



## بررسی عددی آرایش لوله‌ها در یک مبدل پوسته و لوله حاوی ماده PCM بر طبق محیط متخلخل

سارا بهاری - دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

حسین شکوهمند - استاد دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد نیکیان - استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

E-mail: [sara\\_bahari@yahoo.com](mailto:sara_bahari@yahoo.com)

چکیده: زندگی روزمره بشر وابسته به تولید و مصرف انرژی است، با کاهش سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر توجه محققین به استفاده از انرژی‌های جدید جلب شده است. مواد تغییر فازدهنده از جمله این منابع جدید انرژی هستند که کاربرد آن‌ها در مبدل‌ها می‌تواند سبب بهبود کارایی سیستم شود. در این مقاله مبدل پوسته و لوله حاوی مواد تغییر فازدهنده (PCM) با فرض محیط متخلخل شبیه‌سازی شده است. ماده تغییر فازدهنده در فضای بین پوسته و لوله قرار گرفته است. پدیده تغییر فاز جامد به 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 و لوله و ماده تغییر فازدهنده از فرض عدم تعادل گرمایی موضعی استفاده شده است. اعتبارسنجی با یک نمونه آزمایشگاهی فوم فلزی حاوی ماده تغییر فازدهنده صورت گرفته است. اثر تغییر آرایش لوله‌ها در محیط متخلخل بر انتقال حرارت مبدل و ذوب ماده تغییر فازدهنده بررسی شده‌اند. نتایج حاصل از حل عددی 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 Filled with PCM as a Porous Media

S. Bahari, M.S. student in, Dept. of Mech. Eng., Takestan Branch, Islamic Azad University

H. Shkohmand, Prof., Dept. of Mech. Eng., Tehran University

M. Nikyan, Ass. Prof., Dept. of Mech. Eng., Takestan Branch, Islamic Azad University

**Abstract:** Human live depends on the production and consumption of energy. With reduction of fossile resources, scientists in the last decades are interested for utilizing of renewables such as phase change materials (PCM). Utilizing these materials in heat exchangers cause the improvement of system performance. In the present study, a shell and tube heat exchanger filled with PCM by assumption of prous media has been simulated. PCMs' are inserted in the region between tubes and shell and solid to liquid phase change phenomena has been solved by the theory of prous enthalpy. It is assumed there is a local thermal unequilibrium due a considerable difference between thermophysical prporties of the heat exchanger and PCM. The validation of the proposed model has been done by the results obtained from a metal fume which filled with PCM. The effect of tube arrays in porous media in heat transfer rate and and melting of PCM. The obtained results from numerical solution show that a prous media with a little viodage reduce the thermal capacity of the latent heat storage systems.

**Keywords:** Incident solar irradiance, extraterresial irradiance, Zandjan climate.

۱- مقدمه

بسیاری از محققین به منظور طراحی و توسعه کاربردهای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی را به صورت گرمای نهان مطالعات متعددی را انجام داده‌اند. زابلا (Zablla) و همکاران بررسی مفصلی در زمینه ذخیره انرژی حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده، رفتار انتقال حرارتی و کاربردهای این سیستم‌ها ارائه کردند [۱]. پسوپادی (Pasupathy) و همکاران مروری گسترده در زمینه کاربرد مواد تغییر فازدهنده در ساختمان‌ها در راستای مدیریت انرژی در واحدهای تجاری و ساختمانی انجام دادند [۲]. مصفا و همکاران 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 فازدهنده در لوله استوانه‌ای بسیار سریع‌تر از مخزن مستطیلی منجمد می‌شود [۳]. لاکرویکس (Lacroix) به‌طور تحلیلی رفتار گذرای واحد ذخیره‌سازی گرمای نهان را بررسی کرد و نشان داد که پارامترهای هندسی و حرارتی اثر قابل توجهی در بهبود عملکرد حرارتی دارند [۴]. گریگس (Grriggs) و همکاران نتایج بررسی انتقال گرمای هدایتی در فرآیند ذوب داخل مخزن مستطیلی پر شده از ماده تغییر فازدهنده را گزارش کردند [۵]. روسلر و براگمن (Rosler and Bruggemann) فرآیند ذوب پارافین در سیستم ذخیره‌سازی انرژی نوع پوسته و لوله را به‌طور عددی و تحلیلی بررسی کردند [۶]. لیو (Liu) و همکاران افزایش انتقال حرارت با استفاده از فوم فلزی در واحد ذخیره‌سازی گرمای نهان از نوع پوسته و لوله را بررسی کردند و مشاهده کردند که در این حالت انتقال حرارت افزایش یافته است [۷]. یکی از روش‌های رایج در طراحی ذخیره‌سازهای حرارتی نهان در مسائل گرمایشی استفاده از مبدل‌های حرارتی است. نظر باینکه حل چنین مسائلی با مشکلاتی است، فرض محیط متخلخل برای شبیه‌سازی فرآیند می‌تواند مؤثر باشد. در این مقاله، شبیه‌سازی عددی مبدل پوسته و لوله حاوی ماده تغییر فازدهنده با استفاده از فرض محیط

متخلخل صورت گرفته‌است و اثر تغییر آرایش لوله که منجر به تغییر تخلخل می‌شود بررسی شده‌است.

۲- معادلات حاکم و مدل عددی

براساس قانون کلوژر (Closure law) [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 به‌دلیل شبیه‌سازی لوله‌ها با تخلخل، توان حرارتی ناشی از سیال جاری در لوله‌ها به‌صورت منبع حرارتی در محیط متخلخل وارد محاسبات می‌گردد. برای چیدمانی از لوله‌ها مطابق شکل (۱) می‌توان ضریب تخلخل را بر مبنای روابط زیر به دست آورد که در آن  $\alpha_3$  درصد حجمی و  $\varepsilon$  ضریب تخلخل است:

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

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

در این مدل تئوری آنتالپی تخلخل برای پیش بینی فرآیند تغییر فاز بکار گرفته شده‌است در این حالت تخلخل 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 سرعت‌های بی‌بعد در راستای  $x$  و  $y$  اند. معادلات مقدار حرکت به صورت زیر می‌باشند:

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

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

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

$$h_{sf} = \frac{k_f}{d_f} \left[ 0.36 + \frac{0.518 Ra_d^{0.25}}{\left[1 + \left(\frac{0.599}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} \right] Ra_d \quad (11)$$

$$= \frac{g\beta\Delta d_f^3}{\alpha_f \nu_f}$$

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

$$a = 7.3 \times 10^{-4} (1 - \varepsilon)^{-0.224} d_f^{-1.11} d_p^{0.80} \quad (12)$$

$$C_i = 2.12 \times 10^{-3} (1 - \varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.63} \quad (13)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

عبارت منبع حرارتی ( $S_n$ ) در معادلات مقدار حرکت وارد شده است که به صورت زیر بیان می‌شوند:

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

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

در روابط فوق، عبارت اول مربوط به اثرات ذوب و انجماد در محاسبات است که اساس آن تئوری آنتالپی تخلخل می‌باشد، عبارت‌های 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 عبارت چهارم مربوط به اثر نیروی شناوری بر مبنای تئوری بوزینسک می‌باشد. در روابط (۶) و (۷)  $\beta$  کسر حجمی سیال،  $\omega$  عددی کوچک و  $A_m$  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:

$$\varepsilon(\rho C)_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + u \frac{\partial T_f}{\partial x} + v \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = -\rho_p L \frac{\partial \beta}{\partial t} \quad (8)$$

$$(k_{fe} + k_{fd}) \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) + h_{sf} A_{sf} (T_f - T_s)$$

$$(1-\varepsilon)(\rho C)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \quad (9)$$

$$k_{ss} \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) + h_{sf} A_{sf} (T_s - T_f)$$

که در آن  $\rho_f$  و  $\rho_s$  بر ترتیب 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 بشرح ذیل ارائه شده است:

### ۳- بحث و نتایج

مدل مورد بررسی مطابق شکل (۲) یک مبدل پوسته-لوله از جنس آلومینیوم، حاوی ماده تغییر فازدهنده 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  $400 \text{ kw/m}^3$  وجود دارد. مرزها در دمای محیط قرار دارند (۲۹۳ K). در ابتدای تحلیل هیچ کسری از سیال وجود نداشته و با ذوب سیال این کسر افزایش خواهد یافت، حل مسئله به صورت گذرا و با استفاده از نرم افزار Ansys-Fluent نسخه ۱۴ انجام شده است. بررسی برای سه حالت با آرایش مختلف لوله‌ها صورت می‌گیرد. حالت اول:  $p_x = p_y = 20 \text{ cm}$  و  $d_p = 15 \text{ cm}$  که تخلخل آن  $\varepsilon = 0.55821$ ، حالت دوم:  $p_x = p_y = 25 \text{ cm}$  و  $d_p = 15 \text{ cm}$  که تخلخل آن  $\varepsilon = 0.71726$  و حالت سوم:  $p_x = p_y = 35 \text{ cm}$  و  $d_p = 15 \text{ cm}$  که تخلخل آن  $\varepsilon = 0.85574$  خواهد بود.

در شکل‌های (۳) و (۴) کانتور سرعت برای زمان‌های ۷۵ ثانیه و ۲۰۰ ثانیه نشان داده شده‌اند. در این تصاویر می‌توان الگوی جریان‌های سیال مذاب ناشی از شناوری را مشاهده نمود. در تمام گام‌های 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 می‌باشد. سرعت در بالاترین نقطه از مقطع دایره در مجاورت جدار و هم‌چنین پایین‌ترین نقطه در مجاورت جدار دارای کمترین مقدار می‌باشد، بطوریکه می‌توان سرعت را در این نقاط با تقریب خوبی صفر در نظر گرفت. دو ناحیه گردابی کوچک در بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مجاورت جدار پدیدار می‌گردد. هم‌چنین دو ناحیه گردابی بزرگ‌تر در داخل دایره در سمت چپ و راست

مشاهده می‌شود که بین جریان‌های سیال بالارو در مرکز و پایین‌رو در مجاورت جدار محصور گردیده‌اند. شکل (۵) کسر حجمی سیال مذاب را برای گام‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود به مرور زمان بخش بیشتری از مخلوط مذاب به فاز مایع تبدیل خواهد شد. اختلاف جزئی بین مقادیر بیشینه و کمینه در گام‌های زمانی مساوی نشان می‌دهد که تقریباً وضعیت ذوب در تمام ناحیه به صورت یکنواخت برای تخلخل مفروض پیش می‌رود. در شکل‌های (۶) و (۷) می‌توان 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 هم‌دما 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 می‌تواند 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 هرگام زمانی در فلز متخلخل و نیمه سمت چپ توزیع دما در مخلوط مذاب را نشان می‌دهد.

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 پایین‌تر است.

## ۵- مراجع

- [1] Zablla, B., Marin, J., Cabeza, L. F. and Mehling, H., 2003, "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Material", *Heat Transfer and Analysis and Applications, Appl. Therm. Eng.* 23.
- [2] Pasupathy, A., et al, 2007, "Investtigation and Numerical Simulation Analysis on the Thermal Performance of a Building Roof in Corporating Phase Change Material for Thermal Management", No. 28, pp. 556-565.
- [3] Mosaffaa, A. H., Talati, F., Basirat Tabrizi, and 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, pp357-67.
- [5] Grriggs, E. I., Pitts D.R. and 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. and Bruggemann, D., 2011, "Shell-and-Tube Type Latent Heat Thermal Energy Storage: Numerical Analysis and Comparison with Experiments", *Heat and Mass Transfer*, 47, 1027-33.
- [7] Liu, Z., Yao, Y. and Wu, H., 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, V. and Stevanovic, D., 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 V. R. and 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.

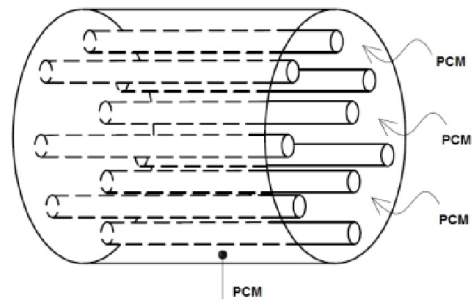
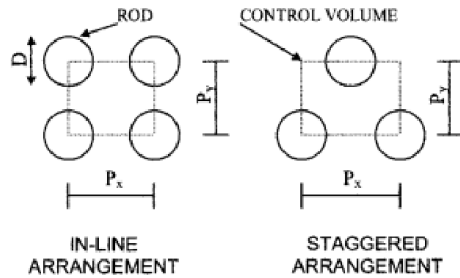
مقایسه کمیت‌های محاسبه‌شده برای سه تخلخل مختلف ذکر شده، در دو زمان مختلف به عنوان نمونه در زمان ۷۵ ثانیه که به نقطه شروع تحلیل نزدیک است و همچنین زمان ۱۷۵ ثانیه که به پایان تحلیل و اتمام ذوب نزدیک می‌باشد، صورت گرفته است. شکل‌های (۸) و (۹) تغییرات دما در راستای شعاع قائم را در زمان‌های ۷۵ و ۱۷۵ ثانیه 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 تنبلی بیشتر و کند بودن فرآیند رشد ترموفیزیکی و ترمودینامیکی ذوب سیال در محفظه می‌باشد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر تغییر تخلخل بر انتقال حرارت مبدل بررسی شد، نتایج نشان می‌دهد 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 باشد، دمای بیشتری برای ذوب ماده تغییر فزاینده 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 ذوب‌شده کمتر می‌شود. به‌طور کلی 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 آرایش مبدل، در حالتی که تخلخل کمتر است بهره جست.

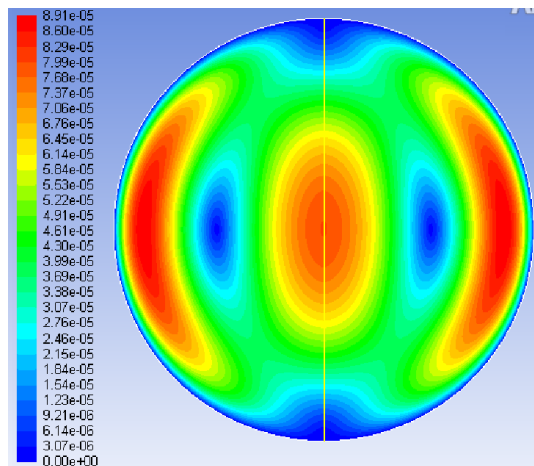
Porous Layers", Int. J. Heat Mass Transfer, 31, 1081-91.

[10] Geogiadis J. G. and Catton I., 1988, "Dispersion in Cellular Thermal Convection in

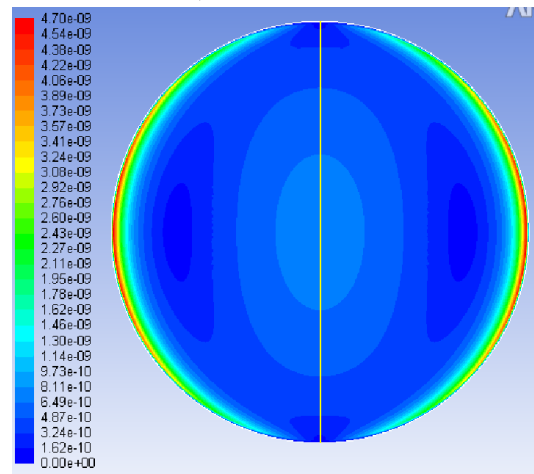


شکل (۱): مشخصات هندسی برای آرایش لوله‌ها با قطر و گام معین [۸].

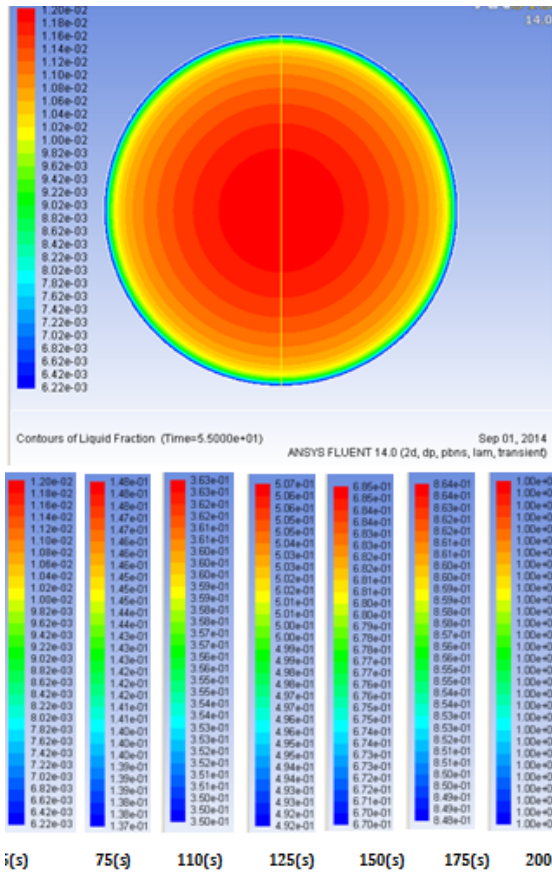
شکل (۲): طرحواره مدل مورد بررسی



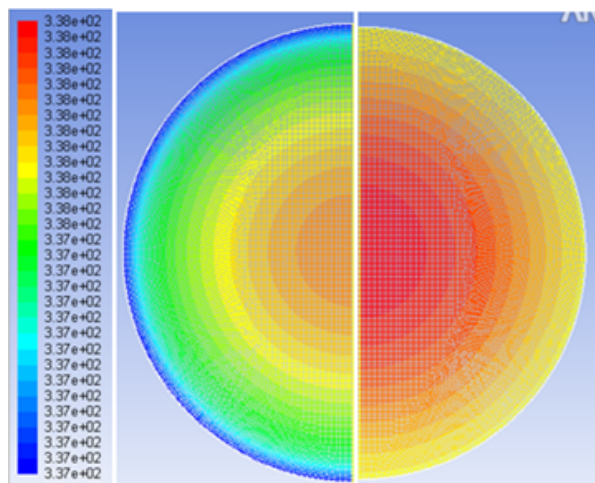
شکل (۳): توزیع سرعت برای گام زمانی ۷۵ ثانیه



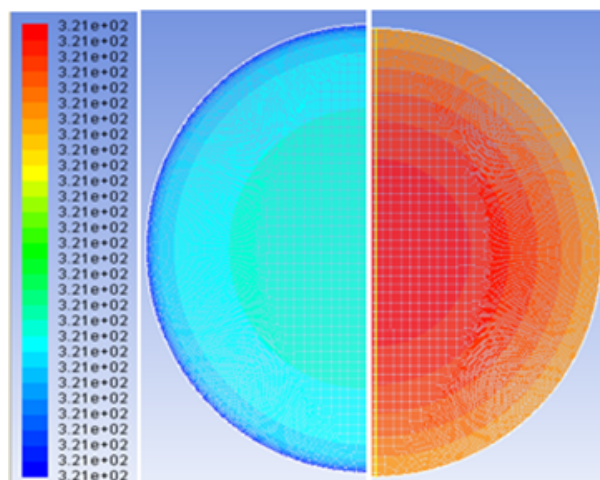
شکل (۴): توزیع سرعت برای گام زمانی ۲۰۰ ثانیه



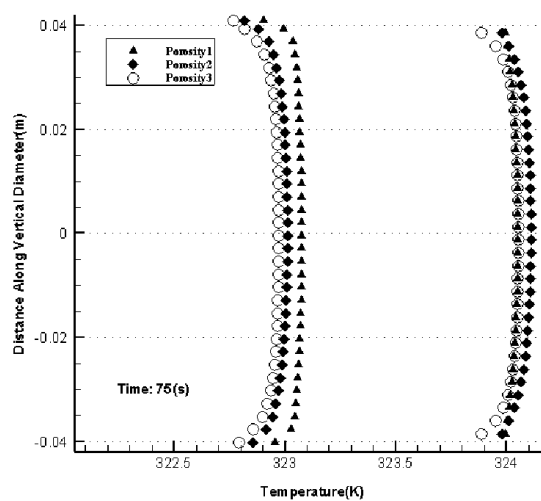
شکل (۵): کسر حجمی سیال مذاب در زمان های مختلف



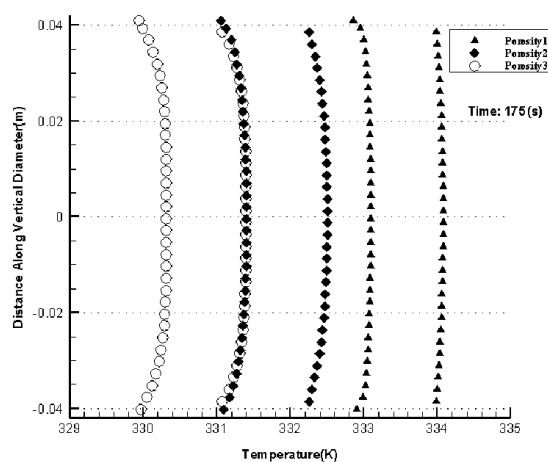
شکل (۶): توزیع دما برای سیال مذاب و جامد متخلخل در زمان ۷۵ ثانیه.



شکل (۷): توزیع دما برای سیال مذاب و جامد متخلخل در زمان ۲۰۰ ثانیه.



شکل (۸): تغییرات دما در امتداد شعاع قائم، برای ضرایب تخلخل مختلف در زمان ۷۵ ثانیه.



شکل (۹): تغییرات دما در امتداد شعاع قائم، برای ضرایب تخلخل مختلف در زمان ۱۷۵ ثانیه.