

شبیه‌سازی انتقال حرارت در خشک‌کن آب گرم محصولات کشاورزی

حسن غفوری ورزنده^۱

چکیده

استفاده از مواد متخلخل درون خشک‌کن‌های آب گرم، به دلیل اینکه موجب افزایش انتقال حرارت می‌شوند، به صورت کاربردی در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این موارد، عملکرد گرمایی کانال‌های حرارتی به مقدار زیادی تحت تأثیر چیدمان مواد متخلخل در داخل کانال است. لذا هدف از این تحقیق که به روش شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار Ansys Fluent 16 انجام شد، بهبود انتقال حرارت در خشک‌کن‌های آب گرم با استفاده از هندسه‌های جدید مواد متخلخل است. برای این منظور، اثر ۵ نوع هندسه مختلف برای ماده متخلخل (با حجم‌های مساوی) در ۵ ارتفاع بی‌بعد مختلف فوم فلزی (۱، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۴ و ۰/۲) و اثر دو قطر منافذ متفاوت (۰/۱ و ۰/۰۵ سانتی‌متر) بر روی شاخص‌های هیدرودینامیکی و انتقال حرارت جریان از جمله عدد میانگین ناسلت و پارامتر ارزیابی عملکرد (PEC) بررسی شد. ماده متخلخل، آلیاژی از آلومینیوم با ضریب هدایت حرارتی $40 \text{ W/m}^2\text{K}$ و با تخلخل ۰/۹۵ در یک سینی حرارتی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که قرارگیری مواد متخلخل درون سینی حرارتی، موجب افزایش عدد ناسلت و در نتیجه انتقال حرارت گردید. همچنین افزایش قطر منافذ در فوم‌های فلزی، موجب افزایش عدد ناسلت شد. بیشترین عدد PEC مربوط به حالتی بود که قطر منافذ برابر با ۰/۱ سانتی‌متر و ارتفاع بدون بعد مواد متخلخل برابر با ۰/۲ بود.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، خشک‌کن آب گرم، دینامیک سیالات محاسباتی، ماده متخلخل.

ارجاع: غفوری ورزنده ح. ۱۴۰۱. شبیه‌سازی انتقال حرارت در خشک‌کن آب گرم محصولات کشاورزی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۳: ۱۸-۹. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.10134.554>

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول: hasangh28@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹

مقدمه

متخلخل وجود ندارد و مقدار $f=1$ برای زمانی است، که محیط متخلخل وجود دارد.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v u) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n f \mu_e \frac{\partial u}{\partial r}) - f \frac{\mu u}{K} - f \frac{\rho F}{\sqrt{K}} |u| u \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \rho v v) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r}(r^n \mu_e \frac{\partial v}{\partial r}) - f \frac{\mu v}{K} - f \frac{\rho F}{\sqrt{K}} |u| v - \frac{\mu v}{r^2} n \quad (3)$$

u : سرعت در جهت x (ms^{-1})

v : سرعت در جهت r (ms^{-1})

r : شعاع (m)

μ : ویسکوزیته دینامیکی ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

f : ضریب تأثیر (بدون بعد)

n : ضریب تأثیر (بدون بعد)

K : نفوذپذیری (m^2)

معادله انرژی برای قسمتی از لوله مبدل حرارتی که فاقد فوم فلزی است، به صورت معادله (4) است (Sheikholeslami *et al.*, 2018).

$$\frac{1}{a} u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

معادله انرژی برای محیط متخلخل به صورت معادلات (5) تا (8) است (Nield & Bejan, 2013).

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f v \cdot \nabla T = (k_{eff} \nabla T) + q_m''' \quad (5)$$

$$(\rho c)_m = (1 - \varepsilon)(\rho c)_s + \varepsilon(\rho c_p)_f \quad (6)$$

$$k_{eff} = (1 - \varepsilon)k_s + \varepsilon k_f \quad (7)$$

$$q_m''' = (1 - \varepsilon)q_s''' + \varepsilon q_f''' \quad (8)$$

k_{eff} : هدایت گرمایی موثر ($\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$)

q_m''' : شار حرارتی (Wm^{-2})

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی به صورت عددی، تحلیلی و تجربی برای رسیدن به حالات بهینه برای قرارگیری ماده متخلخل درون مسیر سیال انجام شده است. با توجه به بالا بودن ضریب هدایت حرارتی و ساختار مستحکم آلومینیوم، فوم‌های فلزی آلومینیومی توجه بسیاری از محققان را برای طراحی مبدل‌های حرارتی به خود جلب کرده است. البته استفاده از تجهیزات درون لوله‌ای باعث افزایش نامطلوب افت فشار داخل لوله نیز خواهد شد (Azimi & Delavar, 2014). فوم‌های فلزی از رشته‌های کوچکی که در یک ساختار سلولی به‌طور پیوسته به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل می‌شوند. سلول‌های فوم فلزی معمولاً از ۱۲ تا ۱۴ سطح تشکیل گردیده‌اند، که هر سطح دارای شکل پنج و یا شش وجهی

برای خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در برخی از خشک‌کن‌ها، از حرارت برای خشک کردن استفاده می‌کنند. حرارت مورد نیاز برای خشک کردن در این خشک‌کن‌ها از طریق انرژی خورشید، گرم‌کن‌های الکتریکی و گرم‌کن‌های آب گرم تأمین می‌گردد. در مقیاس صنعتی و در مواردی که حجم مواد خشک شدنی زیاد باشد، از یک موتورخانه مرکزی برای تأمین حرارت مورد نیاز خشک‌کن‌ها استفاده می‌شود. انتقال حرارت آب گرم درون محفظه خشک‌کن توسط لوله‌ها، سینی‌ها و کانال‌های حرارتی انجام می‌شود. تحقیقات زیادی برای افزایش انتقال حرارت و افزایش عملکرد حرارتی سینی‌ها و کانال‌های حرارتی در خشک‌کن‌ها انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به استفاده از فین‌ها و پره‌های روی لوله، نانو سیالات، محیط‌های متخلخل داخل لوله و میدان مغناطیسی اطراف لوله اشاره کرد.

محیط‌های متخلخل کاربرد وسیعی در صنعت از جمله صافی‌ها، عایق‌ها، خشک‌کن‌ها، خنک‌کاری قطعات، مبدل‌های حرارتی، لوله‌های حرارتی و غیره دارد. از این مواد برای افزایش کارایی تبادل‌گرهای حرارتی استفاده می‌شود تا بیشترین انتقال حرارت صورت گیرد. استفاده از محیط متخلخل باعث افزایش افت فشار در مسیر جریان می‌شود.

معادلات حاکم بر سیال انتقالی در محیط متخلخل، با وارد کردن اثر تخلخل در معادلات اساسی سیالات به دست می‌آید. معادله پیوستگی در محیط متخلخل به صورت معادله (۱) است (Nield & Bejan, 2013).

$$\nabla \cdot (\rho_f v) = 0; \quad v = \varepsilon V \quad (1)$$

ρ_f : جرم حجمی سیال (Kg m^{-3})

ε : تخلخل محیط متخلخل (بدون بعد)

V : حجم حفره‌ها (m^3)

V : حجم کل محیط متخلخل (m^3)

معادله مومنوم در محیط متخلخل، در دو جهت x و r به ترتیب به صورت معادلات (۲) و (۳) است (Nield & Bejan, 2013). در این معادلات، زمانی که $n=0$ باشد، بیانگر معادلات مومنوم در کانال و زمانی که $n=1$ باشد، بیانگر معادلات مومنوم در لوله (حالت مطلوب در این پروژه) است. مقدار $f=0$ برای زمانی است، که محیط

در تحقیقی افزایش انتقال حرارت در لوله دارای ماده متخلخل، اثرات پارامترهای مختلفی از جمله ضخامت ماده متخلخل، عدد دارسی و تخلخل بر روی جریان و انتقال حرارت بررسی شده است (Rong *et al.*, 2014). این تحقیق نشان داد که کنترل کردن ضخامت ماده متخلخل، تأثیر قابل توجهی بر روی انتقال حرارت می‌گذارد و اثر تخلخل، زمانی که پارامترهای دیگر ثابت هستند، چه بر روی جریان و چه بر روی انتقال حرارت، مقدار بسیار کمی است.

بهینه‌سازی ساختار قرارگیری ماده متخلخل درون لوله، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای افزایش انتقال حرارت توسط محققین بررسی شده است (Zheng *et al.*, 2015). در این تحقیق محیط متخلخل به چند لایه در جهت شعاعی تقسیم‌بندی شده و تخلخل محیط متخلخل که متغیر طراحی محسوب می‌شود، در هر لایه، متفاوت در نظر گرفته شد و از ۰/۵ تا ۱ تغییر می‌کرد. محققان به این نتیجه رسیدند که حالت بهینه تخلخل ماده متخلخل بین ۰/۹۵ تا ۱ است و همچنین قرار دادن لایه‌های بهینه‌شده با تخلخل‌های مختلف، عملکرد ترمو-هیدرولیکی را بیش از پیش افزایش می‌دهد، به طوری که عدد بی‌بعد معیار ارزیابی عملکرد (PEC) در حالتی که محیط متخلخل شامل لایه‌های بهینه‌شده با تخلخل‌های مختلف است، ۲/۵ برابر حالتی است که از یک لایه بهینه‌شده با تخلخل مشخص استفاده می‌شود.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که پژوهش‌های مختلفی روی فوم‌های فلزی انجام شده است که عمدتاً با تغییر در نوع فوم، نحوه چیدمان، هندسه کانال و هندسه فوم، قطر منافذ و شرایط مرزی مختلف، در صدد بهینه کردن انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی هستند. لذا تغییر در پارامترهای مختلف محیط‌های متخلخل منجر به تغییر در میزان انتقال حرارت می‌گردد. به همین منظور، اثر چندین چیدمان نوآورانه با تخلخل مختلف برای بهبود عملکرد انتقال حرارت خشک‌کن‌های آب گرم مورد ارزیابی قرار گرفت.

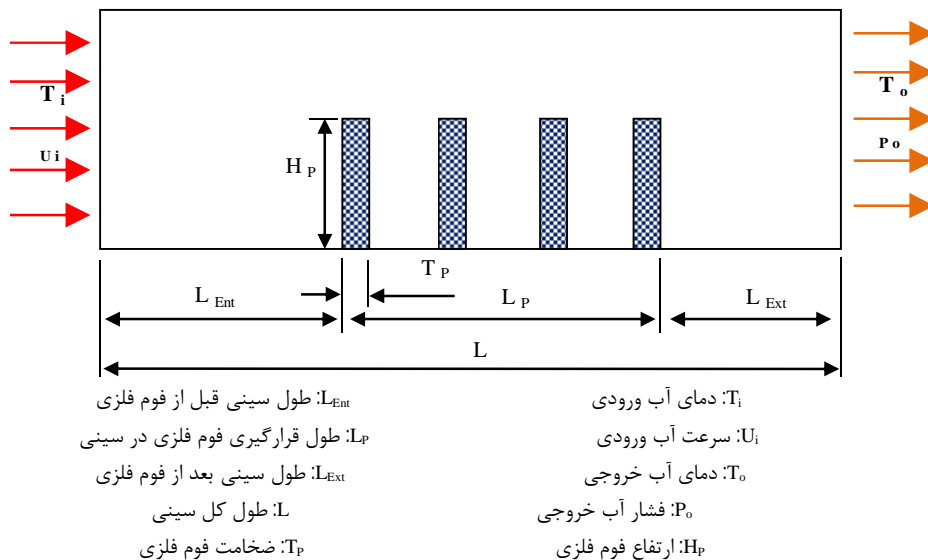
مواد و روش‌ها

در این مطالعه به بررسی جریان و انتقال حرارت در یک سینی حرارتی دارای فوم فلزی با شرط مرزی شار ثابت

است. با توجه به پیچیده بودن ساختار فوم‌های فلزی (ماده متخلخل) حل معادله انتقال حرارت داخل منافذ کار دشواری است، در نتیجه از ایده‌آل‌سازی ساختار هندسی فوم فلزی برای تحلیل و محاسبه معادلات استفاده می‌شود (Dukhan, 2006). استحکام فوم فلزی اغلب به ماده تشکیل‌دهنده و چگالی آن بستگی دارد. ویژگی‌های دیگری مانند اندازه منافذ، چگالی منافذ، چگالی سطح، اندازه و شکل سلول‌ها، روی ویژگی‌های اصلی فوم مانند افت فشار و انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد (Alazmi & Vafai, 2000). تحقیق روی لوله پر شده با فوم فلزی و شرط مرزی شار ثابت در اطراف لوله داخلی نشان داد که با افزایش چگالی منافذ به خصوص زمانی که ضریب هدایت حرارتی جامد از سیال بیشتر است، عدد ناسلت (Nusselt number) افزایش می‌یابد. در این تحقیق از فوم‌های فلزی دارای تخلخل و قطر منافذ کم (چگالی منافذ زیاد) در مبدل‌های حرارتی برای رسیدن به راندمان بالا استفاده شد که باعث افزایش افت فشار گردید (Lu *et al.*, 2006). بررسی عددی انتقال حرارت بین دو صفحه موازی که بین آنها فوم فلزی آلومینیوم قرار داده شده بود نشان داد که وجود فوم فلزی بین صفحات در مقایسه با پره‌های موازی، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد ولی باعث افزایش افت فشار می‌گردد (Kim *et al.*, 2000). در تحقیقی که به منظور بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری و جریان آرام در لوله افقی که قسمتی و یا تمام آن با ماده متخلخل پر شده است، از مدل Darcy-Brinkman-Forchheimer برای معادله مومنوم و از مدل یک معادله‌ای با شرط تعادل دمایی موضعی برای معادله انرژی استفاده گردیده است (Mohamed *et al.*, 2011). بررسی فرض تعادل گرمایی و عدم تعادل گرمایی بر عملکرد انتقال حرارت جابجایی اجباری در کانال نیمه‌پر با ماده متخلخل نشان داد که فرض عدم تعادل گرمایی برای زمانی که ماده متخلخل روی دیواره قرار دارد و فرض تعادل گرمایی برای حالتی که ماده متخلخل در مرکز قرار دارد مناسب هستند (Yang *et al.*, 2012). این پژوهش همچنین نشان داد که در محدوده توان پمپاژ پایین، عملکرد راندمان حرارتی لوله با قرارگیری ماده متخلخل در مرکز، بهتر از زمانی است که ماده متخلخل در دیواره قرار دارد و در محدوده توان پمپاژ بالا، راندمان حرارتی رفتار معکوس دارد.

کانتورهای مختلف سرعت و دما و همچنین پروفایل‌های سرعت و دما، بهینه‌ترین چیدمان به دست آمد. در شبیه‌سازی انجام شده، دیواره پایینی سینی حرارتی تحت شار حرارتی ثابت 100 W/m^2 قرار داده شد، در حالی که شار حرارتی دیواره بالایی برابر با صفر و یا عایق در نظر گرفته شد. سرعت یکنواخت با عدد رینولدز ۱۰ و دمای ثابت برابر با 300 درجه کلوین با شرط سرعت ورودی در ورودی لوله و فشار خروجی در خروجی (فشار گیج برابر با صفر) در نظر گرفته شد. برای هم‌گرایی بهتر، و جلوگیری از پخش عددی از روش بالادست مرتبه دوم در معادله مومنتوم و انرژی استفاده گردید. معیار همگرایی معادلات مومنتوم، سرعت محوری، سرعت شعاعی و انرژی به ترتیب برابر با 10^{-6} ، 10^{-6} ، 10^{-6} و 10^{-9} در نظر گرفته شد. شکل ۱، نمایی از هندسه مورد بررسی در مسأله حاضر را نشان می‌دهد.

پرداخته شد. با در نظر گرفتن حجم ثابتی از محیط متخلخل نسبت به کل حجم کانال، پنج سطح ارتفاع بی‌بعد مختلف (HP) برای فوم‌های فلزی (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱) و دو سطح قطر منافذ (Dp) (۰/۱ و ۰/۰۵ سانتی‌متر) برای فوم‌ها به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. اثر پارامترهای مذکور بر روی توزیع دما، توزیع سرعت، عدد ناسلت و عدد PEC مورد بررسی قرار گرفت. ماده متخلخل از جنس آلیاژ آلومینیوم با ضریب هدایت حرارتی $40 \text{ W/m}^2\text{K}$ و تخلخل برابر با ۰/۹۵ در نظر گرفته شد. سیال مورد استفاده آب، با خواص ترموفیزیکی ثابت است. از مدل Darcy-Brinkman-Forchheimer برای مدل‌سازی معادله مومنتوم و از مدل تعادل دمای موضعی برای مدل کردن معادله انرژی استفاده شد. در انجام این پروژه از نرم افزار Ansys Fluent نسخه ۱۶ و در حالت دوبعدی استفاده شد. در نهایت با بررسی پارامترهای بی‌بعد عدد ناسلت و معیار ارزیابی عملکرد در کنار



قابل مشاهده است، درصد خطا برای تعداد مش 1500×50 کمتر از ۱ درصد است و به عنوان مش‌بندی مناسب برای شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای اعتبارسنجی مدل‌سازی در این پژوهش، نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با نتایج تحقیق انجام شده توسط سایر محققین (Targui & Kahalerras, 2008) مقایسه گردید. در این مقایسه، تغییرات عدد ناسلت میانگین در مقابل

شبکه ایجاد شده به صورت یکنواخت با سلول‌های مربعی در نظر گرفته شد. برای ارزیابی استقلال حل از شبکه، عدد میانگین ناسلت در شبکه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، تعداد گره‌ها به همراه عدد میانگین ناسلت مربوطه نشان داده شده است. در حالت مورد بررسی، قطر منافذ فوم فلزی برابر با ۰/۰۵ سانتی‌متر (کوچکترین حالت) و ارتفاع بی‌بعد مواد متخلخل برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است. همانطور که در این جدول

است. با افزایش قطر منافذ، سرعت سیال درون محیط متخلخل افزایش می‌یابد و در نتیجه موجب افزایش انتقال حرارت می‌گردد. همچنین از آنجایی که مواد متخلخل تا حدی موجب مسدود شدن جریان می‌شوند، در نتیجه در لایه‌های مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی اختلال ایجاد شده و نیاز به تشکیل دوباره دارند که شیب کاهشی تا رسیدن به جریان کاملاً توسعه یافته حرارتی پس از عبور از فوم‌های فلزی در این شکل قابل مشاهده است.

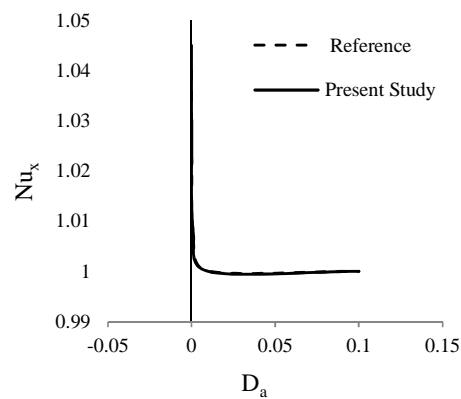
شکل ۴ بررسی میزان افزایش انتقال حرارت در مقابل افزایش افت فشار یا ضریب اصطکاک را با استفاده از عدد PEC نشان می‌دهد. زمانی که معیار ارزیابی عملکرد بزرگ‌تر از ۱ است به این معنی است که افزایش انتقال حرارت بر افزایش ضریب اصطکاک غلبه کرده است. مشاهده می‌شود که افزایش قطر منافذ سبب افزایش عدد PEC می‌شود. عدد PEC در ارتفاع‌های فوم‌های فلزی برابر با ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، و ۱ در قطر منافذ ۰/۵ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۱/۰۲۶، ۰/۹۸۰، ۰/۹۳۸، ۰/۹۱۴ و ۰/۹۱۵ و در قطر منافذ ۰/۱ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۱/۰۷۳، ۱/۰۵۶، ۱/۰۴۶، ۱/۰۳۶، و ۱/۰۲۸ است. در نتیجه بیشترین عدد PEC مربوط به حالتی است که قطر منافذ و ارتفاع مواد متخلخل به ترتیب برابر با ۰/۱ سانتی‌متر و ۰/۲ است که در این حالت عدد PEC به مقدار ۷/۳ درصد افزایش داشته است.

شکل ۵، کانتور سرعت جریان را درون کانال نشان می‌دهد. شکل ۵-الف مربوط به لوله بدون فوم فلزی و شکل ۵-ب تا ۵-د مربوط به لوله با وجود فوم فلزی است. دو شکل ۵-ب و ۵-پ دارای ارتفاع مواد متخلخل یکسانی هستند اما شکل ۵-ب دارای قطر منافذ ۰/۱ سانتی‌متر و شکل ۵-پ دارای قطر منافذ ۰/۰۵ سانتی‌متر است. با مقایسه این دو شکل مشخص است که کاهش قطر منافذ باعث کاهش سرعت سیال درون محیط متخلخل و افزایش سرعت سیال بالای محیط متخلخل شده، که به دلیل مسدود شدن بیشتر جریان است. این تحلیل برای مقایسه دو به دو مواد متخلخل با ارتفاع یکسان و قطر منافذ مختلف نیز صادق است. تفاوت سرعت درون محیط متخلخل و ناحیه بالای آن با قطر منافذ بیشتر در ارتفاع ۰/۴ مواد متخلخل در شکل‌های ۵-ت و ۵-ث بارزتر است و نشان از تأثیر بیشتر محیط متخلخل بر سرعت جریان دارد.

تغییرات عدد دارسی، در مبدل حرارتی دارای ماده متخلخل بررسی شد که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. بیشترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی حاضر و مقاله مورد بررسی، ۱ درصد است.

جدول ۱- استقلال حل از شبکه

تعداد گره	عدد میانگین ناسلت	درصد خطا (%)
۱۰×۳۰۰	۳/۴۸۸۴۶	۰/۸۲۴۶۰
۲۰×۶۰۰	۳/۴۶۱۲۶	۰/۷۷۹۷۱
۳۰×۹۰۰	۳/۴۴۶۰۹	۰/۴۳۸۲۸
۴۰×۱۲۰۰	۳/۴۴۱۱۵	۰/۱۴۳۳۵
۵۰×۱۵۰۰	۳/۴۳۸۱۳	۰/۰۸۷۷۶

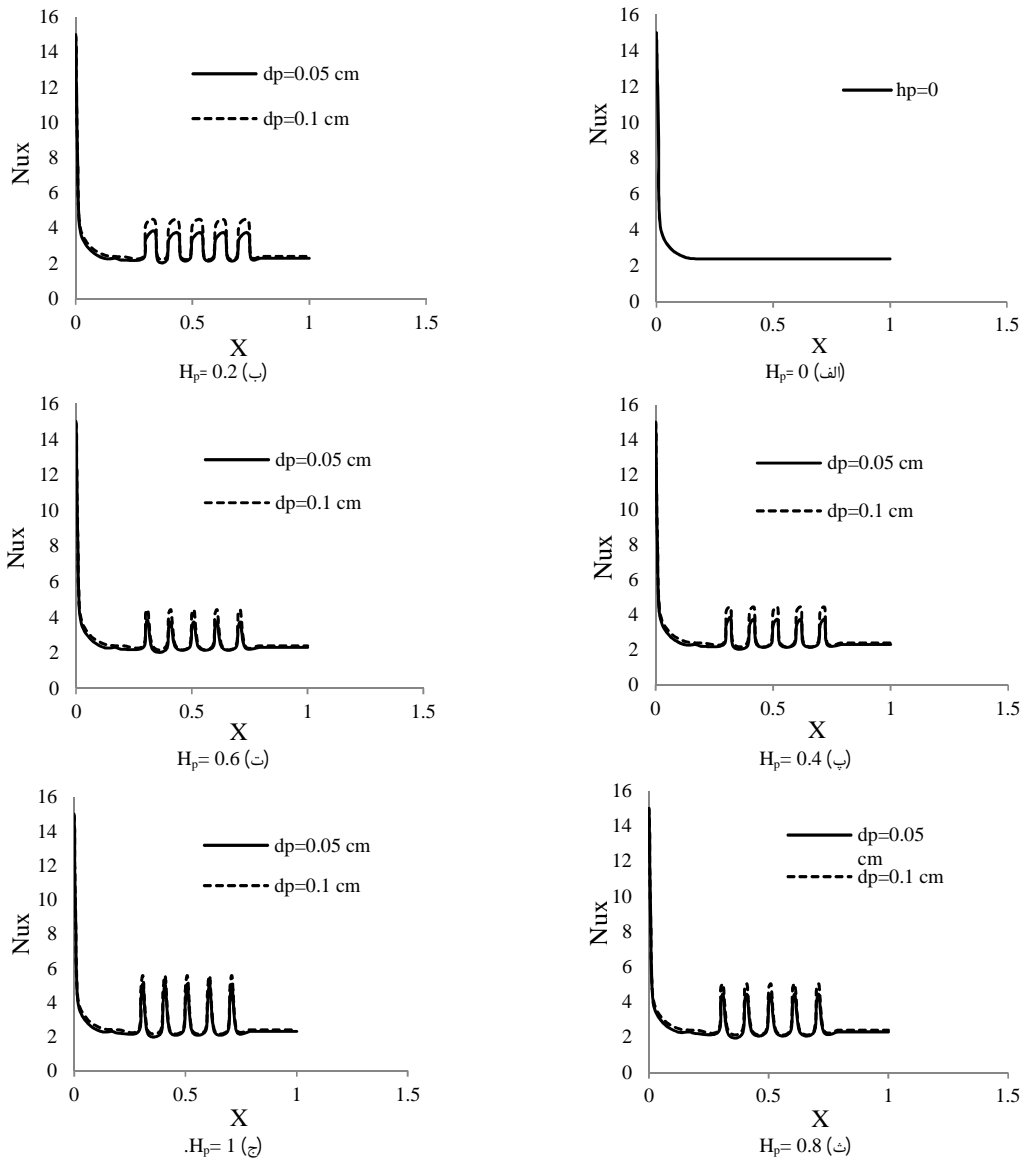


شکل ۲- مقایسه تغییرات عدد ناسلت میانگین در مقابل تغییرات عدد دارسی در پروژه حاضر و مقاله مرجع (Targui & Kahalerras, 2008)

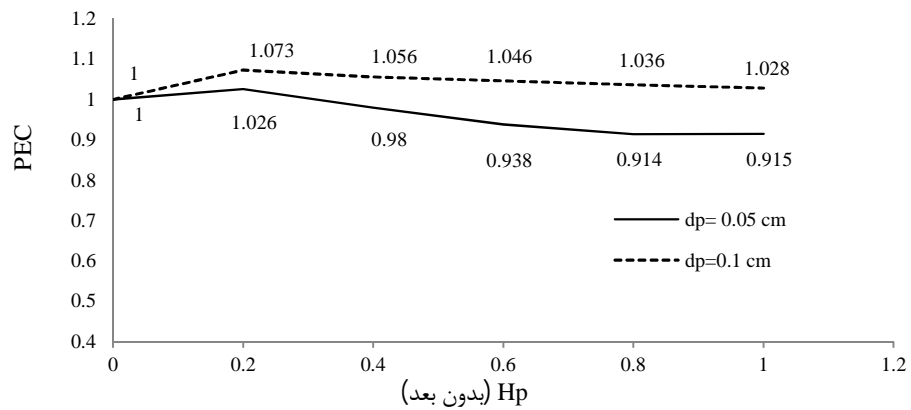
نتایج و بحث

در ابتدا تأثیر ارتفاع فوم‌های فلزی و همچنین قطر منافذ آن‌ها، بر روی عدد ناسلت موضعی در طول لوله مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۳). مشاهده شد که وجود مواد متخلخل موجب افزایش عدد ناسلت موضعی در طول کانال می‌شود. متناسب با طول ماده متخلخل، تأثیر این مواد بر روی عدد ناسلت موضعی متفاوت است. در واقع زمانی که سیال وارد ماده متخلخل می‌شود از سرعت آن کاسته شده و به دلیل وجود فاز جامد با ضریب هدایت حرارتی بالا نسبت به فاز مایع، انتقال حرارت هدایتی افزایش می‌یابد.

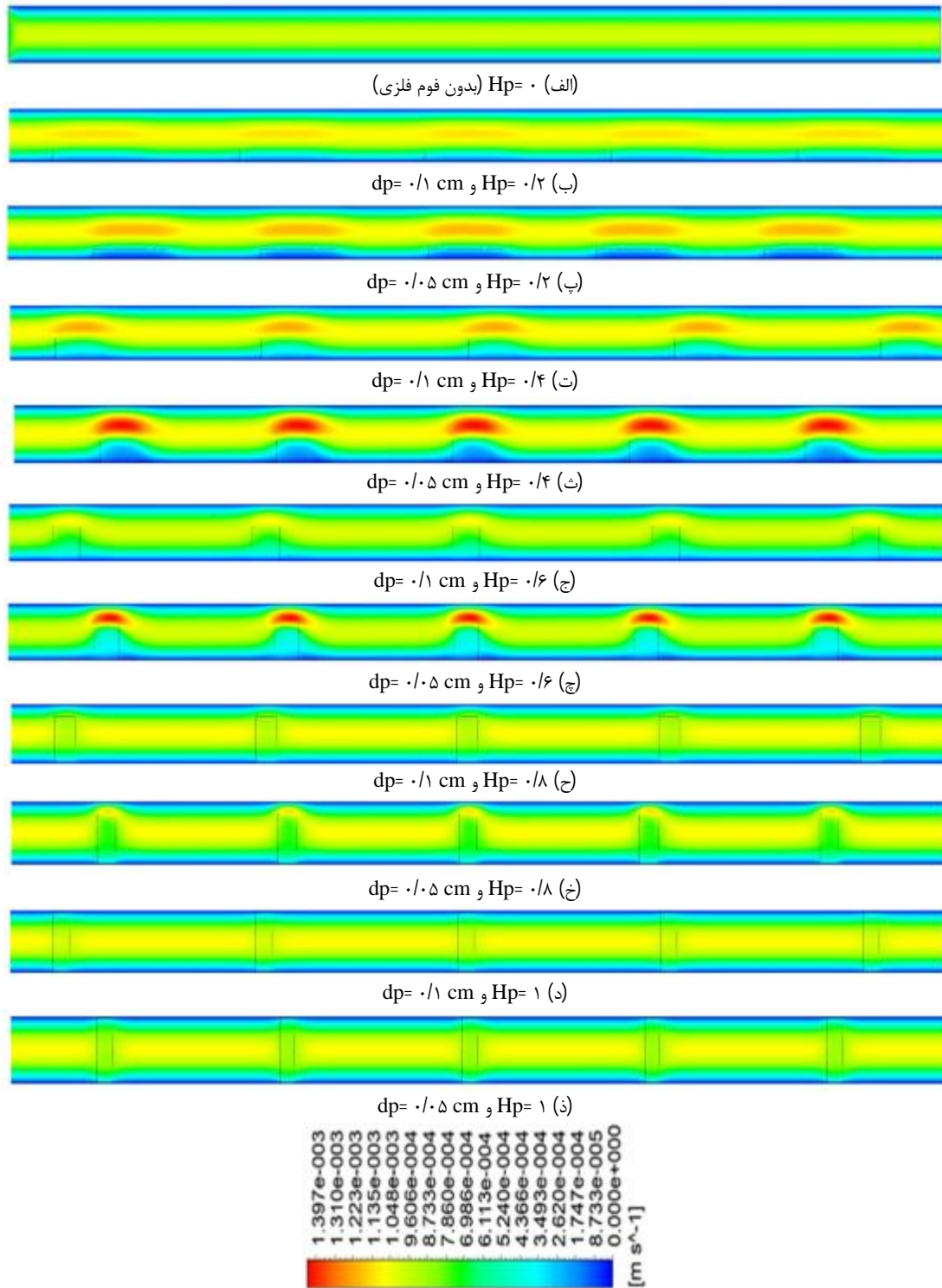
این شکل همچنین نشان می‌دهد که افزایش قطر منافذ در فوم فلزی موجب افزایش عدد ناسلت می‌گردد. این در حالی است که در ارتفاع بی‌بعد ماده متخلخل برابر با ۰/۸ و ۱، تأثیر قطر منافذ بر روی انتقال حرارت کمتر بوده



شکل ۳- اثر ارتفاع و قطر منافذ فوم فلزی بر عدد ناسلت موضعی در طول کانال



شکل ۴- تغییرات عدد PEC با ارتفاع در قطرهای مختلف منافذ مواد متخلخل



شکل ۵- کانتور سرعت جریان در ارتفاع و قطر منافذ فوم فلزی مختلف

به هسته فوم فلزی را بهتر کرده و منجر به افزایش انتقال حرارت ماده متخلخل با سیال می‌شود. با افزایش بیشتر ارتفاع ماده متخلخل از 0.4 به 0.6 در شکل‌های ۵- ج و ۵- چ مشاهده می‌شود که مساحت ناحیه پرسرعت کم

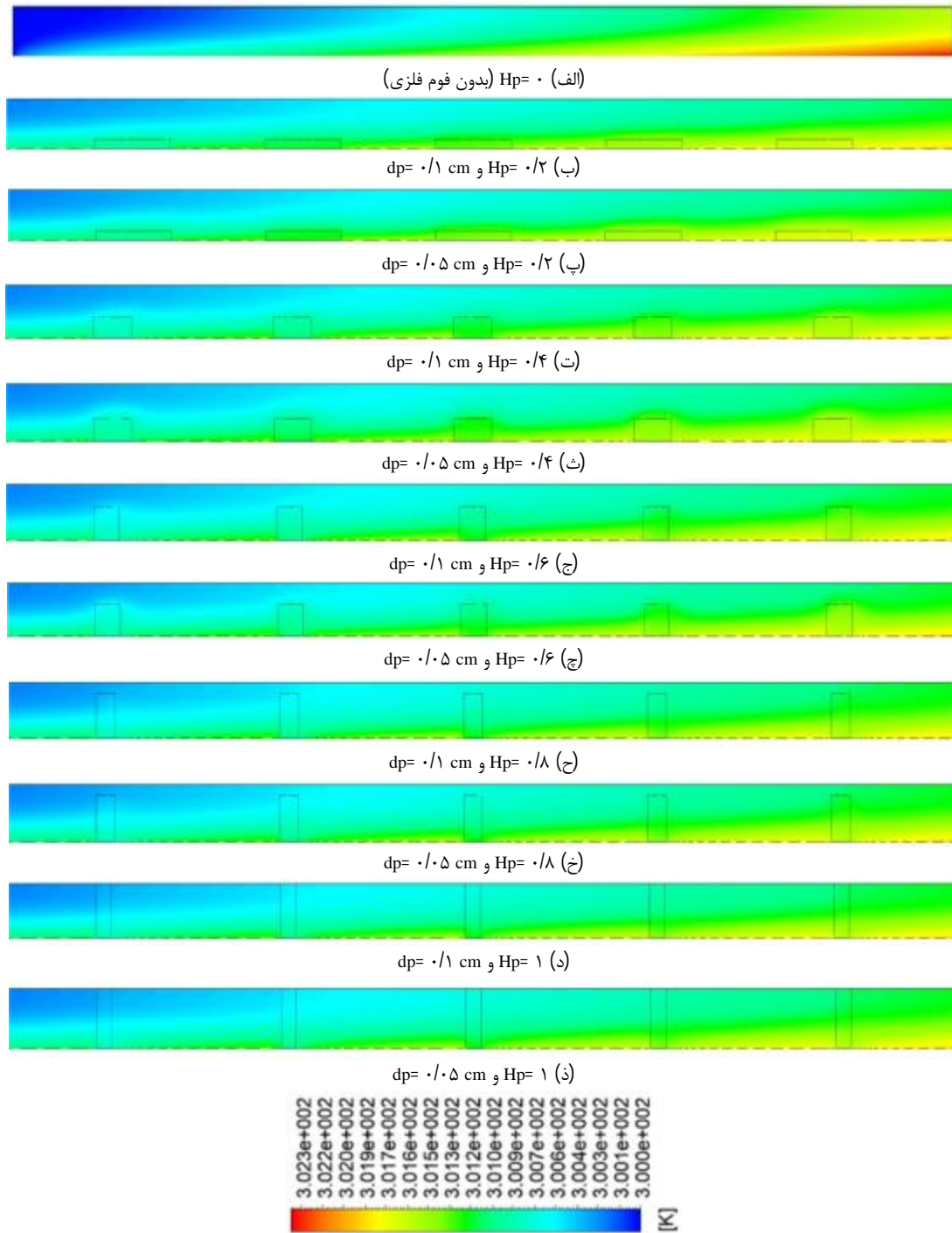
مقایسه دو شکل ۵- ت و ۵- ث نشان دهنده کاهش سرعت جریان در نزدیکی دیواره با افزایش ارتفاع فوم‌های فلزی است که امری مطلوب در افزایش انتقال حرارت نیست. اما افزایش ارتفاع فوم‌های فلزی، دسترسی جریان

می‌دهد. سرعت سیال با حمل انرژی و انتقال آن نقش مستقیمی بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی و هدایتی و در کل انتقال حرارت سینی حرارتی دارد. توزیع دما در کل کانال و افزایش لایه مرزی حرارتی در شکل ۶- الف نشان داده شده است. شکل‌های ۶- ب و ۶- پ توزیع دما را در حالی که ارتفاع مواد متخلخل برابر با $0/2$ است نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که درون مواد متخلخل با قطر منافذ بیشتر دمای کمتری وجود دارد و دلیل آن سرعت بیشتر در این نواحی در مقایسه با قطر منافذ کمتر است. تأثیر سرعت به گونه‌ای است که با افزایش سرعت در نزدیکی دیواره، یکنواختی توزیع دما و در نتیجه انتقال حرارت افزایش یافته است. همچنین دسترسی جریان به هسته مرکزی آن با بیشترین ظرفیت خنک‌کاری در قطر منافذ کمتر صورت گرفته است. برهم‌زدگی لایه مرزی حرارتی توسط مواد متخلخل در این شکل‌ها قابل مشاهده است. در شکل‌های ۶- ت و ۶- ث برهم‌زدگی لایه مرزی حرارتی توسط مواد متخلخل واضح‌تر است. در این شکل‌ها به دلیل افزایش سرعت در ناحیه بالای فوم‌های فلزی و کاهش آن درون محیط متخلخل، انتقال حرارت بهبود یافته است. جریان با طی کردن طول کانال اثر کمتری از مواد متخلخل می‌گیرد و اثر اولین ماده متخلخل بر روی توزیع دما بیشتر از فوم‌های فلزی بعدی است. دلیل این امر کاهش ظرفیت خنک‌کاری جریان با طی کردن طول کانال است.

با افزایش ارتفاع مواد متخلخل به $0/6$ در شکل‌های ۶- ج و ۶- چ تأثیر مواد متخلخل مشخص‌تر است. در اولین ماده متخلخل مشخص است که دمای هسته جریان در قطر منافذ کمتر مواد متخلخل توانسته است به درون فوم فلزی نفوذ کند. این در حالی است که در قطر منافذ بیشتر این نفوذ کاهش یافته است. در شکل‌های ۶- ح و ۶- خ ارتفاع مواد متخلخل $0/8$ است و همان طور که قابل مشاهده است، تأثیر قطر منافذ بر روی توزیع جریان کاهش یافته، تا جایی که در شکل‌های ۶- د و ۶- ذ با افزایش ارتفاع مواد متخلخل تا ارتفاع کانال، این اختلاف کمتر و یا حتی از بین رفته است. پدیده‌ای که در شکل ۶ وجود دارد، رشد لایه مرزی است که بین دو فوم فلزی اول و دوم کاملاً مشهود است.

شده است. این کم شدن سرعت در هر دو قطر منافذ قابل مشاهده است. به خصوص این تغییر در شکل ۵- ج بسیار مشهود است. در این حالت ارتفاع ماده متخلخل از نصف کانال بیشتر شده و در واقع حجم بیشتری از سیال مجبور به عبور از درون ماده متخلخل می‌شود که ظرفیت خنک‌کاری بیشتری دارد. نکته دیگری که در شکل‌های ۵- ب تا ۵- پ قابل مشاهده است، کاهش سرعت جریان پس از عبور از مواد متخلخل و به خصوص در قطر منافذ کمتر است. دلیل این امر به وجود آمدن گردابه‌های جریان و نواحی گردش جریان پس از عبور از محیط متخلخل است. در قطرهای منافذ کمتر به دلیل موانع بیشتر در مقابل جریان سیال، افت فشار درون ناحیه متخلخل بیشتر است و بنابراین گردابه‌های شدیدتری در جریان پس از عبور از فوم‌های فلزی به وجود می‌آید. با افزایش ارتفاع بی‌بعد مواد متخلخل به $0/8$ در شکل‌های ۵- ح و ۵- خ با قطر منافذ به ترتیب برابر با $0/1$ و $0/05$ سانتی‌متر، مشاهده می‌شود که جریان پر سرعت در مرکز کانال، توسط مواد متخلخل کنترل می‌شود. در این ارتفاع از ماده متخلخل نیز، قطر کمتر منافذ، اغتشاش بیشتری در جریان ایجاد می‌کند و کاهش سرعت بیشتری ناشی از افت فشار درون محیط متخلخل و پس از آن در نواحی گردابه‌ای ایجاد می‌شود. پدیده‌ای که در این جا بیشتر نمود پیدا کرده است برهم‌زدگی لایه مرزی هیدرودینامیکی بر روی دیواره بالایی است، اما از آنجایی که دیواره بالایی تحت شار حرارتی قرار ندارد، این امر افزایش انتقال حرارت را موجب نمی‌شود. در نهایت با افزایش ارتفاع ماده متخلخل تا کل ارتفاع کانال در شکل‌های ۵- د و ۵- ذ مشاهده می‌شود که با از بین رفتن ناحیه بالای مواد متخلخل، به طور کلی جریان سیال در این ناحیه از بین رفته است. در این حالت سیال از افزایش انتقال حرارت هدایتی بین دیوار داغ و هسته جریان با حداکثر توان خنک‌کاری به وسیله فوم فلزی بهره می‌برد.

شکل ۶ کانتورهای دمای جریان در حالت قرارگیری فوم‌های فلزی با ارتفاع‌ها و قطر منافذ مختلف را نشان



شکل ۶- کانتور دمای جریان در ارتفاع و قطر منافذ فوم فلزی مختلف

نتیجه‌گیری

خلاصه نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی نشان می‌دهد که:

۱- قرارگیری مواد متخلخل درون سینی حرارتی خشک‌کن، موجب افزایش عدد ناسلت موضعی و در نتیجه عدد ناسلت میانگین و انتقال حرارت گردید.

۲- افزایش قطر منافذ در فوم‌های فلزی موجب افزایش عدد ناسلت گردید. این درحالی است که در ارتفاع‌های ماده متخلخل برابر با 0.8 و 1 ، اثر قطر منافذ بر روی انتقال حرارت، کاهش داشته است.

۳- حداکثر انتقال حرارت در ارتفاع مواد متخلخل برابر با 0.8 رخ داده است.

- Yang, C., Nakayama, A., & Liu, W. (2012). Heat transfer performance assessment for forced convection in a tube partially filled with a porous medium. *International Journal of Thermal Sciences*, 54: 98-108.
- Zheng, Zh., Li, M., & He, Y. (2015). Optimization of porous insert configurations for heat transfer enhancement in tubes based on genetic algorithm and CFD. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 87: 376-379.
- ۴- بیشترین عدد PEC مربوط به حالتی است که قطر منافذ و ارتفاع مواد متخلخل به ترتیب برابر با $0/1$ سانتی‌متر و $0/2$ است که عدد PEC، $7/3$ درصد افزایش داشته است.
- منابع**
- Alazmi, B., & Vafai, K. (2000). Analysis of variants within the porous media transport models. *International Journal of Heat Transfer*, 122: 303-326.
- Azimi, M.R., & Delavar, M. (2014). Heat transfer enhancement by using heat exchangers. *International Journal of Thermal & Environmental Engineering*, 1: 51-54.
- Dukhan, N. (2006). Correlation for the pressure drop for flow through metal foam. *Experiments in Fluids*, 41: 665-672.
- Kim, S. Y., Paek, J. W., & Kang, B. H. (2000). Flow and heat transfer correlations for porous fin in a plate-fin heat exchanger. *International Journal of Heat Transfer*, 122: 572-578.
- Lu, W., Zhao, C. Y., & Tassou, S. A. (2006). Thermal analysis on metal foam filled heat exchangers Part I: Metal-foam filled pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 2751-2761.
- Mohamed, A., Teamah, M. A., El-Maghlany, W. M., & Dawood, M. M. K. (2011). Numerical simulation of laminar forced convection in horizontal pipe partially or completely filled with porous material. *International Journal of Thermal Sciences*, 50: 1512-1522.
- Nield, D. A., & Bejan, A. (2013). *Convection in porous media*. Chapter 1: Mechanics of Fluid Flow Through a Porous Medium. 4th edition. Wiley, J. and Sons Inc. New York. Springer. Pages: 1-29.
- Rong, F., Zhang, W., Shi, B., & Guo, Z. (2014). Numerical study of heat transfer enhancement in a pipe filled with porous media by axisymmetric TLB model based on GPU. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70: 1040-1049.
- Sheikholeslami, M., & Seyednezhad, M. (2018). Simulation of nanofluid flow and natural convection in a porous media under the influence of electric field using CVFEM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120: 772-781.
- Targui, N., & Kahalerras, H. (2008). Analysis of fluid flow and heat transfer in a double pipe heat exchanger with porous structures. *Energy Conversion and Management*, 49: 3217-3229.