



بررسی عددی تغییر چیدمان لوله‌ها در مبدل پوسته-لوله حاوی ماده تغییر فاز دهنده، با فرض محیط متخلخل

سارا بهاری - دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

حسین شکوهمند - استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد نیکیان - استادیار گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

E-mail: sarah_bahari@yahoo.com

چکیده: مواد تغییر فاز دهنده از جمله مواد جدیدی هستند که کاربرد آن‌ها در مبدل‌ها می‌تواند سبب بهبود کارایی سیستم شود. در این مقاله مبدل پوسته-لوله حاوی مواد تغییر فاز دهنده با فرض محیط متخلخل شبیه سازی شده است. ماده تغییر فاز دهنده در فضای بین پوسته و لوله قرار گرفته است. پدیده تغییر فاز جامد-مایع بوسیله تئوری آنتالپی تخلخل حل شده و تحلیل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته است. به دلیل تفاوت‌های عمده در مشخصه‌های ترموفیزیکی مبدل پوسته-لوله و ماده تغییر فاز دهنده از فرض عدم تعادل گرمایی محلی استفاده شده است. اعتبارسنجی با یک نمونه آزمایشگاهی فوم فلزی حاوی ماده تغییر فاز دهنده صورت گرفته است. اثر تغییر آرایش لوله‌ها در محیط متخلخل بر انتقال حرارت مبدل و ذوب ماده تغییر فاز دهنده بررسی شده‌اند. نتایج حاصل از حل عددی به دست آمده نشان می‌دهد که محیط متخلخل با ضریب تخلخل کمتر سبب کاهش لختی حرارتی در سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان می‌گردد. **واژه‌های کلیدی:** مبدل پوسته-لوله، محیط متخلخل، مواد تغییر فاز دهنده.

Numerical Investigation of Pipe Array in a Shell and Tube Heat Exchanger : PCM as a Porous Media flowing through Pipes

S. Bahari, MSc. Student, Dept. of Applied Design, the Faculty of Mech. Eng., IAU, Branch of Takestan

H. Shokohmand, Prof., Dept. of Mech. Eng., the Faculty of Eng., Tehran University

M. Nikian, Ass. Prof., Dept. of Energy Conversion, the Faculty of Mech. Eng., IAU, Branch of Takestan

Abstract: The stress distribution on the tip of the cracks and the stress intensity factor on them are the main course in the fracture mechanic. The stress intensity factor of the cracks with the different load exited and the different geometry are listed in the tables of the standard books. In all of them, the cracks are located in the cenrall point of the plates. In the uniform edge loaded case, the crack position is not effect on the stress intensity factor of the crack but in the case that the load is concentrated the stress distribution different from point to another point and therefore the stress intensity factor of the crack, is changed with the crack displacement from the point of the exited load. In this paper, the stress intensity factor changes with the distance of it from the edge of the semi infinite plate with the edge crack is investigated. A new relation is introduced from the simulation solution with the Abaqus. Then, similar relation from analytical solution from the theory of the linear fracture mechanic was proposed. This relation was determined from the stress distribution calculation in the plate with the pointed load with the analytical solution from the elasticity thory. This two relations were compared with another and finally the more accurated relation was introduced as the relation of the stress intensity factor with the distance from the edge of the plate.

Keywords: Torsion test, Work hardening, Nadai procedure, Ludwig formula, and Materials constants.

۱- مقدمه

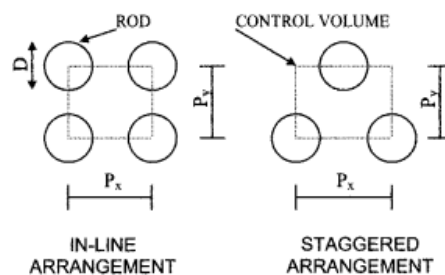
بسیاری از محققین به منظور طراحی و گسترش سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به صورت نهان مطالعات متعددی را در زمینه نحوه ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان و کاربردهای آن انجام داده‌اند. زابلا و همکارانش [۱] بررسی مفصلی روی تحقیقات انجام شده در زمینه ذخیره انرژی حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده، رفتار انتقال حرارتی و کاربردهای این سیستم‌ها ارائه کردند. پسو یادی و همکارانش [۲] مروری گسترده در زمینه کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌ها در راستای مدیریت انرژی در واحدهای تجاری و ساختمانی انجام دادند. مصفا و همکارانش [۳] یک حل تقریبی تحلیلی از فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده در پوسته و لوله با پره های شعاعی را بررسی کردند و نتایج نشان داد که ماده تغییر فاز دهنده در لوله استوانه‌ای بسیار سریع‌تر از مخزن مستطیلی منجمد می‌شود. لاکرویکس [۴] به‌طور تحلیلی رفتار گذرای واحد ذخیره‌سازی گرمای نهان را بررسی کرد و نشان داده شده که پارامترهای هندسی و حرارتی اثر قابل توجهی در بهبود عملکرد حرارتی دارند. گریگس و همکارانش [۵] نتایج بررسی انتقال گرمای هدایتی در پروسه ذوب داخل مخزن مستطیلی پر شده از ماده تغییر فاز دهنده را گزارش کردند. روسلر و براگمن [۶] فرآیند ذوب پارافین در سیستم ذخیره‌سازی انرژی نوع پوسته و لوله را به‌طور عددی و تحلیلی بررسی کردند. لیو و همکاران [۷] افزایش انتقال حرارت با استفاده از فوم فلزی در واحد ذخیره سازی گرمای نهان از نوع پوسته و لوله را بررسی کردند و مشاهده شد که در این حالت انتقال حرارت افزایش یافته است. رایج‌ترین روش در طراحی ذخیره سازهای حرارتی نهان در مسائل گرمایشی استفاده از مبدل‌های حرارتی است. از آن جایی که حل چنین مسائلی با روش های رایج کار دشواری است فرض محیط متخلخل برای شبیه سازی فرآیند می‌تواند مؤثر باشد. در این مقاله، شبیه سازی عددی مبدل پوسته و لوله حاوی ماده تغییر فاز دهنده با استفاده از فرض محیط متخلخل صورت گرفته‌است و اثر تغییر چیدمان لوله که منجر به تغییر تخلخل می‌شود بررسی شده‌است.

۲- معادلات حاکم و مدل عددی

بر اساس تکنیک کلوزر (Closure low) [۸] و طبق چیدمان هندسی لوله‌های موردنظر می‌توان لوله‌ها را با یک محیط متخلخل شبیه‌سازی نمود. در ناحیه لوله، سیال انتقال حرارت قرار دارد که به دلیل شبیه‌سازی لوله‌ها با تخلخل، توان حرارتی ناشی از سیال جاری در لوله‌ها به صورت منبع حرارتی در محیط متخلخل وارد محاسبات می‌گردد. برای چیدمان معینی از لوله‌ها مطابق شکل (۱) می‌توان ضریب تخلخل را بر مبنای روابط زیر به دست آورد که در آن α_3 درصد حجمی و ε ضریب تخلخل است:

$$\alpha_3 = \frac{\pi D^2}{4 P_x P_y} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1 - \alpha_3 \quad (2)$$



شکل ۱: مشخصات هندسی برای چیدمان لوله‌ها با قطر و گام معین [۸].

در این مدل تئوری آنتالپی متخلخل برای پیش بینی فرآیند تغییر فاز بکار گرفته شده است در این حالت متخلخل با کسر حجمی بیان می‌شود. معادله پیوستگی طبق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

که در آن t زمان و u و v به ترتیب سرعت های بی بعد در راستای x و y اند. معادلات مومنتوم به صورت زیر می‌باشند:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_y \quad (5)$$

یک ترم چشمه حرارتی (S_n) در معادلات مومنتوم وارد شده است که به صورت زیر می‌باشد:

$$S_x = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \omega)} A_m u + \frac{\mu}{a} u + \frac{1}{2} C_i \rho u |u| \quad (6)$$

$$S_y = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \omega)} A_m v + \frac{\mu}{a} v + \frac{1}{2} C_i \rho v |v| - \rho g \gamma (T - T_0) \quad (7)$$

جمله اول مربوط به وارد کردن اثرات ذوب و انجماد در محاسبات است که پایه آن تئوری آنتالپی متخلخل می‌باشد، جمله دوم و سوم به ترتیب اثرات افت فشار اصطکاکی و شکلی در محیط متخلخل را مدل می‌نمایند. در معادله بقای اندازه حرکت مربوط در راستای قائم یک جمله چهارم وجود دارد که اثرات شناوری بر مبنای تئوری بوزینسک را شبیه‌سازی می‌نماید. در روابط (۶) و (۷) β کسر حجمی سیال، ω عددی کوچک، A_{mush} ثابت ناحیه موشی است.

معادلات انرژی برای سیال و ماده متخلخل با شرط عدم تعادل گرمایی در نظر گرفته شده است که به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\varepsilon(\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \varepsilon(\rho c)_f \left(u \frac{\partial T_f}{\partial x} + v \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = \quad (8)$$

$$\left(k_{fe} + k_{td} \right) \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) + h_{sf} A_{sf} (T_f - T_s) - \varepsilon \rho_p L \frac{\partial \beta}{\partial t} \\ (1 - \varepsilon)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_{se} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) + h_{sf} A_{sf} (T_s - T_f) \quad (9)$$

که در آن ρ_f و ρ_s چگالی ماده متخلخل و ماده تغییر فاز دهنده، c_f و c_s حرارت مخصوص ماده متخلخل و ماده تغییر فاز دهنده می‌باشند. A_{sf} ضریب چگالی مؤثر سطح تماس سیال و جامد و h_{sf} ضریب جابجایی مؤثر بین سیال و جامد است. برای این پارامترها

مقادیر مختلفی ارائه شده است آن چه برای مدل ما مناسب است به صورت :

$$A_{sf} = \frac{3\pi d_f (1 - e^{-\frac{1-e}{0.04}})}{(0.59d_p)^2} \quad (10)$$

$$h_{sf} = \frac{k_f}{d_f} \left(0.36 + \frac{0.518 Ra_d^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.599}{pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} \right) Ra_d = g\beta\Delta d_f^3 / (\alpha_f v_f) \quad (11)$$

دو پارامتر مؤثر در محیط متخلخل ضریب نفوذپذیری و فاکتور مقاومت اینرسی هستند که در جریان آرام طبق روابط زیر به دست می‌آیند [۹]:

$$a = 0.00073(1 - \varepsilon)^{-0.224} d_f^{-1.11} d_p^{0.89} \quad (12)$$

$$C_i = 0.00212(1 - \varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.63} \quad (13)$$

ضریب هدایت سیال و جامد بر مبنای ساختار تراکاهیدهدرال در نظر گرفته شده است که می‌توان ضرائب را از روابط زیر محاسبه نمود:

$$k_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2(M_A + M_B + M_C + M_D)} \quad (14)$$

$$M_A = \frac{4\sigma}{(2e^2 + \pi\sigma(1-e)k_m + (4-2e^2 - \pi\sigma(1-e))k_p)} \quad (15)$$

$$M_B = \frac{(e-2\sigma)^2}{(e-2\sigma)e^2k_m + (2e-4\sigma - (e-2\sigma)e^2)k_p} \quad (16)$$

$$M_C = \frac{(\sqrt{2}-2e)^2}{2\pi\sigma^2(1-2e\sqrt{2})k_m + 2(\sqrt{2}-2e - \pi\sigma^2(1-2e\sqrt{2}))k_p} \quad (17)$$

$$M_D = \frac{2e}{e^2k_m + (4-e^2)k_p} \quad (18)$$

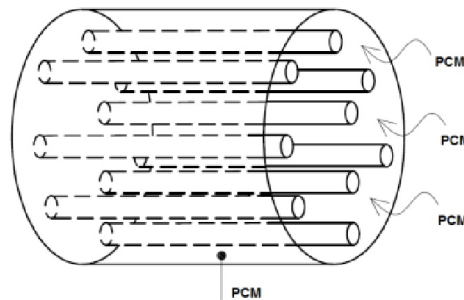
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sqrt{2}(2 - \frac{5}{8e^3\sqrt{2}} - 2\varepsilon)}{\pi(3-4e\sqrt{2}-e)}} \quad (19)$$

$$e = 0.339 \quad (20)$$

۳- بحث و نتایج

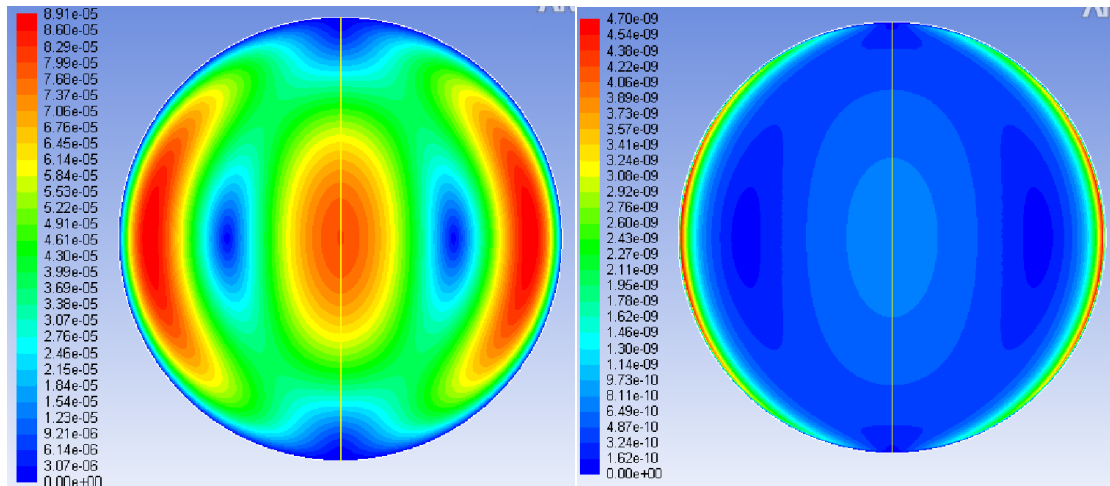
مدل مورد بررسی مطابق شکل (۲) یک مبدل پوسته-لوله از جنس آلومینیوم، حاوی ماده تغییر فاز دهنده RT58 است. استقلال حل از شبکه در حالت دو بعدی برای ۹۵۱۶، ۱۰۱۰۷، ۱۲۲۷۲ و ۱۹۱۴۴ المان بررسی شده و در نهایت ۱۲۲۷۲ المان جهت شبکه بندی در نظر گرفته شده است. در طول تحلیل شرط شار حرارتی ثابت و به صورت یک درصد تلفات حرارتی در نظر گرفته شده است. همچنین در

داخل محیط منبع حرارتی با نرخ ثابت $(\frac{kw}{m^3})$ ۴۰۰ وجود دارد. مرزها در دمای محیط قرار دارند (۲۹۳ کلوین). در ابتدای تحلیل هیچ کسری از سیال نداریم و با ذوب سیال این کسر افزایش خواهد یافت، حل مسئله به صورت گذرا و با استفاده از نرم افزار انسیس- فلوئنت نسخه ۱۴ انجام شده است. بررسی برای سه حالت با چیدمان های مختلف صورت می گیرد. حالت اول: $p_x = 20$ (cm) و $p_y = 20$ (cm) که $dp = 15$ (cm) و $p_y = 25$ (cm) و $p_x = 25$ (cm) : حالت دوم: $\varepsilon = 0.55821$ که تخلخل آن $dp = 15$ (cm) و $p_y = 25$ (cm) و $p_x = 25$ (cm) : حالت سوم با $\varepsilon = 0.71726$ و $dp = 15$ (cm) و $p_y = 35$ (cm) و $p_x = 35$ (cm) که تخلخل آن $\varepsilon = 0.85574$ خواهد بود.



شکل ۲: شماتیک مدل مورد بررسی.

در شکل های (۳) و (۴) کانتور سرعت برای زمان های ۷۵ ثانیه و ۲۰۰ ثانیه نشان داده شده اند. در این تصاویر می توان الگوی جریان- های سیال مذاب ناشی از شناوری را مشاهده نمود. در تمام گام های زمانی، جریان سیال در مرکز دایره دارای بیشترین توزیع سرعت به سمت بالا و در مجاورت جدار سمت چپ و راست دارای بیشترین سرعت به سمت پایین می باشد. سرعت در بالاترین نقطه از مقطع دایره در مجاورت جدار و هم چنین پایین ترین نقطه در مجاورت جدار دارای کمترین مقدار می باشد. به طوری که می توان سرعت را در این نقاط با تقریب خوبی صفر در نظر گرفت. دو ناحیه گردابی کوچک در بالاترین و پایین ترین نقطه در مجاورت جدار پدیدار می گردد. هم چنین دو ناحیه گردابی بزرگ تر در داخل دایره در سمت چپ و راست مشاهده می شود که بین جریان های سیال بالارو در مرکز و پایین رو در مجاورت جدار محصور گردیده اند. شکل (۵) کسر حجمی سیال مذاب را برای گام های زمانی مختلف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود به مرور زمان بخش بیشتری از مخلوط مذاب به فاز مایع تبدیل خواهد شد. اختلاف جزئی بین مقادیر بیشینه و کمینه در گام های زمانی مساوی نشان می دهد که تقریباً وضعیت ذوب در تمام ناحیه به صورت یکنواخت برای متخلخل مفروض پیش می رود. در شکل (۶) می توان کانتورهای توزیع دما را مشاهده نمود. با توجه به استفاده از تئوری عدم تعادل، دو شبکه یکی مربوط به سیال ذوب شده و دیگری مربوط به جامد متخلخل وجود دارد که این دو شبکه هم دما نیستند. خطوط دما برای تمام موارد به صورت دوایر متحدالمرکز است. که البته در پایان زمان ۲۰۰ ثانیه و ذوب کامل نسبت به مرکز مقطع دایره، کمی به سمت بالا خروج از مرکز خواهند داشت. این مسئله می تواند به دلیل تأثیر نیروهای شناوری و جابجا شدن نقطه داغ بر اثر اندرکنش همزمان جابجایی آزاد و هدایت حرارتی در فضای متخلخل و مخلوط مذاب باشد. برای اختصار نیمه سمت راست تصویر توزیع دما در هر گام زمانی در فلز متخلخل و نیمه سمت چپ توزیع دما در مخلوط مذاب را نشان می دهد.



شکل ۳: توزیع سرعت برای گام زمانی ۷۵ ثانیه.

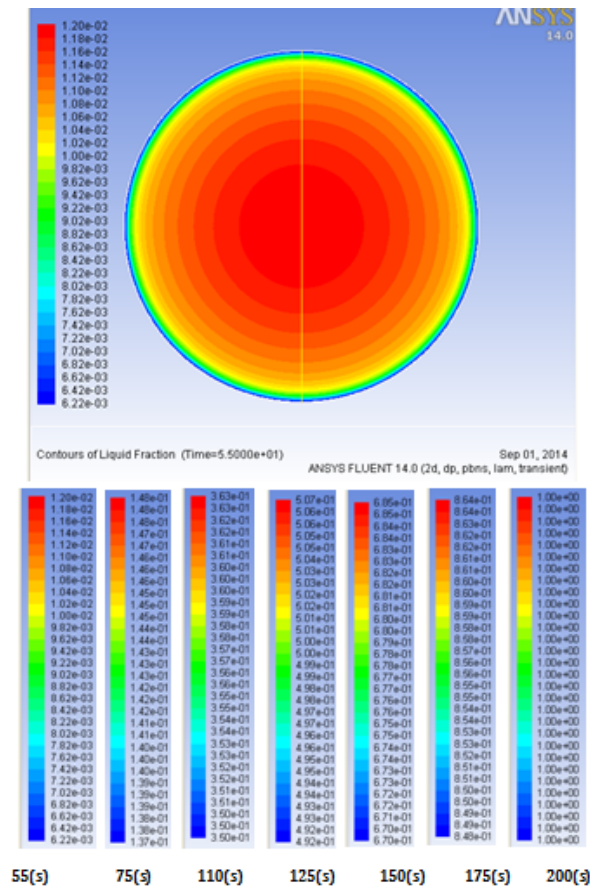
شکل ۴: توزیع سرعت برای گام زمانی ۲۰۰ ثانیه.

برای دو حالت دیگر تخلخل نیز کانتورها از حالت کلی تبعیت می‌کنند. در زمان‌های مساوی بیشینه سرعت برای تخلخل بیشتر، بزرگ‌تر است. برای تخلخل بیشتر زمان ذوب کامل بیشتر بوده و سرعت در پایان ذوب $2/5$ برابر سرعت در تخلخل پایین است. این‌گونه به نظر می‌رسد که در تخلخل بزرگ‌تر فضای بیشتری مختص به مخلوط مذاب است و حرکت سیال با مقاومت کمتری مواجه خواهد شد. بر این اساس توزیع سرعت از نظر عددی بزرگ‌تر خواهد شد. همچنین در تخلخل بالاتر اختلاف بیشینه و کمینه کسر مایع در مخلوط مذاب کمتر از وضعیت موجود در حالت تخلخل پایین تر است.

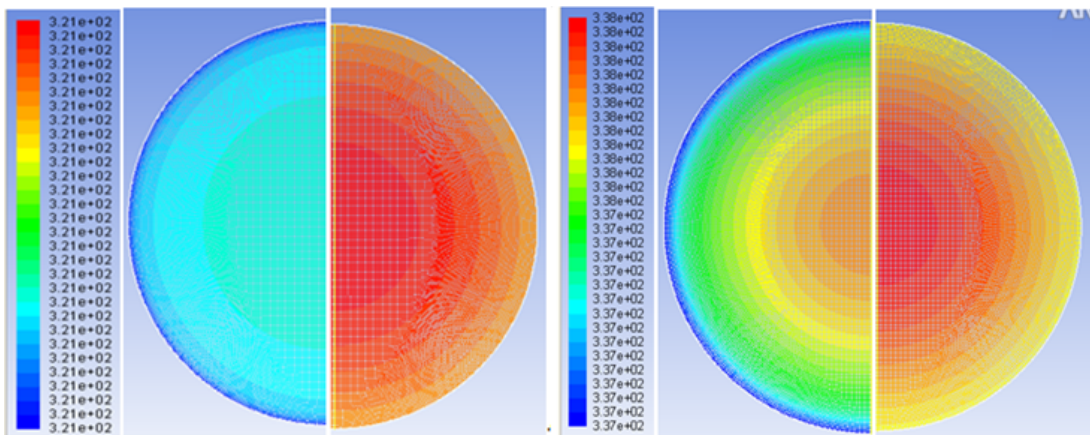
مقایسه کمیت‌های محاسبه شده برای سه تخلخل مختلف ذکر شده، در دو زمان مختلف به عنوان نمونه در زمان ۷۵ ثانیه که به نقطه شروع تحلیل نزدیک است و همچنین زمان ۱۷۵ ثانیه که به پایان تحلیل و اتمام ذوب نزدیک می‌باشد، صورت گرفته است. شکل‌های (۷) و (۸) تغییرات دما در راستای شعاع قائم را در زمان‌های ۷۵ و ۱۷۵ ثانیه نشان می‌دهند. در هریک از تصاویر دو دسته نمودار مشاهده می‌شود که یک دسته دمای مخلوط مذاب و دسته دیگر دمای محیط متخلخل جامد است. در زمان اولیه ذوب نمودار توزیع دما وابستگی ضعیفی به تخلخل نشان می‌دهد ولی با گذشت زمان اثرات لختی ناشی از تخلخل هرچه بیشتر هویدا شده و تخلخل بیشتر به معنای تبدیلی بیشتر و کند بودن فرآیند بلوغ ترموفیزیکی و ترمودینامیکی ذوب سیال در محفظه می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

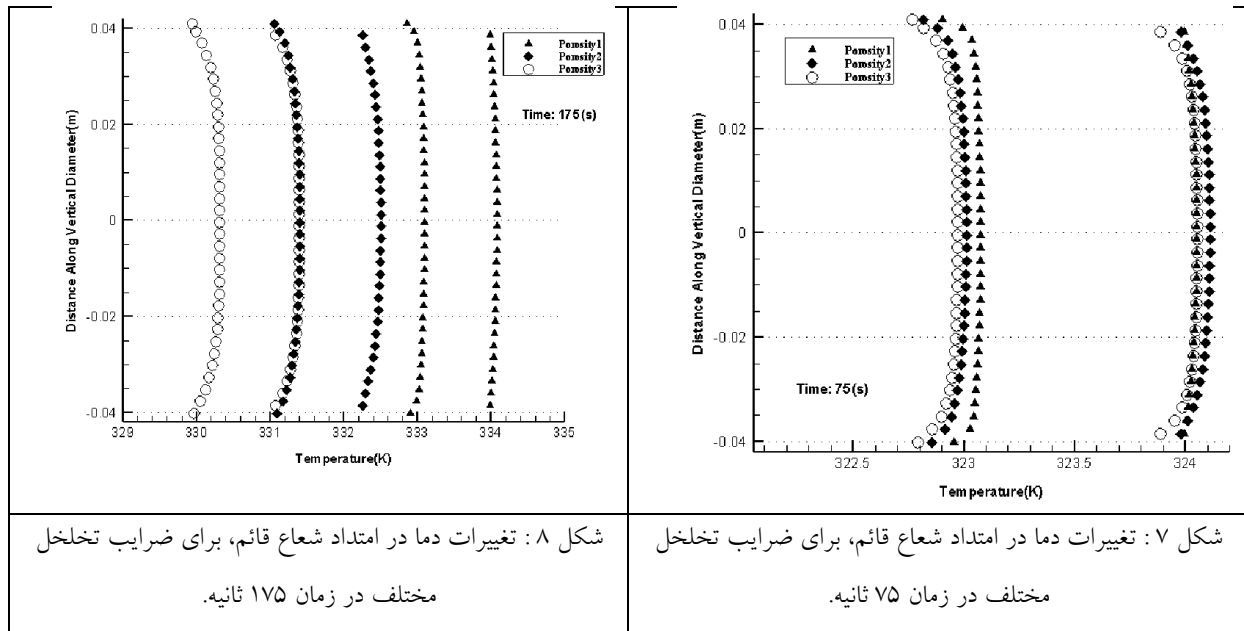
در این مقاله اثر تغییر تخلخل بر انتقال حرارت مبدل بررسی شد، نتایج نشان دادند که افزایش تخلخل که به معنی کاهش تعداد لوله‌ها در مبدل و افزایش فاصله آن‌ها از یکدیگر می‌باشد سبب افزایش لختی ترمودینامیکی می‌شود. هرچه فاصله لوله‌ها بیشتر شود، یعنی تخلخل بیشتری داشته باشیم، دمای بیشتری برای ذوب ماده تغییر فاز دهنده لازم است اما از طرفی فضای بیشتری مختص مخلوط مذاب است و حرکت سیال با مقاومت کمتری همراه است در نتیجه توزیع سرعت بهتر است. در تخلخل بالا کسر حجمی سیال ذوب شده کمتر می‌شود. به‌طورکلی می‌توان بیان کرد با توجه به کاربرد و نوع نیاز، هریک از این حالات می‌تواند اثرات قابل توجهی بر کارایی سیستم‌های ذخیره انرژی نهان داشته باشد. فرضاً در صورت نیاز به اینرسی لختی کمتر می‌توان از چیدمان مبدل، در حالتی که تخلخل کمتر است بهره جست.



شکل ۵: کسر حجمی سیال مذاب در زمان‌های مختلف.



شکل ۶: توزیع دما برای سیال مذاب و جامد متخلخل در زمان‌های ۷۵ و ۲۰۰ ثانیه.



۵- مراجع

- [1] B.Zablla, J.Marin, L.F. Cabeza, H.Mehling, 2003, "Review on Thermal energy Storage with Phase Change Material", heat transfer and analysis and applications, Appl.Therm.Eng.23.
- [2] A.Pasupathy, et al, 2007, "Investtigation and Numerical Simulation Analysis on the Thermal Performance of a building Roof in Corporating Phase Change Material (PCM) for Thermal Management", no.28, pp.556-565.
- [3] Mosaffaa, A.H., Talati , F., Basirat Tabrizi, Rosen, M.A., 2012, "Analytical Modeling of PCM Solidification in a Shell and Tube Finned Thermal Storage for Air Conditioning Systems", Energy and Buildings, 49, 356–361.
- [4] Lacroix,M., 1993, " Numerical Simulation of a Shell-and-Tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit", Sol Energy, 50,357–67.
- [5] Grriggs, E.I., Pitts DR, Hunphries, W.R., 1974, "Transient Analysis of a Thermal Storage Unit involving a Phase Change Material", ASME, Winter Annual Meating, Paper 74-WA/HT-21.
- [6] Rosler, F., Bruggemann, D., 2011, "Shell-and-Tube Type Latent Heat Thermal Energy Storage: Numerical Analysis and Comparison with Experiments", Heat Mass Transfer, 47,1027–33.
- [7] Liu, Zhenyu., Yao, Yuanpeng., Wu, Huiying ., 2013, "Numerical Modeling for Solid–Liquid Phase Change Phenomena in Porous media: Shell-and-Tube Type Latent Heat Thermal Energy Storage", Applied Energy.
- [8] Zoran V., Stosic, Vladimir D., Stevanovic, 2002, "Advanced Three-Dimensional Two-Fluid Porous Media Method for Transient Two-Phase Flow Thermal-Hydraulics in Complex Geometries", Numerical Heat Transfer, Part B, 41, 263±289.
- [9] Voller VR., Prakash C., 1987, "A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems", Int J Heat Mass Transfer, 30, 1709–19.
- [10] Georgiadis JG., Catton I., 1988, "Dispersion in Cellular Thermal Convection in Porous Layers", Int J Heat Mass Transfer, 31, 1081–91.