه، به این دلیل بعد از یک ارتفاع مشخصی با افزایش ارتفاع، انتقال گرما کاهش می‌یابد. در این قسمت هدف بررسی این مسأله است که آیا این ارتفاع که در آن ضریب انتقال گرما به بیشترین مقدار می‌رسد، بستگی به مقدار جریان دارد؟ به همین منظور در شکل ۸ مقادیر عدد نوسلت برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار در ارتفاع‌های مختلف برای سه دبی متفاوت به دست آورده شده است.

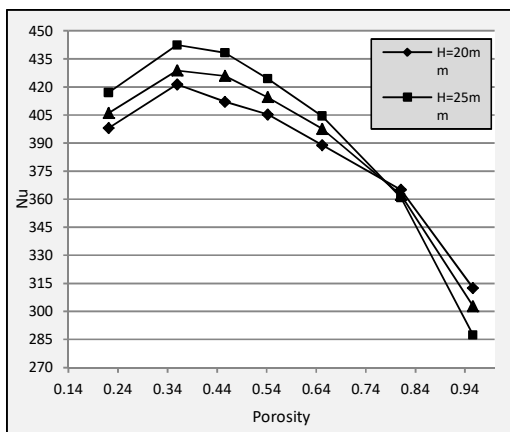
برای پی بردن به تأثیر ارتفاع چاه گرمایی در مقدار انتقال گرما، هم برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم پره‌دار، برای ارتفاع‌های مختلفی مسأله شبیه‌سازی شده و انتقال گرما بررسی شده است. چون هدف در این مرحله پی بردن به تأثیر ارتفاع چاه گرمایی در مقدار انتقال گرما است بنابراین، برای همه حالات، دبی برابر $(\frac{kg}{s}) \times 10^{-3} \times 1/66$ در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب انتقال گرمای جابجایی برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره در ارتفاع‌های مختلف به دست آورده شده و نتایج آن در شکل ۶ دیده می‌شود.



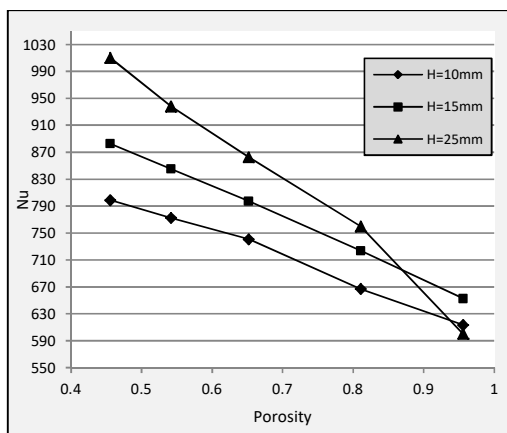
شکل ۶- تأثیر ارتفاع چاه گرمایی روی ضریب انتقال گرمای جابجایی برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره

در حالتی که چاه گرمایی از فوم آلومینیومی بدون پره انتخاب شده است، همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع چاه گرمایی بعد از ارتفاع ۸mm، همواره ضریب انتقال گرما کاهش می‌یابد. هدف از ساختن چاه گرمایی از فوم، این است که در فوم سطح تبادل گرمای بیشتری با سیال خنک‌کننده فراهم شود، اما برای افزایش انتقال گرما علاوه بر افزایش سطح لازم است که اختلاف دمای بین سیال خنک‌کننده و سطح دفع‌کننده گرما نیز بالا باشد. هنگامی که ارتفاع فوم افزایش می‌یابد، درست است که سطح تبادل گرما افزایش می‌یابد، ولی جریان کمتری از سیال در تماس با سطح با دمای بالاتر چاه گرمایی، قرار می‌گیرد. درواقع، با کاهش ارتفاع مقدار بیشتری از جریان سیال می‌تواند در تماس با قسمت‌هایی از چاه گرمایی باشد، که اختلاف دمای بالاتری نسبت به سیال خنک‌کننده دارد.

مقدار ضریب انتقال گرمای جابجایی نیز برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار در ارتفاع‌های مختلف به دست آورده شده و نتایج آن در شکل ۷ دیده می‌شود.



شکل ۹- تأثیر تخلخل در مقدار عدد نوسلت برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره

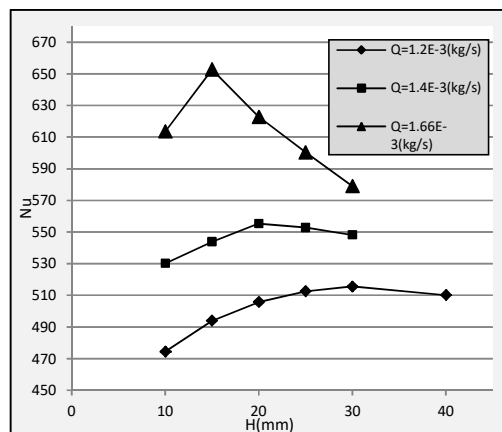


شکل ۱۰- تأثیر تخلخل در مقدار عدد نوسلت برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار

همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، برای همه حالت‌ها با افزایش تخلخل مقدار عدد نوسلت ابتدا افزایش و سپس بعد از مقدار مشخصی کاهش می‌یابد. هنگامی که تخلخل چاه گرمایی خیلی پایین باشد و به صفر درصد میل کند درواقع شبیه یک بلوک جامد عمل می‌کند که سیال از داخل آن نمی‌تواند عبور کند. با افزایش تخلخل تا یک مقدار مشخصی به دلیل افزایش سطح در واحد حجم عدد نوسلت افزایش می‌یابد اما بعد از آن مقدار عدد نوسلت با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. با افزایش تخلخل مقدار رسانندگی گرمایی مؤثر کل چاه گرمایی کم می‌شود و به همین خاطر مقدار عدد نوسلت و مقدار انتقال گرما کاهش می‌یابد. هنگامی که تخلخل چاه گرمایی بسیار زیاد باشد و به مقدار ۱۰۰ درصد میل کند شبیه حالتی است که اصلاً هیچ چاه گرمایی‌ای وجود ندارد.

چون یکی از دلایل استفاده از فوم‌های آلومینیومی در ساخت چاه گرمایی‌ها به خاطر وزن نسبتاً پایین آن‌ها است، در این مقاله مقادیر عدد نوسلت فقط در بازه‌ی تخلخل بین ۴۵/۶ و ۹۵/۶ درصد به دست آورده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، در تخلخل‌های پایین ارتفاعی که در آن عدد نوسلت به بیشترین مقدار می‌رسد،



شکل ۸- تأثیر دبی روی ارتفاعی که در آن بیشترین انتقال گرما رخ می‌دهد، برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، با افزایش دبی ارتفاعی که در آن بیشینه انتقال گرما صورت می‌گیرد، کاهش پیدا می‌کند. کارایی پره (نسبت آهنگ انتقال گرما با پره به آهنگ انتقال گرما بدون پره) هنگامی که طول پره به بی‌نهایت می‌رسد به بیشترین مقدار خود خواهد رسید. اما برای نیل به انتقال گرمای زیاد نیازی به پره‌های خیلی بلند نیست. بر اساس معادلات حاکم بر پره‌ها و نتایج تجربی به دست آمده ۹۸ درصد بیشترین انتقال گرما از یک پره هنگامی رخ می‌دهد که طول پره برابر باشد با [۲۲]:

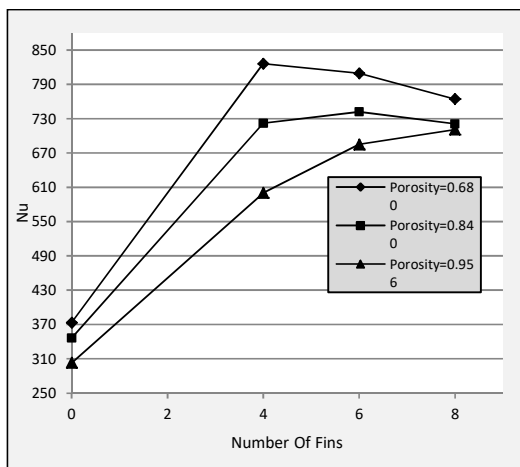
$$L = 2.3 \sqrt{\frac{kAc}{hP}} \quad (6)$$

که L طول پره و h ضریب انتقال گرما جابجایی، P محیط پره و A_c مساحت سطح مقطع پره است. حال اگر از رابطه (۶) طول بهینه برای دو حالت کاملاً یکسان در شرایط مسأله اما با دبی‌های متفاوت محاسبه شود، برای حالتی که دبی بیشتر است عدد رینولدز جریان نیز بیشتر خواهد شد و بر اساس شکل ۳ ضریب انتقال گرما جابجایی برای این حالت بیشتر خواهد بود و در نتیجه بر اساس رابطه (۶) طول بهینه برای دبی‌های بیشتر، کمتر خواهد بود.

در این قسمت تأثیر تخلخل در انتقال گرما بررسی شده است و هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار مقدار عدد نوسلت برای سه ارتفاع مختلف در تخلخل‌های متفاوت به دست آمده است. در شکل ۹ مقدار عدد نوسلت برحسب تخلخل در سه ارتفاع ۲۰mm، ۲۵mm و ۳۰mm برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره به دست آورده شده است. و در شکل ۱۰ مقدار عدد نوسلت برحسب تخلخل در سه ارتفاع ۱۰mm، ۱۵mm و ۲۵mm برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار به دست آورده شده است.

بزرگ‌تر می‌شود. اگر چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی را مانند یک چاه گرمایی ساده آلومینیومی در نظر گرفته شود که از تعداد پره‌های بسیار زیادی تشکیل شده است هنگامی که تخلخل کاهش می‌یابد بر طبق گفته‌های قبلی مقدار رسانندگی گرمایی مؤثر کل چاه گرمایی کاهش می‌یابد و بر اساس رابطه (۶) طول بهینه‌ای که در آن بیشترین انتقال گرما رخ می‌دهد به خاطر افزایش یافتن رسانندگی گرمایی افزایش می‌یابد.

در این قسمت از مقاله هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار مقادیر عدد نوسلت برای تخلخل‌های متفاوت در سه مقدار دبی متفاوت به دست آورده شده است. در شکل ۱۱ مقادیر عدد نوسلت برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و در شکل ۱۲ برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار برای سه دبی متفاوت در تخلخل‌های متفاوت به دست آورده شده است.



شکل ۱۳- تأثیر تعداد پره‌ها در عدد نوسلت، برای سه تخلخل متفاوت

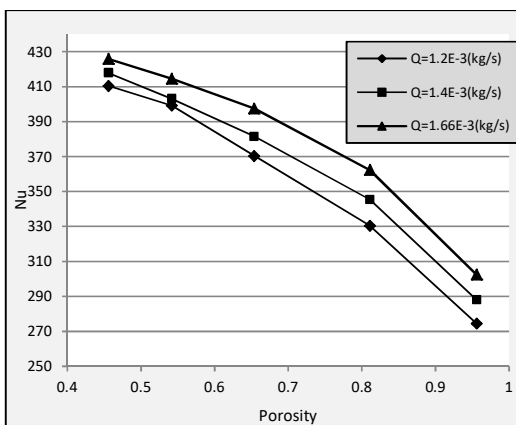
همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پره‌ها مقدار عدد نوسلت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد در ابتدا هنگامی که تعداد پره‌ها افزایش می‌یابد باعث می‌شود که رسانندگی گرمایی مؤثر کل چاه گرمایی افزایش یابد و همین باعث افزایش مقدار عدد نوسلت و انتقال گرما می‌شود و در همه‌ی حالت‌ها هنگامی که تعداد پره‌ها خیلی افزایش می‌یابد درواقع چاه گرمایی به حالتی میل می‌کند که یک بلوک جامد عمل خواهد کرد. اثرات افزایش تعداد پره در تخلخل‌های متفاوت یکی نیست و هر چه تخلخل فوم کاهش یابد با گذاشتن تعداد پره‌های کمتر می‌توان به بیشترین مقدار عدد نوسلت رسید.

۵- نتیجه‌گیری

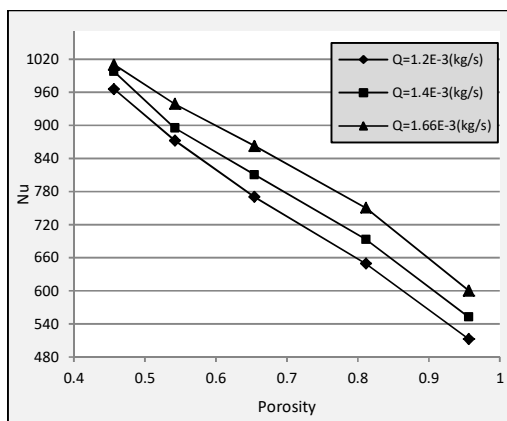
بعد از شبیه‌سازی و حل مسئله نتایج زیر به دست آمده است: با استفاده از به‌کارگیری فوم آلومینیومی با تخلخل ۹۵/۶ درصد در ساخت چاه گرمایی، ضریب انتقال گرما می‌تواند تا ۳۱/۱۲۷ درصد افزایش یابد.

با افزایش سرعت جریان و در نتیجه با افزایش عدد رینولدز، همواره عدد نوسلت افزایش می‌یابد.

سرعت افزایش عدد نوسلت با افزایش عدد رینولدز در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار بیشتر از حالت بدون پره است



شکل ۱۱- تأثیر تخلخل در مقدار عدد نوسلت برای چاه گرمایی- های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره



شکل ۱۲- تأثیر تخلخل در مقدار عدد نوسلت برای چاه گرمایی- های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار

همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ برای همه حالت‌ها و همه دبی‌های متفاوت با افزایش تخلخل مقدار عدد نوسلت کاهش می‌یابد

- [9] Bahttacharya A., Mahajan R.L., Finned Metal Foam Heat Sinks for Electronics Cooling in Forced Convection. j. Electron. Package, Vol. 124, pp. 155-163, 2002.
- [10] Calmidi V.V., Mahajan R.L., Forced Convection in High Porosity Metal Foams. j. heat transfer, Vol. 122, pp. 557-565, 2000.
- [11] Boyd B., Hooman K., Air-Cooled Micro Porous Heat Exchangers for Thermal Management of Fuel Cells. Int. Comun. Heat Mass Transfer, Vol. 39, pp. 363-367, 2012.
- [12] Odabae M., Hooman K., Application of Metal Foams in Air-Cooled Condensers for Geothermal Power Plants. Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol. 38, pp. 838-843, 2011.
- [13] Lin Y.R., Du j.H., Wu W., Chow L.C., Notardonato W., Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop of Recuperative Heat Exchanger Using Carbon Foam. ASME j. Heat transfer, Vol. 132, pp. 3806-3814, 2010.
- [14] Chou S.F., Yang C.H., Heat Transfer Characteristics of Aluminum Metal Foam. Proceeding of Sixth International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, pp. 709-71, 1993.
- [15] Mancin S., Zilio C., Cavallini A., Rossetto L., Heat Transfer During Air Flow in Aluminum Foam. Int.J. Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 4976-4984, 2010.
- [16] Hwang j-j., Hwang G-J., Reh R-H., Chao C.H., Measurement of Interstitial Convective Heat Transfer and Frictional Drag for Flow Across Metal Foams. J. Heat transfer, Vol. 124, pp. 120-129, 2002.
- [17] Kim S.Y., Kang B-H., Kim J.H., Force Convection From Aluminum Foam Materials in An Asymmetrically Heated Channel. Int.J. Heat Mass transfer, Vol. 44, pp. 1451-1454, 2001.
- [18] Tamayol A., Hooman K., Thermal Assessment of Forced Convection Through Foam Heat Exchanger. ASME J. Heat transfer, Vol. 133, pp. 1-7, 2011.
- [19] Shih W.H., Chiu W.C., Hsieh W.H., Height Effect on Heat Transfer Characteristics of Aluminum Foam Heat Sinks. J. Heat Transfer, Vol. 128, pp. 530-537, 2005.
- [20] Le Bars M. and Worster M.G., Interfacial Conditions Between a Pure Fluid and a Pourous Medium: Implications for Binary Alby Solidification. journal of Fluid Mechanics, Vol. 550, pp. 149-173, 2006.
- [21] Feng S.S., Kuang j.j., Wen T., Lu T.j., Lchimiya K., An Experimental and Numerical Study of Finned Metal Foam Heat Sinks Under Impinging Air Jet Cooling. j Heat and Mass Transfer, Vol. 77, pp. 1063-1074, 2014.
- [22] Incropera F.P., Wittersian D.P.D., Bergman T.L., Lavine A.S., Introduction to Heat Transfer, 2007.

عدد نوسلت در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی با تخلخل ۹۵/۶ درصد در حالت پرده‌دار می‌تواند تا ۲ برابر نسبت به حالت بدون پره افزایش یابد.

افزایش ارتفاع در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی با تخلخل ۹۵/۶ درصد بدون پره از ارتفاع ۸mm به بعد همواره باعث کاهش ضریب انتقال گرما جابجایی و در نتیجه باعث کاهش انتقال گرما کلی می‌شود.

افزایش ارتفاع در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پرده‌دار، ابتدا باعث افزایش و سپس باعث کاهش عدد نوسلت می‌شود. در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پرده‌دار، ارتفاعی که در آن عدد نوسلت به بیشترین مقدار می‌رسد، به مقدار دبی جرمی سیال خنک‌کننده بستگی دارد.

با افزایش دبی جرمی جریان سیال خنک‌کننده، ارتفاعی که در آن عدد نوسلت به بیشترین مقدار می‌رسد، کاهش می‌یابد.

در تمامی حالت‌ها هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پرده‌دار، با افزایش تخلخل مقدار عدد نوسلت ابتدا افزایش و سپس بعد از مقدار مشخصی کاهش می‌یابد.

هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پرده‌دار اختلاف عدد نوسلت در تخلخل‌های کمتر برای دبی‌های متفاوت کمتر خواهد بود.

با کاهش تخلخل، هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پرده‌دار، ارتفاعی که در آن بیشترین مقدار عدد نوسلت رخ می‌دهد، بیشتر می‌شود.

با افزایش تعداد پرده‌های آلومینیومی قرار داده شده در بین فوم آلومینیومی مقدار عدد نوسلت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Yunus A. Cengel., Robert H. , Fundamentals of Thermal-Fluid Science. second Edition, Turner, 2005.
- [2] Sathe S., Sammakia B., A Review of Recent Development in Some Practical Aspects of Air-cooled Electronic Packages, Trans. ASME, Vol. 120, pp. 830-839, 1998.
- [3] Calmidi V.V., Mahajan R.L., Forced Convection in High Porosity Metal Foams. j. Heat Transfer, Vol. 122, pp. 557-565, 2000.
- [4] Izadpanah M.R., Muller-Steinhagen H., Jamil Alahmadi M., Experimental and Theoretical Studies of Convective Heat Transfer in A Cylindrical Porous Medium. Int. j. Heat Fluid flow, Vol. 19, pp. 629-635, 1998.
- [5] Calmidi V.V., Transport Phenomena in High Prosity Fibrous Metal Foams, Ph.D.Thesis, University of Colorado Boulder, 1998.
- [6] Chou S.-F., Yang C.H., Heat Transfer Characteristics of Aluminum Meta Foam. Proceeding of Sixth International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, pp. 709-714, 1993.
- [7] Hsieh W.H., Wu j.Y., Shih W.H., Chiu W.C., Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Aluminum-Foam Heat Sink. Int.j.Heat Mass transfer, Vol. 47, pp. 5149-5157, 2004.
- [8] Dukhan N., Chen K.C., Heat Transfer Measurement in Metal Foam Subjected to Constant Heat flux. Exp. Thermal Fluid Sci, Vol. 32, pp. 624-631, 2007.