Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۸، جلد ۴۹، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۹-۱۷

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 فنّاوری، 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 شبیه‌سازی‌شده 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 گرمای 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 گذاشته‌شده، 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 درنهایت 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 گرماهای زیاد در سطح‌های کم، باید تجهیزات دفع‌کننده‌ی گرما در فضاهای کوچک باقدرت دفع‌کنندگی بالا پیش‌بینی شود،که در صورت عدم دفع گرماهای 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 خنک کننده 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 خاطرپایین 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: ۹۵/۱۱/۱۶
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۱۰

www.SID.ir

Archive of SID

کالمیدی و همکاران [۴ و۵] 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 درنتیجه 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 ۳/۶ m/s، برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی با تخلخل ۹۱/۴ درصد، ضریب انتقال گرمای کلی ۲۵ 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 [۹و۱۰] 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 مبادله‌کن های گرمایی با به کارگیری فوم‌های فلزی، به‌جای لوله‌های پره‌دار در چگالنده خنک شونده 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 قابل‌قبول) 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 ۳/۶ m/s، برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی با تخلخل ۹۱/۴ درصد، ضریب انتقال گرمای کلی ۲۵ درصد بیشتر از چاه گرمایی‌های آلومینیومی پره‌دار می‌باشد. مانجین و زیلیو [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 ۴۰PPI و ۲۰PPI و ۱۰PPI و با تخلخل ثابت ۰/۹۲، که در معرض جریان هوا قرار دارند را به دست آوردند. تمایل و هومن [۱۸] به‌صورت 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 استوانه ای 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 ۰/۹۲ به ۰/۱۵ 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 موردمطالعه قراردادند و دریافتند که هنگامی‌که نسبت ارتفاع به قطر $\frac{H}{D}$ از ۰/۹۲ به ۰/۱۵ 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 داده‌شده،مدل‌سازی شده و در مقایسه باحالت‌های 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 به‌دست آمده، نتایج مقاله حاضر با نتایج دیگر تحقیقات انجام گرفته مورد ارزیابی قرار گرفته است.

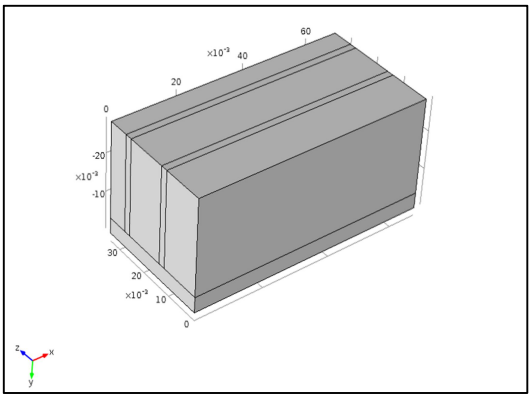
۲- هندسه مورد بحث

۲-۱- ابعاد چاه گرمایی

در ساختن چاه گرمایی‌ها محدودیت‌هایی از قبیل فضای اشغال‌شده توسط چاه گرمایی و وزن آن‌ها وجود دارد. در این مقاله ابعاد چاه گرمایی با توجه به این محدودیت‌ها و همچنین چاه گرمایی-های رایج و موجود در بازار در نظر گرفته‌شده است. در شکل ۱ نصف چاه گرمایی شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics نشان داده‌شده است. طول و عرض چاه گرمایی برابر ۶۸mm*۶۸ و ارتفاع آن برابر ۲۵mm فرض شده است و برای چاه گرمایی ۴ پره به ضخامت ۲mm، در نظر گرفته‌شده است. پایه چاه گرمایی از جنس آلومینیوم به ضخامت ۴mm است. بین پره‌ها فوم آلومینیومی قرار داده شده است. برای شبیه‌سازی، چون شرایط کاملاً متقارن است، فقط نصف چاه گرمایی‌ها در نظر گرفته و شبیه‌سازی‌شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



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 گرفته‌شده است:

۱- چون در کاربردهای عملی، مشخص کردن مقدار دبی ورودی بسیار آسان‌تر از مشخص کردن سرعت متوسط هوای ورودی است.

۲- در حالت دبی مساوی مقایسه کردن مقدار انتقال گرما منطقی‌تر به نظر می‌رسد. چون برای مقایسه کردن چاه گرمایی‌های پره‌دار با چاه گرمایی‌هایی که فقط از فوم‌های فلزی ساخته شده است، سرعت متوسط هوای ورودی نمی‌تواند شرایط یکسانی را ایجاد کند.

دبی جرمی در این مقاله، برابر $۱/۶۶\times۱۰^{-۳}(kg/s)$ در نظر گرفته‌شده است و دمای هوای ورودی برابر دمای محیط، و بر طبق استاندارد برابر ۲۹۳/۱۵K در نظر گرفته‌شده است. فشار در خروجی هوا طبق کاربردهای عملی، برابر فشار اتمسفر در نظر گرفته‌شده است. پایه چاه گرمایی به ضخامت ۴mm از جنس آلومینیوم در نظر گرفته‌شده است. رسانندگی گرمایی این آلومینیوم برابر $۲۰۲\frac{W}{mK}$ در نظر گرفته‌شده است. مقدار گرمای دفع شده از چاه گرمایی، بر اساس مسأله‌های کاربردی، برابر ۱۰۰W در نظر گرفته‌شده است. این گرما و درواقع شار گرمایی مستقیم به پایه از طریق صفحه‌ی زیرین آن منتقل می‌شود. جنس پره‌ها از آلومینیوم و مقدار رسانندگی گرمایی پره‌ها در این مقاله برابر $۲۰۲\frac{W}{mK}$ در نظر گرفته‌شده است. ضخامت پره‌ها mm ۲ است. تخلخل فوم آلومینیومی به‌کاربرده شده، برابر ۰/۹۵۶ و مقدار نفوذپذیری برابر $۳/۱۴\times۱۰^{-۷}\ m^2$ در نظر گرفته شده است. سیال خنک‌کننده در مقاله هوا است که خصوصیات آن در جدول ۱ آمده است.

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

جدول ۱- خصوصیات هوای عبوری از داخل چاه گرمایی

خاصیت	مقدار
چگالی	$۱/۲۹۳\ (\frac{kg}{m^3})$
لزجت سینماتیکی	$۴۸۳/۷\times۱۰^{-۵}\ (\frac{m^2}{s})$
لزجت دینامیکی	$۶/۱۸۴\times۱۰^{-۵}\ (\frac{Ns}{m^2})$
رسانندگی گرمایی	$۰/۰۲۷۵\ \frac{W}{mK}$
گرمای ویژه	$۱۰۰۵\ \frac{J}{kgK}$
نسبت گرمای ویژه	۱/۴

۲-۳- فرضیات حل مسأله

دیواره‌های چاه گرمایی، نفوذناپذیر و آدیاباتیک هستند و هیچ‌گونه انتقال انرژی و انتقال جرم از دیواره بالا و دیواره‌های اطراف صورت نمی‌گیرد. مقاومت سطح تماسی بین فوم آلومینیومی و سطح چاه گرمایی، نادیده گرفته‌شده است. فوم آلومینیومی یک ماده همگن و ایزوتروپیک (دارای خواص مشابه در هر جهت) در نظر گرفته‌شده است.

جریان عبوری از چاه گرمایی، یک جریان لایه‌ای و پایا و تراکم‌ناپذیر، فرض شده است. خواص فیزیکی و گرمای سیال، فوم آلومینیومی و آلومینیوم جامد خالص، مستقل از دما می‌باشند. بر اساس شرایط متقارن، مسأله فقط برای نصف چاه گرمایی شبیه‌سازی‌شده است.

۲-۴- معادلات حاکم بر مسأله

معادلات برینکمن درواقع رفتار سیالات در داخل مواد متخلخل را تشریح می‌کند، که انتقال مومنتوم در داخل سیال، که براثر تنش‌های برشی ایجاد می‌شود در این معادلات در نظر گرفته می‌شود. این معادلات درواقع یک صورت گسترش‌یافته از معادلات دارسی است که در آن یک عبارت بیشتر وجود دارد و این عبارت برای به دست آوردن انتقال لزجت در تعادل مومنتوم است و همچنین باعث می‌شود که هم‌فشار و هم سرعت جریان به‌صورت متغیرهای مستقلی، تلقی شوند.

همان‌طوری که گفته شد، متغیرهای فشار و سرعت در معادلات برینکمن به‌صورت کاملاً مستقل تلقی می‌شوند. معادلات جریان سیال در داخل متال‌فوم‌ها (مواد متخلخل) را به‌وسیله ترکیب کردن معادلات پیوستگی و مومنتوم می‌توان به دست آورد که این ترکیب و ساده‌سازی منجر به به دست آمدن معادلات برینکمن می‌شود [۲۰].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p\rho)+\nabla.(\rho u)=Q_{br} \qquad (۱)$$

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

در معادله (۱) μ لزجت دینامیکی سیال (واحد در SI: $\frac{kg}{m.s}$)، u بردار (واحد در SI: $\frac{m}{s}$)، ρ چگالی سیال (واحد در SI: $\frac{kg}{m^3}$)، P فشار سیال (واحد در SI: Pa)، ε_p تخلخل سیال، k ماتریس نفوذپذیری ماده متخلخل (واحد در SI: m^2) می‌باشد و سرعت تأثیرگذاری

www.SID.ir

Archive of SID

نیروی جاذبه و سایر نیروهای حجمی را هم می‌توان در جمله F دید. Q_{br} هم انتشار منبع جرم بوده و برحسب واحد $(\frac{kg}{m^3 s})$ 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 به‌صورت زیر است [۲۱]:

$$(\rho C_P)_{eq}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho C_P u.\nabla T=\nabla.(k_{eff}\nabla T)+Q \qquad (۲)$$

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

$$k_{eq}=\theta_p k_p+\theta_F k_F \qquad (۳)$$

و همچنین $(\rho C_P)_{eq}$ به‌صورت زیر قابل‌محاسبه است:

$$(\rho C_P)_{eq}=\theta_P\rho_P C_{P_P}+\theta_L\rho_F C_{P_F} \qquad (۴)$$

θ_P نسبت حجمی مواد جامد است که به‌وسیله نسبت حجمی مایع θ_F به‌صورت زیر به هم مربوط می‌شوند:

$$\theta_P+\theta_L=1 \qquad (۵)$$

اندیس p مربوط به ماده سازنده متال‌فوم است.

۳- روش حل عددی

نرم افزار Comsol Multi-physics معادلات دیفرانسیل جزیی انتقال گرما در فوم‌های فلزی را با استفاده از روش المان محدود گالرکین 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 درتابع‌های 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 مش های 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

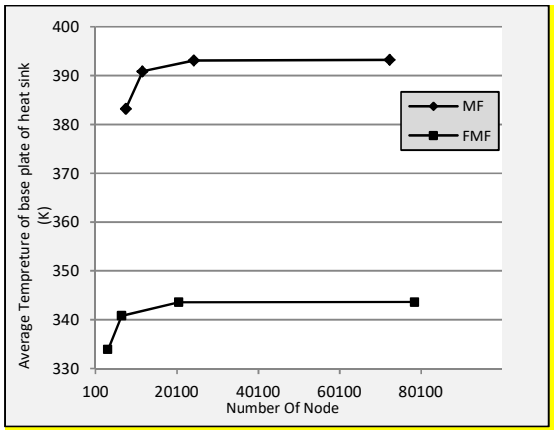
تعداد مش ها	دمای متوسط سطح پایه چاه گرمایی	نوع مش
۷۵۵۲	۳۸۳/۲۲۲	Normal
۱۱۶۷۱	۳۹۰/۸۷۱	Fine
۲۴۲۶۳	۳۹۳/۱۰۵	Finer
۷۲۴۳۴	۳۹۳/۲۳۲	Extra Fine

و برای چاه گرمایی فوم آلومینیومی پره‌دار دمای متوسط سطح پایه چاه گرمایی بر اساس نوع مش بندی و تعداد مش ها 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.



شکل۲- استقلال حل مساله 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 می آید و دیگر لازم نیست که مش ها ریزتر شود.

۴- نتایج و بحث

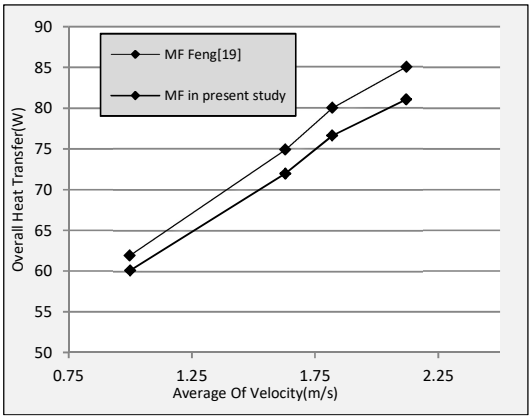
۴-۱- اعتبار سنجی

در ابتدا مسأله ارائه‌شده توسط فنگ و همکاران با شرایط جریان برخوردی از داخل تیوپ مدل‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج فنگ و همکاران مقایسه شده است.

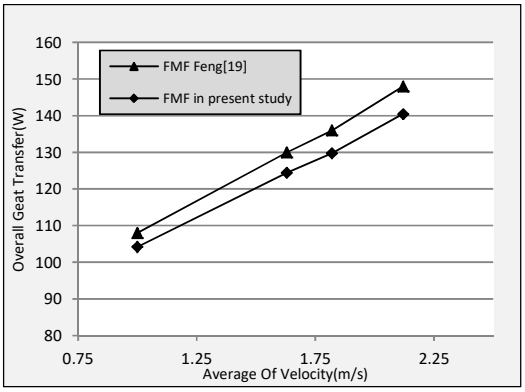
بر اساس نتایجی که در شکل ۳ برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و در شکل ۴ برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار، به‌دست‌آمده است، شبیه‌سازی ارائه‌شده در این مقاله با خطای قابل قبولی(کمتر از ۶ درصد) با نتایج فنگ و همکاران هم‌خوانی دارد.

www.SID.ir

Archive of SID



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



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

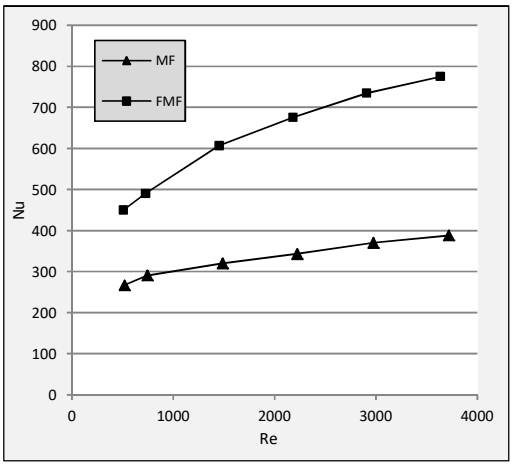
در این قسمت از مقاله، شبیه‌سازی برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار انجام‌شده و مسأله برای حالت دبی جرمی $(\frac{kg}{s})$ ۱/۶۶×۱۰$^{-۳}$ با مقدار انتقال گرما q=۱۰۰W به سطح پایه چاه گرمایی، حل‌شده و مقدار ضریب انتقال گرما به‌دست‌آمده و باحالت چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره، مقایسه شده است. این نتایج در جدول ۳ آورده شده است.

جدول۳- مقدار ضریب انتقال گرما برای چاه گرمایی آلومینیومی پره‌دار و چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره

نوع چاه گرمایی	$h\ \frac{W}{m^2K}$
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 آلومینیومی نسبت به چاه گرمایی ساده پره‌دار آلومینیومی است.

در قسمت دیگری از مقاله تأثیر سرعت جریان و درنهایت عدد رینولدز، روی مقدار عدد نوسلت بررسی‌شده 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 درنتیجه 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 لزجتی، ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد و با کاهش ضخامت لایه مرزی ضریب انتقال گرما جابجایی و بر همین اساس عدد نوسلت نیز افزایش می‌یابد.

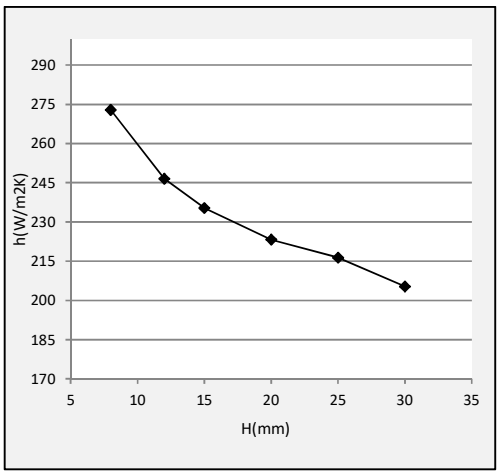
سرعت افزایش عدد نوسلت با افزایش عدد رینولدز در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار بیشتر از حالت بدون پره است و این ناشی از این است که، به دلیل عبور جریان از بین پره‌ها، لایه‌های مرزی علاوه بر سطح چاه گرمایی، روی پره‌ها نیز شکل می‌گیرد و درواقع افزایش عدد رینولدز، هم بر لایه مرزی تشکیل‌شده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

www.SID.ir

Archive of SID

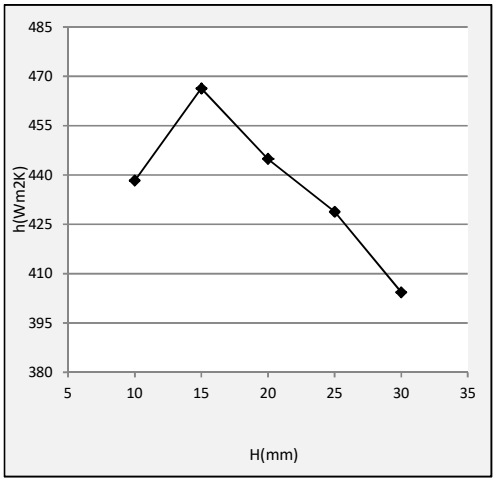
برای پی بردن به تأثیر ارتفاع چاه گرمایی در مقدار انتقال گرما، هم برای چاه گرمایی ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم پره‌دار، برای ارتفاع‌های مختلفی مسأله شبیه‌سازی‌شده و انتقال گرما بررسی‌شده است. چون هدف در این مرحله پی بردن به تأثیر ارتفاع چاه گرمایی در مقدار انتقال گرما است بنابراین، برای همه حالات، دبی برابر $(\frac{kg}{s})$ $۱/۶۶\times۱۰^{-۳}$ در نظر گرفته‌شده 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 انتخاب‌شده 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. هنگامی‌که 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.

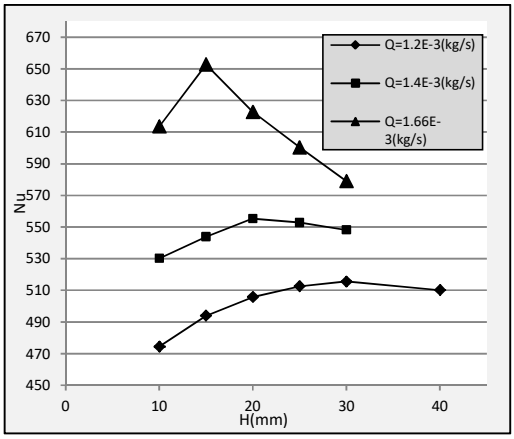


شکل ۷- تأثیر ارتفاع چاه گرمایی روی ضریب انتقال گرمای جابجایی برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره-دار(FMF)

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 پره‌ها بالاتر از فوم است، با افزایش ارتفاع تا یک مقدار مشخص به دلیل رسانندگی بالای پره‌ها 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 پره‌ها نیز افزایش طول تا یک حد مشخصی می‌تواند مؤثر واقع شود و بعد از آن، با افزایش ارتفاع تأثیر چندانی در انتقال گرمای پره‌ها به وجود نمی‌آید و فقط افزایش ارتفاع باعث کاهش عدد رینولدز جریانی می‌شود و درنتیجه، 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.

www.SID.ir

Archive of SID



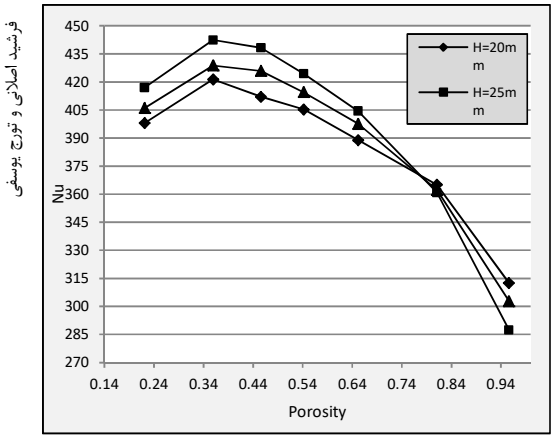
شکل ۸- تأثیر دبی روی ارتفاعی که در آن بیشترین انتقال گرما رخ می‌دهد، برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار

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) هنگامی‌که 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 به‌دست‌آمده ۹۸ درصد بیشترین انتقال گرما از یک پره هنگامی رخ می‌دهد که طول پره برابر باشد با [۲۲]:

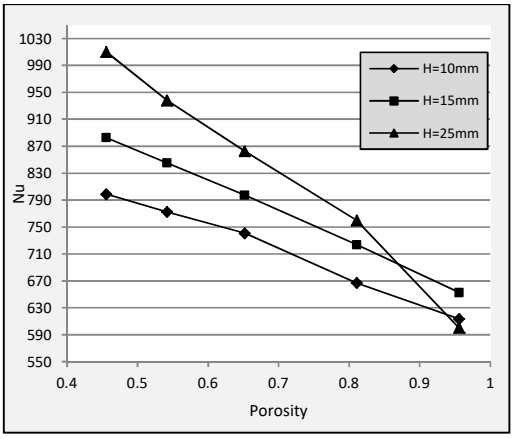
$$L = 2.3\sqrt{\frac{kA_C}{hP}} \qquad (۶)$$

که L طول پره و h ضریب انتقال گرمای 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 درنتیجه بر اساس رابطه (۶) طول بهینه برای دبی‌های بیشتر، کمتر خواهد بود.

در این قسمت تأثیر تخلخل در انتقال گرما بررسی‌شده 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 به‌دست‌آمده 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.



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 گرمایی-های 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. هنگامی‌که 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. هنگامی‌که 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 ۶/ ۹۵ درصد به دست آورده شده است.

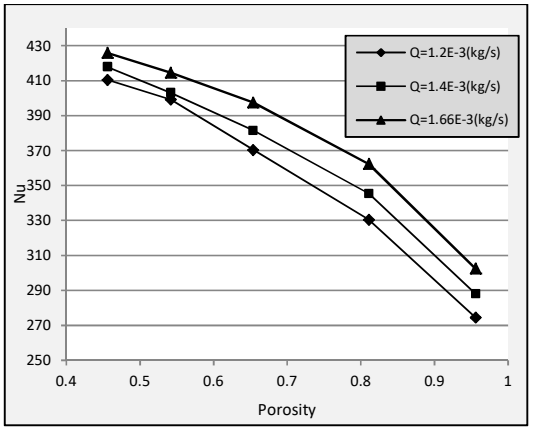
همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، در تخلخل-های پایین ارتفاعی که در آن عدد نوسلت به بیشترین مقدار می‌رسد،

www.SID.ir

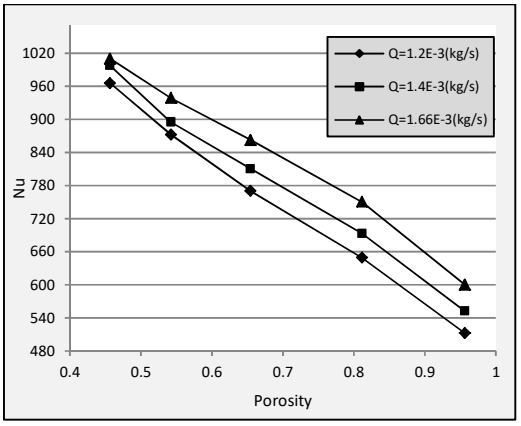
Archive of SID

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 تشکیل‌شده است هنگامی‌که 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.



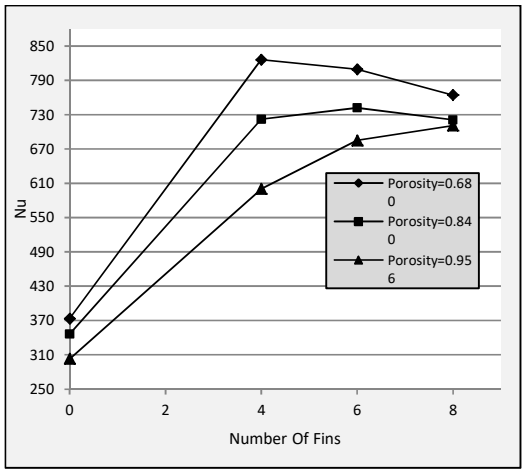
شکل ۱۱- تأثیر تخلخل در مقدار عدد نوسلت برای چاه گرمایی-های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره



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 که دلیل آن در قسمت‌های قبلی ذکرشده است. همچنین مشاهده می‌شود در همه‌ی تخلخل‌ها مقدار عدد نوسلت همواره برای دبی بالاتر، بیشتر است و با کاهش تخلخل وابستگی عدد نوسلت به دبی کمتر می‌شود و بر همین اساس اختلاف عدد نوسلت در تخلخل‌های کمتر برای دبی‌های متفاوت کمتر خواهد بود.

در قسمت پایانی تأثیر تعداد پره‌ها در مقدار عدد نوسلت بررسی شده است و مقدار عدد نوسلت برای تعداد پره‌های مختلف در سه تخلخل ۶۸، ۸۴ و ۹۵/۶ درصد به‌دست‌آمده است که نتایج را می‌توان در شکل ۱۳ مشاهده کرد.



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 هنگامی‌که 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 هنگامی‌که 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 مسأله نتایج زیر به‌دست‌آمده 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 درنتیجه 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

www.SID.ir

Archive of SID

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.

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 درنتیجه باعث کاهش انتقال گرما کلی می‌شود.

افزایش ارتفاع در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار، ابتدا باعث افزایش و سپس باعث کاهش عدد نوسلت می‌شود.

در چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار، 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 همه‌ی حالت‌ها هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی بدون پره و هم برای چاه گرمایی‌های ساخته شده از فوم آلومینیومی پره‌دار، 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 پره‌دار 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 پره‌دار، ارتفاعی که در آن بیشترین مقدار عدد نوسلت رخ می‌دهد، بیشتر می‌شود.

با افزایش تعداد پره‌های آلومینیومی قرار داده‌شده 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 Colorodo 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.

[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] Odabaee 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., Wittarsian D.P.D., Bergman T.L., Lavine A.S., Introduction to Heat Transfer, 2007.

www.SID.ir