بررسی جریان و انتقال حرارت در یک کویل متخلخل به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

میثم محمودی[۱]

[۱] مربی،گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، m.mahmoudi@velayat.ac.ir

چکیده

امروزه بهینه سازی و بهبود بهره وری تجهیزات صنعتی یکی از مهم ترین مسائل روز می باشد که یکی از مسائلی که در این زمینه توجهات زیادی را به خود جلب کرده است افزایش انتقال حرارت در لوله ها و کویل ها با استفاده از فوم های فلزی می باشد. همچنین جهت بهینه سازی این سیستم ها پارامترهای بسیاری بر جریان و انتقال حرارت دراین تجهیزات موثرند که دینامیک سیالات محاسباتی یک ابزار قدرتمند برای بررسی این پارامترها و نحوه تاثیر هرکدام است. در کار حاضر به شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت در کویل متخلخل فوم فلزی از جنس آلومینیوم پرداخته شده است هدف از شبیه سازی بررسی تاثیر استفاده از فوم فلزی بر جریان و انتقال حرارت می باشد. بدین منظور دو حالت جریان هوا و انتقال حرارت در کویل معمولی و کویل متخلخل را با یکدیگر مقایسه می کنیم. نتایج شبیه سازی ها نشان داد که استفاده از فوم فلزی می تواند با افزایش ضریب انتقال حرارت موثر در ناحیه متخلخل موجب افزایش شدید نرخ انتقال حرارت شود. همچنین استفاده از فوم فلزی در کویل و ایجاد تخلخل علاوه بر افزایش انتقال حرارت می تواند موجب افزایش افت فشار گردد به طوری که برای جریان هوا در کویل معمولی افت فشار برابر 0.199305 Pa و برای جریان هوا در کویل متخلخل با درصد تخلخل 79.6% برابر 0.361788 Pa بدست آمد. بنابراین استفاده از فوم فلزی در کویل و ایجاد تخلخل هم موجب افزایش نرخ انتقال حرارت شده و هم موجب افزایش افت فشار می شود. بنابراین در تجهیزات صنعتی که نیاز به افزایش نرخ انتقال حرارت وجود دارد، استفاده از فوم فلزی می تواند این نیاز را برآورده کرده ولی برای جبران افت فشار حاصله باید از یک پمپ یا کمپرسور قوی تری استفاده شود.

واژه های کلیدی

انتقال حرارت، کویل متخلخل، فوم فلزی،

مقدمه

یکی از صورت های انتقال حرارت جابجایی، انتقال گرمای جابجایی طبیعی است، در این نوع انتقال گرما که بین یک جسم ساکن و یک سیال صورت می گیرد، سیال حرکت بسیار آرامی دارد. بر خلاف انتقال گرمای جابجایی اجباری عامل حرکت سیال نیروی خارجی از قبیل پمپ و یا فن نیست، بلکه به واسطه نیروهای شناوری به تدریج انتقال حرارت با سطح انجام می شود.[۱]

امروزه مصرف انرژی در جهان با یک نرخ رشد هشدار دهنده در حال افزایش است. طبق اعلام سازمان انرژی بین الملل تا سال ۲۰۱۷ هنوز سوخت های فسیلی تامین کننده ی 81% میزان تقاضای انرژی در جهان می باشند. با نیاز روز افزون جهان به منابع انرژی بیشتر، در کنار راه های جدید تولید انرژی پاک مانند انرژی خورشیدی و زمین گرمایی و باد و هسته ای و ... یکی از راه ها بهبود عملکرد و بازدهی دستگاه ها و تجهیزات صنعتی از منظر انتقال حرارت و یا در برخی کاربردها کاهش هدر رفت گرمایی آن ها می باشد. به همین دلیل شناخت پارامترهای موثر بر جریان سیال و همچنین انتقال حرارت جهت بهینه سازی عملکرد دستگاه های صنعتی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. [۱]

بهبود انتقال حرارت در سیستم های مهندسی مانند انواع مبدل های حرارتی پوسته-لوله و مبدل های لوله فین دار و یا مبدل های کاتالیزوری و مبدل های واکنشی که برای خنک کاری حرارت ناشی از واکنش شیمیایی استفاده می شوند و یا خنک کاری تجهیزات الکترونیکی همواره یکی از چالش های اساسی برای مهندسین بوده است. بدین منظور روش های گوناگونی چه از دیرباز مانند استفاده از سطوح گسترش یافته (پره ها) و تیغه ها و بلوک ها و چه روش های جدیدتر و پیشرفته تر مانند استفاده از نانو ذرات فلزی با ضریب هدایت حرارتی بالا در ابعاد نانو (نانوسیالات) و یا استفاده از فوم های فلزی در جریان سیال به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت پیشنهاد شده و تحقیقات گسترده ای در این زمینه ها انجام گرفته است.

از آنجایی که برای بهبود عملکرد حرارتی این تجهیزات لازم است تا تمامی پارامترهای موثر در فرآیند انتقال حرارت و میزان و نحوه تاثیر هر کدام شناسایی شود، بنابراین نیاز به مطالعات و پژوهش های گسترده ای در این زمینه می باشد. همچنین چون جریان سیال نیز در میزان و نحوه انتقال حرارت بسیار موثر است بنابراین نیاز است تا اطلاعات کاملی از جریان سیال نیز در دسترس باشد که در این زمینه از دیرباز پژوهش های بسیار زیادی صورت گرفته است. بنابراین برای شناخت صحیح پارامترهای موثر در انتقال حرارت باید جریان سیال و فرآیند انتقال حرارت در تجهیزات و دستگاه های مورد نظر به صورت همزمان صورت پذیرد و تاثیر هر یک از پارامترها به طور جداگانه مورد بررسی قرار بگیرد. [۱]

پژوهش های آزمایشگاهی و تجربی در زمینه انتقال حرارت در تجهیزات صنعتی ممکن است پرهزینه و زمان بر باشد. علاوه براین ممکن است پارامترهای زیادی در فرآیند انتقال حرارت موثر باشند و بررسی همه ی آن پارامترها نیاز به تعداد آزمایش های بسیار بالایی باشد که این خود هم هزینه و هم زمان پژوهش را بالا می برد. همچنین ممکن است مشاهده جریان و بررسی پارامترهای موثر جریان بر انتقال حرارت بدلیل محیط نامناسب و پیچیدگی تجهیزات بسیار سخت و یا عملا غیر ممکن باشد. [۱]

امروزه با پیشرفت کامپیوترها دینامیک سیالات محاسباتی و شبیه سازی و حل عددی یک ابزار قدرمند برای ادامه پژوهش های مختلف در زمینه های جریان و انتقال حرارت می باشد که میزان هزینه های ناشی از آزمایشات تجربی مختلف را به میزان قابل توجهی کاهش داده است. علاوه براین قابلیت بررسی پارامتری در حل های عددی موجب تسریع در بررسی پارامترهای مختلف موثر در این پژوهش ها شده که برای زمانی که تعداد پارامترها زیاد باشد بسیار موثر است. همچنین در شبیه سازی های عددی مشاهده شکل جریان و اندازه گیری تمامی پارامترها ممکن و به سادگی امکان پذیر است.

در کار حاضر به بررسی عددی جریان و انتقال حرارت در مجرایی که توسط فوم فلزی (محیط متخلخل) پر شده است می پردازیم. بنابراین معادلات و مفاهیم مربوط به جریان و انتقال حرارت در محیط متخلخل و قانون دارسی-برینکمن-فورچیمر در این شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. همچنین برای شبیه سازی جریان و فرآیند انتقال حرارت در کویل متخلخل و گسسته سازی و حل عددی معادلات حاکم از نرم افزار انسیس و ماژول فلوئنت استفاده شده است که بر مبنای روش حجم محدود می باشد. شبیه سازی به صورت جریان آرام، تراکم ناپذیر و پایا در یک کویل متخلخل صورت گرفته است. همچنین برای نشان دادن تاثیر استفاده از فوم فلزی بر جریان و انتقال حرارت، نتایج مربوط به جریان هوا و انتقال حرارت در یک کویل معمولی و یک کویل متخلخل را با هم مقایسه می گردد

با توجه به نیاز روز افزون جهان به انرژی و همچنین ضرورت بهبود عملکرد دستگاه ها و تجهیزات صنعتی که همگی با مصرف انرژی همراه اند، جهت بهبود عملکرد تجهیزات حرارتی و یا خنک کاری یا ذخیره انرژی در آن ها نیاز به فهم مفاهیم مرتبط با جریان و مکانیزم های انتقال حرارت می باشیم. یکی از روش های بهبود عملکرد حرارتی در این تجهیزات استفاده از فوم های فلزی که به عنوان محیط متخلخل شناخته می شوند و مفاهیم و معادلات مربوط به جریان سیال و فرآیند انتقال حرارت در محیط های متخلخل می باشد که تحقیقات و بررسی های آزمایشگاهی و مدل سازی های عددی زیادی در این زمینه صورت گرفته که در زیر به برخی از آن ها اشاره می شود.

ونگ و همکاران به بررسی عددی تاثیر اعمال فوم فلزی در لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی پرداختند. آنها به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی و پیکره بندی و درصد تخلخل فوم فلزی بر مقاومت جریان، انتقال حرارت و عملکرد هیدرولیکی-حرارتی جاذب پرداختند. آن ها دریافتند که در شرایط عملکرد حرارتی بهینه بیشینه اختلاف دمای محیطی در سطح خارجی لوله جاذب حدود ۴۵٪ کاهش می یابد که موجب کاهش شدید تنش های حرارتی خواهد شد. همچنین نشان دادند که برای یک پیکره بندی و درصد تخلخل ثابت، پارامتر هندسیH که بیانگر ارتفاع بی بعد فوم فلزی می باشد تاثیر بسزایی در عملکرد حرارتی جاذب دارد. در حالیکه برای یک پیکره بندی و پارامتر هندسی ثابت، تاثیر درصد تخلخل روی عملکرد حرارتی جاذب اندک می باشد. علاوه براین پیکره بندی از نظر شار حرارتی غیر یکنواخت نیز بشدت انتقال حرارت در جاذب را تحت تاثیر قرار می دهد. [۲]

بیانچی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی و عددی انتقال حرارت در یک راکتور لوله ای تک فاز پر شده با فوم فلزی پرداختند. تمرکز ویژه کار آن ها نیز بر روی نقش کوپلینگ بین فوم فلزی و دیواره لوله راکتور بوده است. در بررسی آزمایشگاهی آن ها انتقال حرارت پایا را در یک لوله به قطر داخلی ۲۸ میلی متر که با فوم پر شده بود در نرخ جریان های بین 15-35 NL/min و با درصد تخلخل بین 89-95% مورد آزمایش قرار دادند. بدین منظور پروفیل دمای شعاعی و محوری در فوم داخلی و در دیواره لوله در شرایط مختلف گرمایش و سرمایش در محدوده دمایی 400-800K را بدست آوردند. سپس با استفاده از این داده ها رابطه ای برای ضریب انتقال حرارت دیواره به صورت تابعی از شرایط آزمایش و خواص ساختاری فوم بدست آوردند. در بررسی عددی نیز یک مدل سه بعدی انتقال حرارت دوگانه را هم در ناحیه جامد دیواره و هم در ناحیه سیال توسط روش حجم محدود مطالعه کردند. نتایج عددی و آزمایشگاهی آن ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت دیواره به شدت وابسته به رسانندگی حرارتی گاز و هندسه فوم فلزی بوده، اما به سرعت جریان چندان وابسته نمی باشد[۳]

رانوت، نوبیل و مانچینی برای توصیف دقیق میکروساختار فوم با رزولوشن بالا جهت استفاده هندسه فوم در بررسی دینامیک سیالات محاسباتی از یک روش سه بعدی برپایه پرتونگاری مقطعی x-ray استفاده کردند. آن ها تحلیل دینامیک سیالاتی خود را برای سه نوع مختلف فوم آلومینیومی سلول باز انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد که فوم های آلومینیومی سلول باز ابزار موثری در افزایش انتقال حرارت می باشند. همچنین روش پرتونگاری مقطعی x-ray نیز ابزاری معتبر جهت دستیابی به جزئیات میکروساختار فوم فلزی در استفاده از مدلی برای تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی است که در عین سادگی از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه است. [۴]

ژو و همکاران به بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانو سیال در مجرای پر شده با فوم فلزی جهت دستیابی به میدان سرعت و دمای سیال و همچنین تاثیر برخی پارامترهای کلیدی روی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در محیط متخلخل پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که هم افت فشار و هم عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانو سیال افزایش می یابد، اما افزایش افت فشار صعودی است درحالیکه افزایش عدد ناسلت نزولی می باشد که بیانگر این است که افزودن هرچه بیشتر نانوذرات با اینکه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می شود اما باعث افت فشار خیلی بیشتری خواهد شد که از یه جایی به بعد به صرفه نمی باشد. [۵]

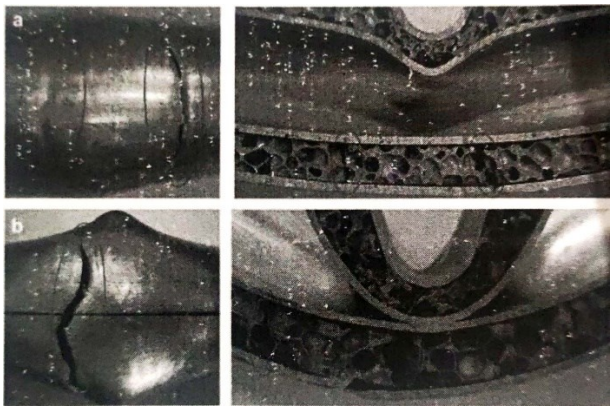
هو و همکاران به بررسی آزمایشگاهی استفاده از فوم فلزی جهت بهبود عملکرد مشخصه های تهویه هوا، انتقال حرارت و افت فشار جریان هوای مرطوب در فوم فلزی تحت شرایط تهویه مطبوع پرداختند و نتایج خود را با نتایج بدست آمده از مبدل حرارتی لوله-پره با حجم مشابه مقایسه نمودند. نتایج آن ها نشان داد که با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی نرخ انتقال حرارت کلی و افت فشار در فوم فلزی افزایش می یابد و بیشینه افزایش آن ها به ترتیب ۶۷ و ۶۲ درصد می باشد. همچنین با افزایش PPI فوم فلزی که بیانگر تعداد حفره ها در هر اینچ می باشد نرخ انتقال حرارت در ابتدا اندکی کاهش یافته و سپس افزایش می یابد. ظرفیت انتقال حرارت مبدل حرارتی با فوم مسی بین 56- 196% در مقایسه با مبدل حرارتی لوله و پره افزایش می یابد. [۶]

بامروت عبدی و چون کیم به بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت و افت فشار در لوله های کوچک پر شده با فوم فلزی پرداختند. آزمایشات آن ها به صورت تک فاز و در لوله های مسی با قطر داخلی ۴ میلی متر پر شده با فوم فلزی مسی و سیال مبرد R245fa با شار جرمی $200\text{-}1000\ \frac{kg}{m^2 s}$ انجام گرفت. آن ها داده های مربوط به ضریب انتقال حرارت و افت فشار را ارائه و با داده های مربوط به لوله های بدون فوم فلزی مقایسه کردند. همچنین روابط ارائه شده موجود در مقالات و نشریات نیز تطابق خوبی با داده های تجربی آن ها نداشتند و دلیل اصلی آن نیز این است که اکثر این روابط برای مجراهای بزرگتر ارائه شده اند. بنابراین با توجه به داده های آزمایشگاهی که که بدست آوردند، برای ضریب انتقال حرارت و افت فشار در مجاری کوچک پر شده با فوم فلزی روابط جدیدی را ارائه دادند. [۷]

گانگاپاتنام، کوریان و ونکاتشان به بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری در فوم های آلومینیومی با تخلخل بالا پرداختند. مدلسازی عددی آن ها در هر دو شرایط تعادل حرارتی محلی و عدم تعادل حرارتی محلی در نرم افزار انسیس-فلوئنت انجام گرفت و سپس نتایج خود را با داده های آزمایشگاهی جریان هوا در مجرای عمودی پر شده با فوم آلومینیومی برای شار حرارتی و سرعت های مختلف صحت سنجی کردند. آن ها مشاهده کردند که شرایط تعادل حرارتی محلی انتقال حرارت در این فوم ها را خیلی کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند در حالیکه در شرایط عدم تعادل حرارتی محلی عدد ناسلت به درستی پیش بینی می شود. همچنین آن ها تاثیر ضخامت فوم فلزی را بر انتقال حرارت در این فوم ها بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اگرچه ضخامت بالاتر ضریب انتقال حرارت را افزایش می دهد اما این افزایش ضریب انتقال حرارت نزولی بوده و از یک نقطه ای به بعد دیگر افزایش بیشتر ضخامت فوم فلزی تاثیر چندانی در انتقال حرارت نمی گذارد. [۸]

یانگ و همکاران به شبیه سازی عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی به صورت یک مدل دوبعدی متقارن محوری یک واحد ذخیره انرژی حرارتی مبدل پوسته و لوله پرداختند. رسانندگی حرارتی پایین مواد تغییر فاز دهنده بازدهی ذخیره انرژی را به طور جدی محدود می کند. به همین دلیل یک فوم فلزی سلول باز با درصد تخلخل ۹۴٪ و ۱۵ حفره در هر اینچ در ناحیه سیال کاری یا ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است. آن ها همچنین تاثیر محل قرارگیری فوم فلزی و درصد تخلخل آن را بر عملکرد ذخیره حرارتی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که استفاده از فوم فلزی بدلیل کاهش مقاومت حرارتی در انتقال حرارت سیال می تواند باعث افزایش چشمگیری در انتقال حرارت شود. بیشترین افزایش در انتقال حرارت زمانی است که هم در ناحیه سیال کاری و هم در ناحیه ماده تغییر فاز دهنده از فوم فلزی استفاده شود. نتایج حاکی از آن است که در این حالت در مقایسه با یک لوله بدون استفاده از فوم فلزی زمان ذوب 88.548% کاهش می یابد. علاوه براین استفاده از فوم فلزی در ماده تغییر فاز دهنده می تواند باعث بهبود یکنواختی دما در این ناحیه شود[۹]

لویی و جیلین, به تجزیه تحلیل لوله های پرشده با فوم فلزی تحت بارگذاری های دینامیکی متفاوت پرداختند . نتایج این مطالعه نشان می دهد که حالت تغییر شکل این ساختار تحت بارگذاری های ضربه ای با شدت های مختلف است . این مطالعه آن ها بیشتر به تجزیه و تحلیل اثرات تنش و استاتیم لوله های پرشده از تخلخل فلزی بود . در شکل ۱ نتیجه شکست این قطعات مشخص شده است. [۱۲]



شکل۱. اثرات مقاومتی بر لوله های دارای تخلخل در کار لویی و جیلین [۱۲]

بومنسما و پولیکاکس , به مدل سازی هدایت حرارتی موثر در مدل یک فوم متخلخل اشباع شده بر اساس هندسه متخلخل به صورت سه بعدی پرداختند . در این کار شکل هندسی حاصل از پر کردن یک فضی داده شده با منفذ هایی با اندازه برابر که حداقل سطح تخلخلی را تولید میکند تعریف شده و بر این اساس تعاریف پایه ای برای هدایت حارتی موثر برای فوم های مختلف در این مقاله گزارش شده است . [۱۳]

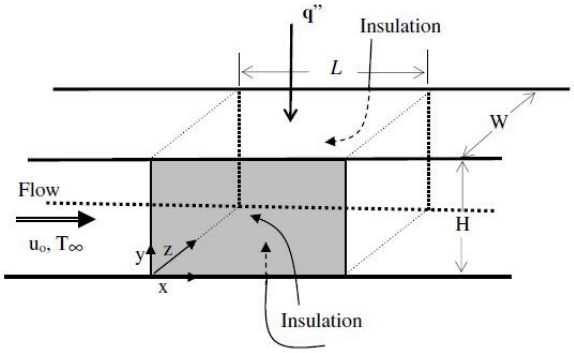
لو و همکاران, تحلیلی از ویژگی های انتقال حرارت اجباری در لوله های فوم دار تخلخل مختلف را بررسی نمودند که تحلیل آن ها مدل دارسی برای حرکت و دو مدل انتقال حرارت جامد و سیال برای محیط متخلخل مورد استفاده قرار گرفته است در شکل ۲, نمونه ای از لوله های دارای تخلخل در مدل آن ها می باشد که از آن استفاده کرده اند . نتایج آن ها نشان می دهد که اندازه منافذ و تخلخل فوم های فلزی نش مهمی در عملکرد کلی تبادل حرارت در لوله دارد. [۱۴]

شکل۲.نمونه ای کاربردی از فوم دارای تخاخل در بررسی لو و همکاران [۱۴]

مانسین و همکاران , به بررسی انتقال حرارت و تحلیل افت فشار در فوم های مسی یه صورت آزمایشگاهی پرداختند و از طریق پنج نمونه مختلف فوم مس ,نمونه های مختلف با تعداد ۵,۱۰,۲۰و۴۰ منفذ در هر اینچ را مورد اندازه گیری قرار دادند . طی اندازه گیری های آزمایشی گزارش شده آن ها در این مقاله دریافتند انتقال حرارت و جریان سیالات در فوم های فلزی افزایش می یابد. [۱۵]

معرفی مساله

هندسه ی در نظر گرفته شده برای مسئله ی حاضر درشکل ۱ نشان داده شده است. مسئله حاضر شامل جریان هوا و انتقال حرارت در یک کویل متخلخل فوم فلزی به صورت شکل ۳ است. [۱۱]



شکل ۳. طرحی از هندسه مساله

معادلات حاکم، شرایط مرزی و روش حل عددی

معادلات حاکم بر جریان سیال معادلات بقایی جرم و مومنتوم می باشند. برای جریان در یک محیط متخلخل برای اینکه تاثیر تخلخل و افت فشار جریان در گذر از محیط متخلخل نیز در نظر گرفته شود، معادله مومنتوم با در نظر گرفتن ترم هایی به صورت معادله دارسی-برینکمن-فورچیمر تبدیل می شود :

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \qquad (۱)$$

معادله مومنتوم :

$$\frac{\mu}{\varepsilon}\nabla^2 u - \frac{\mu}{k}u - \rho F \frac{\varepsilon}{\sqrt{k}}u^2 - \frac{dP}{dx} = 0 \qquad (۲)$$

همچنین برای بدست آوردن توزیع دمای حالت پایا در سیال نیز لازم است تا معادله ی انرژی حل گردد

معادله انرژی:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + \dot{Q} \qquad (۳)$$

که $\mu.\varepsilon.\rho.u.k.P.C_p.T.K_{eff}$ به ترتیب ضریب هدایت موثر محیط متخلخل، دمای سیال، ظرفیت گرمایی ویژه، فشار، نفوذپذیری محیط متخلخل، سرعت، چگالی، تخلخل و لزجت دینامیکی سیال می باشند.

فرضیاتی که در شبیه سازی در نظر گرفته شده است به شرح زیر است :

- جریان تراکم ناپذیر، لزج، پایا و غیرایزوترم است
- سیال کاری هواست که در کویل متخلخل فوم فلزی از جنس آلومینیوم جریان می یابد
- خواص فیزیکی مواد ثابت در نظر گرفته می شوند
- جریان به صورت تک فاز مدل می شود
- چون جریان تک فاز است و نیروی بویانسی نیز در نظر گرفته نشده است، لذا از شتاب گرانش صرف نظر می شود
- تمام سطح مقطع کویل متخلخل با درصد تخلخل 79.6% در نظر گرفته می شود

شرایط مرزی:

ورودی :

جریان با سرعت یکنواخت $u_0 = 1.99\ \frac{m}{s}$ و دمای $T_\infty = 300\ k$ وارد کویل متخلخل می شود.

خروجی :

جریان در خروجی به اتمسفر تخلیه می شود، بنابراین شرط مرزی خروجی فشار گیج صفر می باشد.

دیواره بالا :

از نظر هیدرودینامیکی برای این دیواره شرط مرزی عدم لغزش و از نظر حرارتی شرط مرزی شار ثابت برابر با $q" = 29900\ \frac{w}{m^2}$ برقرار می باشد.

دیواره پایین :

در دیواره پایین نیز از نظر هیدرودینامیکی شرط عدم لغزش برقرار بوده و از نظر حرارتی کلیه این دیواره عایق بندی است که شرط مرزی شار حرارتی برابر صفر معادل شرط مرزی عایق حرارتی می باشد.

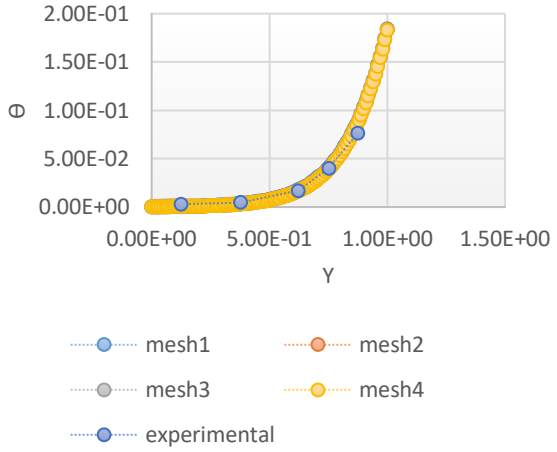
نتایج و بحث

معادلات حاکم و شرایط مرزی با استفاده از روش عددی حجم محدود حل شده و برای کوپل سرعت و فشار الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. برای حصول مش اقتصادی و بررسی استقلال شبکه چهار نوع شبکه و بررسی میزان وابستگی نتایج به شبکه انتخاب شده، شکل ۴ نمایی از مش بندی محفظه را نشان می دهد. آزمون استقلال شبکه بر روی مدل نمونه با چندین شبکه مختلف انجام شده است و به این منظور مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵بررسی استقلال شبکه تغییرات دمای بی بعد هر یک از چهار شبکه را با نتایج تجربی موجود مقایسه گردیده است. نتایج مربوط به تمامی شبکه ها برهم منطبق بوده و همچنین با نتایج تجربی موجود در کار دوخان و چن نیز انطباق دارد.

بنابراین حتی درشت ترین شبکه که Mesh1 با 4000 هزار سلول است نیز قابل استفاده بوده و نتایج معتبری را ارائه می دهد. اما برای اطمینان بیشتر از صحت نتایج شبکه Mesh3 را به عنوان شبکه معیار انتخاب کرده و بقیه محاسبات و نتایج را با شبکه سوم انجام می دهیم.

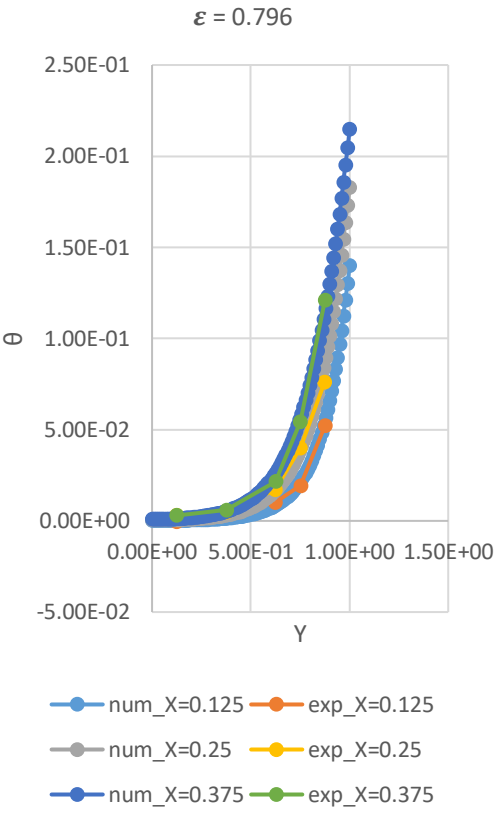
Mesh1	Mesh2	Mesh3	Mesh4
$10 \times 20 \times 20$	$20 \times 40 \times 40$	$40 \times 80 \times 80$	$80 \times 160 \times 160$

شکل ۴. نمایش مش بندی مورد مطالعه



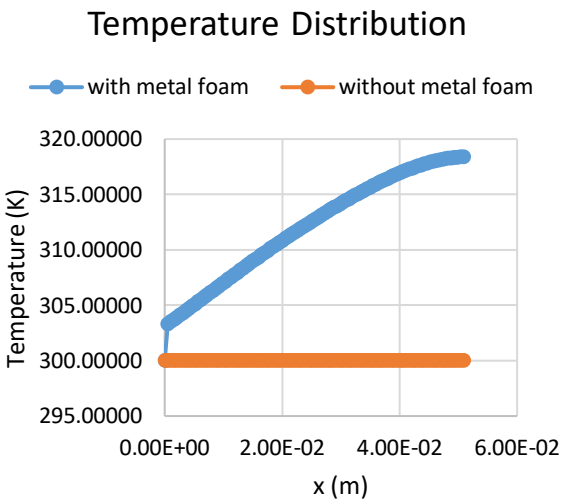
شکل ۵. بررسی استقلال از شبکه محاسباتی

جهت اعتبارسنجی حل عددی انجام شده نتایج مربوط به دمای بی بعد بدست آمده از داده های تجربی کار دوخان و چن را با نتایج حل عددی بدست آمده را مقایسه می کنیم. شکل ۶ این مقایسه را نشان می دهد.



شکل ۶. بررسی اعتبارسنجی

همانطور که در شکل ۶ مشهود است نتایج حل عددی با نتایج تجربی موجود در مقاله دوخان و چن، در سه مقطع در نظر گرفته شده کاملا منطبق بوده و نتایج حل عددی قابل استناد می باشد. برای نشان دادن تاثیر فوم فلزی بر جریان و انتقال حرارت، نتایج مربوط به جریان هوا در یک کویل معمولی بدون فوم فلزی را با نتایج مربوط به جریان هوا در یک کویل متخلخل با فوم فلزی از جنس آلومینیوم مقایسه می کنیم. بدین منظور توزیع دما را بر روی خط زرد رنگ نشان داده شده در تصویر زیر که از در $y = 0.09m$ قرار دارد و از ورودی کویل تا خروجی امتداد می یابد برای دو حالت جریان هوا در یک کویل معمولی و یک کویل متخلخل رسم می کنیم.



شکل ۷. توزیع دما در یک کویل معمولی در مقایسه با کویل متخلخل با فوم فلزی

با توجه به نمودار شکل ۷، در حالت جریان در کویل بدون فوم فلزی دمای سیال ورودی افزایش نیافته و با همان 300 کلوین که وارد شده از کویل خارج می شود که این نشان دهنده ی اندک بودن ضریب انتقال حرارت هوا می باشد. اما در حالت جریان در کویل متخلخل با فوم فلزی همانطور که از نمودار دیده می شود، هوا با دمای 300 کلوین وارد شده و با دمای حدود 318 کلوین از کویل خارج می شود. این افزایش دما نسبت به حالت کویل بدون فوم نشان می دهد که قرار دادن فوم فلزی در کویل می تواند با افزایش ضریب انتقال حرارت موجب افزایش انتقال حرارت سیستم شود. از منظر افت فشار، قرار دادن فوم فلزی در کویل و ایجاد تخلخل می تواند باعث افزایش افت فشار در عبور جریان از کویل شود. نتایج حل عددی نشان می دهد که افت فشار در جریان عبوری از کویل متخلخل فلزی برابر 0.361788 Pa بوده و افت فشار در جریان هوای عبوری از کویل بدون فوم فلزی برابر 0.199305 Pa می باشد. بنابراین با اینکه قرار دادن فوم فلزی در کویل می تواند موجب افزایش انتقال حرارت شود، اما از طرفی موجب افزایش افت فشار نیز خواهد شد و بنابراین نیاز خواهد بود تا از پمپ قوی تری استفاده شود.

نتیجه گیری

در کار حاضر به شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت در کویل متخلخل فوم فلزی از جنس آلومینیوم پرداخته شده است هدف از شبیه سازی بررسی تاثیر استفاده از فوم فلزی بر جریان و انتقال حرارت می باشد. بدین منظور دو حالت جریان هوا و انتقال حرارت در کویل معمولی و کویل متخلخل را با یکدیگر مقایسه می کنیم. نتایج شبیه سازی ها نشان داد که استفاده از فوم فلزی می تواند با افزایش ضریب انتقال حرارت موثر در ناحیه متخلخل موجب افزایش شدید نرخ انتقال حرارت شود. همچنین استفاده از فوم فلزی در کویل و ایجاد تخلخل علاوه بر افزایش انتقال حرارت می تواند موجب افزایش افت فشار گردد به طوری که برای جریان هوا در کویل معمولی افت فشار برابر 0.199305 Pa و برای جریان هوا در کویل متخلخل با درصد تخلخل 79.6% برابر 0.361788 Pa بدست آمد. بنابراین استفاده از فوم فلزی در کویل و ایجاد تخلخل هم موجب افزایش نرخ انتقال حرارت شده و هم موجب افزایش افت فشار می شود. بنابراین در تجهیزات صنعتی که نیاز به افزایش نرخ انتقال حرارت وجود دارد، استفاده از فوم فلزی می تواند این نیاز را برآورده کرده ولی برای جبران افت فشار حاصله باید از یک پمپ یا کمپرسور قوی تری استفاده شود.

مراجع و منابع

[1] J. Y. Z. G. L. J. Y.-L. H. Xiaohu Yanga, "Role of porous metal foam on the heat transfer enhancement for a thermal energy storage tube," *elsevier,* vol. 239, no. Applied Energy, pp. 142-156, 2019.

[2] D. L. C. X. P. Wang, "Numerical study of heat transfer enhancement in the receiver tube of direct steam generation with parabolic trough by inserting metal foams," *elsevier,* vol. 102, no. Applied Energy, pp. 449-460, 2013.

[3] b. T. H. C. G. V. G. G. F. E. T. Enrico Bianchia, "Heat transfer properties of metal foam supports for structured catalysts: Wall heat transfer coefficient," *elsevier,* vol. 216, no. Catalysis Today, pp. 121-134, 2013.

[4] E. N. L. M. Paola Ranut, "High resolution microtomography-based CFD simulation of flow and heat transfer in aluminum metal foams," *elsevier,* vol. 69, no. Applied Thermal Engineering, pp. 230-240, 2014.

[5] L. G. S. H. M. X. Huijin Xu, "Flow and heat transfer characteristics of nanofluid flowing through metal foams," *elsevier,* vol. 83, no. International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 399-407, 2015.

[6] X. W. D. Z. G. D. Z. L. X. X. Haitao Hu, "Heat transfer and pressure drop characteristics of wet air flow in metal foam under dehumidifying conditions," *elsevier,* no. Applied Thermal Engineering, pp. 1-26, 2015.

[7] K. C. K. Gholamreza Bamorovat Abadi, "Experimental heat transfer and pressure drop in a metal-foam-filled tube heat exchanger," *elsevier,* vol. 82, no. Experimental Thermal and Fluid Science, pp. 42-49, 2017.

[8] P. G. R. K. S. P. Venkateshan, "Numerical simulation of heat transfer in metal foams," *Springer,* vol. 54, no. Heat and mass transfer, pp. 553-562, 2018.

[9] J. Y. Z. G. L. J. Y.-L. H. Xiaohu Yanga, "Role of porous metal foam on the heat transfer enhancement for a thermal energy storage tube," *elsevier,* vol. 239, no. Applied Energy, pp. 142-156, 2019.

[10] R. M. M. G. D. T. M. A. Hossein Arasteh, "Heat transfer enhancement in a counter-flow sinusoidal parallel-plate heat exchanger partially filled with porous media using metal foam in the channels' divergent sections," *Thermal Analysis and Calorimetry,* vol. 141, pp. 1669-1685, 2020.

[11] K.-C. C. Nihad Dukhan, "Heat transfer measurements in metal foam subjected to constant heat flux," *Elsevier,* vol. 32, no. Experimental Thermal and Fluid Science, pp. 624-631, 2007.

[12] S. Mahjoob, K. Vafai, A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers, Int. J. Heat Mass Transfer 51 (2008) 3701–3711.
[13] S. Mahjoob, K. Vafai, Analysis of bioheat transport through a dual layer biological media, ASME J. Heat Transfer 132 (2010) 031101.1–031101.14.
[14] K. Yang, K. Vafai, Analysis of temperature gradient bifurcation in porous media – An exact solution, Int. J. Heat Mass Transfer 53 (2010) 4316–4325.
[15] K. Vafai, R. Thiyagaraja, Analysis of flow and heat transfer at the interface region of a porous medium, Int. J. Heat Mass Transfer 30 (1987) 1391–1405.