



بررسی تاثیر استفاده از محیط متخلخل در کارایی مبدل حرارتی لوله‌ای در سیستم سنتز هیدروترمال جریان مداوم

پدرام کریمی پور فرد^۱، ابراهیم افشاری^{۲*} و مسعود ضیائی راد^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۵/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

چکیده

فرآیند سنتز هیدروترمال برای ساخت اکسیدهای فلزی نانو، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این فرایندها، اکسیدهای فلزی باید با سرعت مناسب دمای خود را از دست بدهند؛ زیرا در غیر این صورت، بلورهای درشت‌تر تشکیل شده که این امر به کیفیت محصول ضرر می‌زند. استفاده از یک مبدل حرارتی قدرتمند به این امر کمک می‌کند. هدف از این مقاله، در مرحله اول، مدلسازی عددی مبدل حرارتی در سیستم سنتز هیدروترمال جریان مداوم برای کاهش دمای اکسیدهای فلزی نانو است. پس از تایید درستی نتایج عددی به کمک مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی، در مرحله دوم با به‌کارگیری محیط متخلخل داخل مبدل، سعی شده است که سرعت کاهش دمای محصولات افزایش یابد که این امر در نهایت، به بهبود کیفیت محصولات منجر خواهد شد. با استفاده از محیط متخلخل در مبدل حرارتی، سرعت کاهش دمای محصولات ۴۰٪ معادل با ۲۰ درجه سلسیوس بر ثانیه افزایش می‌یابد و از این‌رو، طول مبدل حرارتی مورد نیاز در این فرایند می‌تواند ۳۵٪ کاهش پیدا کند.

کلمات کلیدی: مبدل حرارتی؛ سنتز هیدروترمال جریان پیوسته؛ محیط متخلخل.

Study of Porous Medium Application Impact on Performance of a Tubular Heat Exchanger in Continuous Hydrothermal Flow Synthesis System

P. Karimipour Fard¹, E. Afshari^{2,*}, and M. Ziaei-Rad³

¹ MSc Student, Department of mechanical engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

² Associate Professor, Department of mechanical engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

³ Assistant Professor, Department of mechanical engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Abstract

The continuous hydrothermal flow synthesis processes are applied to manufacture metal oxide nanoparticles. In these processes, the temperature of the nanoparticles should be reduced with a convenient rate to avoid forming larger crystals, which may affect the quality of the products. Using a high-efficiency heat exchanger can help achieving this purpose. The first step in this work is to model a heat exchanger in CHFS (continuous hydrothermal flow synthesis) in order to reduce the temperature of nano-metal oxides. The numerical results obtained are validated with the available experimental data. In the next step, porous media are employed to enhance the reduction rate in the product temperature, which eventually leads to an improvement in the product quality. The results obtained show that using the porous media increases the reduction rate in temperature by almost 40%, which means 20 °C/s more than a typical heat exchanger, and also the application of porous media decreases the required length of the heat exchanger by almost 35%.

Keywords: Heat Exchanger; Continuous Hydrothermal Flow Synthesis; Porous Media.

۱- مقدمه

آب سوپر کریتیکال، به عنوان حلال و سیال عامل در بسیاری از فرایندها استفاده می‌شود. در آب سوپر کریتیکال، ترکیبات آلی غیر قطبی به واکنش مواد آلی و اکسیدها سرعت می‌بخشد [۱ و ۲]. از این رو، فرآیندهای اکسیداسیون در آب فوق بحرانی رو به گسترش است که سبب افزایش راندمان و عدم تولید مواد مضر برای محیط زیست می‌شود [۳]. ترکیبات نمک فلزها که تا حد زیادی غیر قابل حل هستند، در آب فوق بحرانی هیدرولیز می‌شوند و سپس با از دست دادن سریع آب خود تبدیل به اکسید فلزی می‌شوند. این فرایند، سنتز هیپروترمال آب فوق بحرانی نام دارد که در تولید بسیاری از اکسیدهای فلزی کاربرد دارد. طیف گسترده‌ای از این روش، در بسیاری از زمینه‌ها از جمله، بازسازی محیط زیست، تجزیه و عکس تجزیه، الکترونیک، برنامه‌های کاربردی دارویی، جداسازی، فیلم‌های نازک، جوهر و ضد عفونی استفاده می‌شود [۴].

در ساخت اکسیدهای فلزی نانو، روش سنتز هیپروترمال کاربرد فراوانی دارد و بهتر از روش‌های سنتی است [۵]. سنتز هیپروترمال، جریان مداوم برای غلبه بر محدودیت‌های واکنش‌های هیپروترمال توسعه داده شده است [۶]. استفاده از آب به جای حلال‌های آلی در این سیستم، می‌تواند به تولید بسیاری از نانو ذرات با کیفیت خوب کمک کند. در این فرایندها، اکسیدهای فلزی باید با سرعت مناسب دمای خود را از دست بدهند و از حالت دوغ - آب خارج شوند؛ زیرا در غیر این صورت، بلورهای درشت‌تر تشکیل شده که این امر، به کیفیت محصول ضرر می‌زند. استفاده از یک مبدل حرارتی با آب فوق بحرانی، با طراحی مناسب و قدرتمند به این امر کمک می‌کند. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، می‌توان به طراحی این مبدل کمک کرد [۳ و ۷]. مبدل مورد استفاده در این فرایند، باید بتواند با سرعت بالا دمای محصولات را کاهش دهد. بدین منظور، استفاده از یک طرح که در زمان کمتر دمای محصولات را کاهش دهد مطلوب بوده، نتیجه این امر، کاهش ابعاد مبدل و کیفیت بالای محصولات است [۸ و ۹].

محیط‌های متخلخل، انتخاب مناسبی برای کاربردهای انتقال جرم و انتقال حرارت از جمله مبدل حرارتی، الکتروود باتری، پایه کاتالیست، فیلتر و غیره می‌باشند. مقاومت در

برابر جریان سیال در این دسته از کاربردها به عنوان یک عامل مهم به شمار رفته، توسط پارامتری به نام نفوذپذیری، شناسایی و آزموده می‌شود. از طرفی نفوذپذیری ماده متخلخل را می‌توان تابعی از خصوصیات پیچیده هندسی محیط متخلخل دانست، که اندازه آن می‌تواند معیاری برای میزان یکنواختی ساختاری محیط متخلخل بوده، به شدت روی رفتار جریان سیال تاثیرگذار است. بررسی جریان سیال از درون محیط متخلخل می‌تواند به تامین و بهینه‌سازی پارامتری همچون، نفوذپذیری در این دسته از مواد بینجامد. به نظر می‌رسد، استفاده از محیط متخلخل می‌تواند در افزایش کارایی این مبدل حرارتی موثر باشد.

پژوهش‌هایی در زمینه فرایند هیپروترمال جریان مداوم و انتقال حرارت در محیط متخلخل، به صورت مجزا انجام شده است؛ اما کاربرد محیط متخلخل در مبدل فرایند هیپروترمال جریان مداوم، مورد بررسی قرار نگرفته است. در مقاله‌ای که توسط کای^۱ و کریستوفر^۲ انجام شد، مبدل حرارتی برای فرایند سنتز هیپروترمال جریان مداوم، به صورت تجربی مدل‌سازی گردید. در این پژوهش، به بررسی سرعت خنک‌کاری محصولات با تغییر پارامترهای ورودی پرداخته شده است [۱۰]. سپس بررسی عددی برای جریان در مبدل حرارتی هیپروترمال و مقایسه نتایج با داده‌های تجربی توسط جیانگ^۳ و همکاران صورت گرفته است [۱۱]. در کار دیگر توسط لیچت^۴ و همکارانش، از دی اکسید کربن فوق بحرانی برای مدل‌سازی جریان دوغ - آب در مبدل حرارتی استفاده شد که نتایج آنها با داده‌های تجربی نیز دارای همخوانی مناسبی بود و البته دارای نقص‌های مختصری نیز بود [۱۲]. نظری و همکاران، بهبود انتقال حرارت در یک کانال با یک بلوک متخلخل را با روش بولتزنم بررسی کردند و نشان دادند، با افزایش ضریب تخلخل، عدد ناسلت افزایش می‌یابد [۱۳]. در پژوهشی دیگر نظری و همکارانش، انتقال حرارت نانو جریان اکسید آلومینیم در یک لوله‌ی متخلخل را مورد آزمایش تجربی قرار دادند و نشان دادند که افزایش ترم انتقال حرارت، افت متخلخل را پوشش می‌دهد [۱۴]. در آخرین

¹ Cai² Christopher³ Jiang⁴ Licht

۲- مدل سازی ریاضی

معادلات حاکم بر مبدل حرارتی شامل، معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی است [۲۶].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_h \quad (3)$$

با توجه به اثبات توانائی و دقت مناسب مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ برای شبیه سازی عددی جریان آشفته در مبدل‌های حرارتی در مطالعات گذشته [۱۰]، در این مقاله نیز از این روش بهره برده شده است. معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن را می‌توان به صورت روابط (۴-۵) نوشت: [۲۶].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

که در آنها G_k ترم تولید آشفتگی بوده، برابر با رابطه (۶) است:

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

ضرایب ثابت $C_{\varepsilon 2}$ ، $C_{\varepsilon 1}$ ، σ_ε ، σ_k موجود در معادلات ۴ و ۵ را می‌توان در داده‌های تجربی یافت [۲۷].

$\sigma_k = 1$ ، $\sigma_\varepsilon = 1/3$ ، $C_{\varepsilon 1} = 1/44$ ، $C_{\varepsilon 2} = 1/92$ با حل این معادلات و تعیین مقادیر k و ε در هر تکرار، لزجت آشفتگی نیز از رابطه (۷) محاسبه خواهد شد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

با توجه به کارائی مدل $k - \varepsilon$ تنها در ناحیه کاملاً آشفته، در مجاورت دیوار از مدل دو ناحیه‌ای ولف اشتاین استفاده شده است. در این ناحیه، پس از حل تنها یک معادله انتقال برای k به شکل رابطه (۸) استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t G_k - \rho \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (8)$$

لزجت آشفتگی به صورت رابطه (۹) تعیین می‌شود.

$$\mu_t = \rho C_\mu \sqrt{k} l_\mu \quad (9)$$

در روابط فوق، l_μ و l_ε به ترتیب برابرند با:

$$l_\varepsilon = C C_\mu^{-0.75} \left[1 - \exp \left(-\frac{y^+}{2C C_\mu^{-0.75}} \right) \right] y$$

$$l_\mu = 0.41 C_\mu^{-0.75} \left[1 - \exp \left(-\frac{y^+}{70} \right) \right] y \quad (10)$$

مطالعات عددی انجام گرفته، کای و همکاران، به بررسی عددی جت جریان سنتز هیدروترمال جریان مداوم پرداخته-اند [۱۵]. روابطی ریاضی نیز، برای آب فوق بحرانی برای مدل‌سازی جریان دوغ - آب در مبدل حرارتی، در مقالات گذشته ارائه شده است [۱۶-۱۹]. در پژوهش‌های اخیر، بررسی روی جریان سنتز هیروترمال جریان مداوم برای محصولات و موارد جدیدی از جمله CO_2 ، نانو ذرات اکسید آهن و همچنین شعله‌های بر پایه‌ی نانو فسفر انجام گرفته است که نشان‌دهنده کاربرد فراوان این نوع جریان در مطالعات نوین است [۲۰-۲۲].

مطالعات بسیاری در جهت بهبود انتقال حرارت با کمک محیط‌های متخلخل در گذشته صورت گرفته است. از آن جمله، جورج جونکو^۱ به بررسی روند انتقال حرارت از استوانه متخلخل پرداخته است [۲۳]. همچنین، فومی رانگ^۲ در پژوهشی دیگر، به بررسی تاثیر محیط متخلخل بر میزان انتقال حرارت در جریان درون لوله پرداخته است [۲۴]. بورانتاس^۳ نیز با کمک گرفتن از حل عددی، تاثیر محیط متخلخل بر انتقال حرارت از نانو سیالات را مورد بررسی قرار داده است [۲۵].

در این مقاله، در مرحله اول یک روش عددی برای مدل‌سازی جریان در یک مبدل حرارتی در سیستم هیدروترمال جریان مداوم ارائه می‌شود. نتایج عددی برای توزیع دما و سرعت، تغییرات دما در طول لوله برای محصولات و آب خنک کن و همچنین ضریب انتقال حرارت در طول لوله محاسبه می‌شود؛ سپس با مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های تجربی [۱۰]، صحت مدل‌سازی تایید و نشان داده می‌شود که برای مدل‌سازی مبدل حرارتی در سیستم هیدروترمال جریان مداوم، می‌توان از این مدل با اطمینان کامل بهره برد. در مرحله دوم با استفاده از محیط متخلخل داخل مبدل حرارتی و مدل‌سازی عددی این مبدل، سعی شده است، سرعت کاهش دمای محصولات را افزایش داد، که این امر در نهایت به بهبود کیفیت محصولات منجر خواهد شد.

¹ Geoghe Junko

² Fumei Rong

³ Bourantas

محیط متخلخل، γ تخلخل محیط متخلخل، K_{eff} هدایت گرمایی مؤثر محیط متخلخل، S_f^h ترم چشمه آنتالپی سیال، u میدان سرعت، T میدان دما، J_i شار پخش نوع i ، h_i آنتالپی محسوس نوع i و τ تنش برشی است.

هدایت گرمایی مؤثر محیط متخلخل، K_{eff} ، میانگین حجمی هدایت گرمایی سیال و هدایت گرمایی جامد است و به صورت رابطه (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.

$$K_{eff} = \gamma K_f + (1 - \gamma) K_s \quad (15)$$

که در آن γ تخلخل، K_f هدایت گرمایی سیال و K_s هدایت گرمایی جامد است.

تخلخل γ ، کسر حجمی سیال در ناحیه متخلخل (کسر حجمی باز محیط متخلخل) است.

ضریب انتقال حرارت جابجایی، روی سطح لوله حاوی محصولات محاسبه شده است. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی، ابتدا حرارت انتقال یافته در هر المان به صورت رابطه (۱۶) مورد محاسبه قرار گرفته است:

$$Q_i = \dot{m}_i (h_2 - h_1) \quad (16)$$

در این معادله h آنتالپی مخصوص، \dot{m} دبی جرمی جریان محصولات و Q انتقال حرارت از مقطع مورد نظر است.

در ادامه با استفاده از مقدار Q ، به محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی پرداخته می‌شود.

$$U_i = \frac{Q_i}{A_i \Delta T_i} \quad (17)$$

در معادله (۱۷)، A_i مساحت مقطع و ΔT_i اختلاف حرارت در دو طرف لوله است.

۳- مدل‌سازی عددی مبدل حرارتی لوله‌ای

در مرحله اول، یک روش مدل‌سازی عددی برای مبدل حرارتی در سیستم سنتز هیدروترومال جریان مداوم، به صورت متعارف انجام می‌شود. در مرحله دوم، محیط متخلخل به دامنه مدل‌سازی اضافه می‌شود. مرحله اول مدل‌سازی عددی شامل سه زیر دامنه است:

(۱) لوله داخلی از جنس فولاد ضد زنگ برای جریان محصولات با قطر ۴/۵۷ میلی‌متر

(۲) دیوار بین محصول و آب خنک‌کننده با ضخامت ۰/۸۹ میلی‌متر

(۳) لوله بیرونی برای جریان آب خنک‌کننده با قطر ۱۵/۷۵ و بازوهای خروجی آب خنک‌کن با قطر ۱۵ میلی‌متر

از این مدل برای محاسبه خواص جریان تا $200 < \gamma \rho \sqrt{k} / \mu$ استفاده می‌شود. همچنین شبکه محاسباتی در مجاورت دیوار به گونه‌ای ریز شده است که اولین گره محاسباتی در حدود $\gamma^+ = 5$ واقع شود تا شرط صحت مدل فوق تامین شود.

در بررسی معادله مومنتم در محیط متخلخل، باید توجه داشت که در حضور تخلخل‌های باز به واسطه اختلاف فشار، امکان نفوذ سیال از طریق ماده متخلخل فراهم می‌شود. محیط متخلخل با افزودن یک ترم چشمه مومنتم به معادلات استاندارد جریان سیال، مدل می‌شود. ترم چشمه شامل: ترم اتلاف لزج (ترم اول سمت راست) و ترم اتلاف اینرسی (ترم دوم سمت راست) به صورت رابطه (۱۱) است.

$$S_i = -(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |u| u_j) \quad (11)$$

در معادله بالا، S_i ترم چشمه معادله مومنتم در راستای محور i ، $|u|$ اندازه سرعت و D و C ماتریس‌های تعیین شده هستند. این ترم به گرادین فشار در سلول متخلخل کمک می‌کند و یک افت فشار متناسب با سرعت سیال (یا مجذور سرعت) در سلول ایجاد می‌شود. برای یک محیط متخلخل همگن داریم:

$$S_i = -(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i) \quad (12)$$

که در آن α نفوذپذیری و C_2 فاکتور اتلاف اینرسی است. D و C به ترتیب، به عنوان ماتریس‌های قطری با مقادیر $1/\alpha$ و C_2 در روی قطرهای (و بقیه عناصر برابر صفر) هستند.

می‌توان ترم چشمه را به عنوان توانی از اندازه سرعت به شکل رابطه (۱۳) تعریف کرد.

$$S_i = -C_0 |u|^{c_1} = -C_0 |u|^{(c_1-1)} u_i \quad (13)$$

C_0 و C_1 ضرایبی هستند که به صورت تجربی تعیین می‌شوند و به ترتیب برابر با ۰/۵۵ و ۰/۲۸ هستند [۲۳].

در این مساله، به دلیل غیر واکنشی بودن مرز سیال و ماده متخلخل و همچنین زیاد بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی به دلیل آشفته بودن جریان، فرض تعادل حرارتی معتبر است. برای شبیه‌سازی‌هایی که در آنها محیط متخلخل و جریان سیال در تعادل گرمایی هستند، شار هدایتی در محیط متخلخل، از هدایت گرمایی مؤثر و ترم انتقال استفاده می‌کند که شامل اینرسی گرمایی ناحیه جامد است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1 - \gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{u} (\rho_f E_f + p)) = S_f^h + \nabla \cdot [K_{eff} \nabla T - (\sum_i h_i J_i) + (\vec{\tau} \cdot \vec{u})] \quad (14)$$

در معادله بالا، E_f کل انرژی سیال، E_s کل انرژی ناحیه جامد محیط متخلخل، ρ_f دانسیته سیال، ρ_s دانسیته ناحیه جامد

شکل ۱، یک جداره با ضخامت دیواره لوله فولادی اطراف آن ایجاد شد که در این حالت، نتایج مطبوع حاصل شد؛ بنابراین در مرحله دوم مدل‌سازی عددی، دامنه محاسباتی شامل چهار زیر دامنه است:

(۱) لوله داخلی از جنس فولاد ضد زنگ برای جریان محصول با قطر ۴/۵۷ میلی‌متر

(۲) دیوار بین محصول و آب خنک‌کننده با ضخامت ۰/۴۵ میلی‌متر از جنس فولاد

(۳) دیوار بین محصول و آب خنک‌کننده با ضخامت ۰/۴۵ میلی‌متر از جنس ماده متخلخل

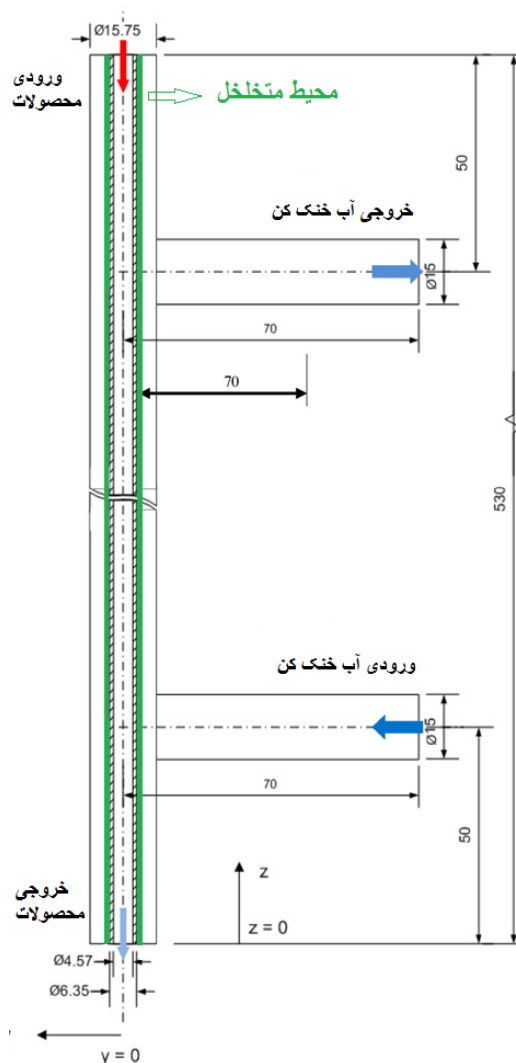
(۴) لوله بیرونی برای جریان آب خنک‌کننده با قطر ۱۵/۷۵ میلی‌متر و بازوهای خروجی آب خنک‌کن با قطر ۱۵ میلی‌متر شرایط مرزی نیز مانند مرحله اول انتخاب شده‌اند. ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل در این پژوهش ۳۰ میلی داریسی، ضریب تخلخل ۰/۶ و محیط متخلخل به صورت همگن است. نوع محیط متخلخل، از نوع فلزی است که در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم (ضریب هدایت حرارتی ۲۰۲ وات بر متر کلونین) در نظر گرفته شده است. به دلیل حالت استوانه‌ای محیط متخلخل و لوله‌ای که محیط متخلخل روی آن سوار می‌شود، می‌توان از خارهای گوه‌ای دماغه‌ای و یا خارهای طولی برای اتصال محیط متخلخل و لوله استفاده کرد، البته از تکنیک جا انداختن حرارتی به دلیل فلزی بودن هر دو محیط نیز می‌توان بهره برد.

مدل‌سازی عددی در کلیه مراحل به صورت سه بعدی انجام گرفته است.

۳-۱- شبکه‌بندی مدل

برای ایجاد شبکه در مرحله اول، حجم مدل‌سازی عددی به سه قسمت شامل: لوله‌ای که محصولات از آن عبور می‌کنند، جداره حائل که از جنس فولاد است و لوله بیرونی که محل عبور آب خنک‌کن است، تقسیم شده است. حجم اول، از اهمیت بیشتری نسبت به دو حجم دیگر برخوردار است؛ زیرا تغییرات دمایی در آن شدید است. به همین دلیل شبکه محاسباتی در این حجم ساختار یافته است. شبکه حجم دوم نیز به صورت ساختار یافته است؛ اما حجم سوم، به دلیل تغییرات دمایی کم و کم اهمیت بودن به صورت نامنظم و مثلثی شبکه‌بندی شده

طول مبدل حرارتی ۵۳۰ و طول دو بازو ۶۲ میلی‌متر هستند.



شکل ۱- دامنه مدل‌سازی عددی

آب داغ با دمای ۱۹۲ درجه سلسیوس و تحت فشار (۲۴/۱ مگاپاسکال)، در لوله داخلی در جریان است؛ در حالی که آب خنک‌کن در دمای ۱۰ درجه سلسیوس و فشار ۰/۶ مگا پاسکال در پوسته خارجی جریان دارد. جهت جریان در لوله‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

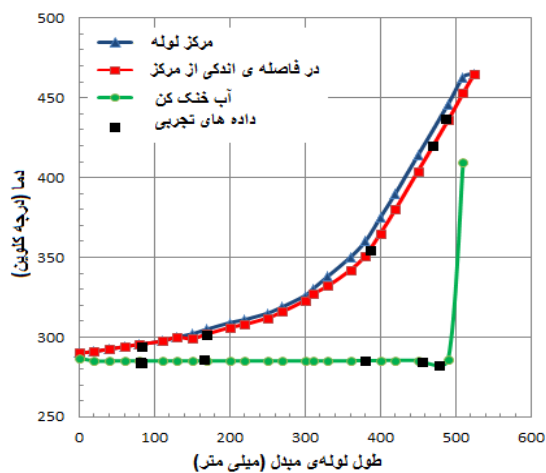
برای ایجاد محیط متخلخل در لوله آب خنک‌کن، ابتدا در تمام لوله محیط متخلخل ایجاد شد؛ اما نتیجه دلخواه در کاهش دمای محصولات دیده نشد، به همین دلیل مطابق

همگرایی با دقت 10^{-6} ادامه پیدا کرده است. انتقال حرارت از دیواره خارجی ناچیز فرض می‌شود. در حل عددی، آب داغ ۱۹۲ درجه سلسیوس و تحت فشار (۲۴/۱ مگاپاسکال) در لوله داخلی در جریان است؛ در حالی که آب خنک کن در دمای ۱۰ درجه سلسیوس و فشار ۰/۶ مگاپاسکال در سمت پوسته جریان دارد. برای حل معادلات، از نرم افزار فلوئنت^۲ نسخه ۶.۳.۲۶ استفاده شده است.

۴- نتایج

۴-۱- اعتبار سنجی

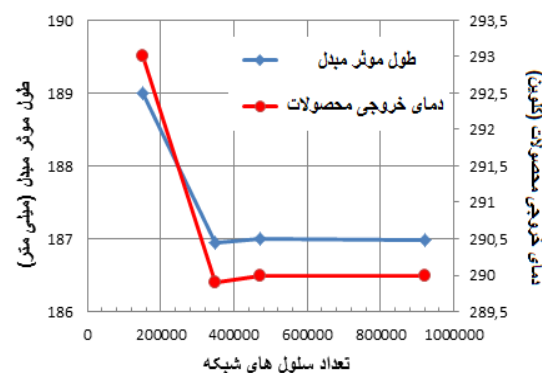
در شکل ۳، مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی و حل عددی انجام گرفته است. برای این مقایسه، تغییرات دما در مرکز و در فاصله کمی از مرکز لوله محصولات اندازه‌گیری شده است. این امر به این دلیل است که سنسورهای اندازه‌گیری دما در تست تجربی، کاملاً در مرکز لوله میانی قرار نگرفته‌اند. برای دماهای اندازه‌گیری شده در فاصله اندک با مرکز، تطابق کاملی با تست تجربی مشاهده می‌شود که این نشان‌دهنده قرار نگرفتن سنسورها کاملاً در مرکز است. مشاهده می‌شود، محصولات پس از طی ۱۳۰ میلی‌متر در مبدل، ۱۰۰ درجه سلسیوس دمای خود را از دست می‌دهند. با توجه به دبی محصولات، این مسافت در ۲ ثانیه طی می‌شود،



شکل ۳- مقایسه نتایج حل عددی برای دما در طول لوله‌ی محصولات و آب خنک کن با نتایج تجربی [۱۰]

است. برای ایجاد شبکه از نرم افزار گمبیت^۱ کمک گرفته شده است. برای رسیدن به اندازه شبکه مناسب، چهار شبکه مختلف ایجاد شده است و تعداد شبکه ۴۰۰.۰۰۰ به دلیل مشابه بودن نتایج با شبکه‌های ریزتر (با دقت بالاتر از ۰/۰۱)، به عنوان شبکه حل انتخاب شده است. تعداد سلول‌های نهایی به تفکیک سه حجم شبکه‌بندی شده به ترتیب برای حجم اول تا سوم، ۱۲۳۱۱۸، ۷۹۵۷۶ و ۱۹۷۳۲۵ است.

برای ایجاد شبکه در مرحله دوم، حجم مدل‌سازی عددی به چهار قسمت: لوله‌ای که محصولات از آن عبور می‌کنند، جداره حائل که از جنس فولاد است، جداره متخلخل و لوله بیرونی که محل عبور آب خنک‌کن است، تقسیم شده است. برای رسیدن به اندازه شبکه‌ی مناسب برای محیط متخلخل، نیز چهار شبکه مختلف ایجاد شده است و همان‌طور که در شکل ۲ مشخص شده است، تعداد شبکه ۴۷۰.۰۰۰ به دلیل مشابه بودن نتایج با شبکه‌های ریزتر (با دقت بالاتر از ۰/۰۱)، عنوان شبکه حل انتخاب شده است.



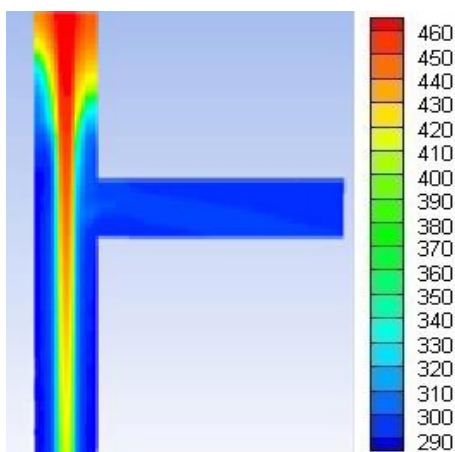
شکل ۲- استقلال نتایج از شبکه در حالت متخلخل

۳-۲- روش حل

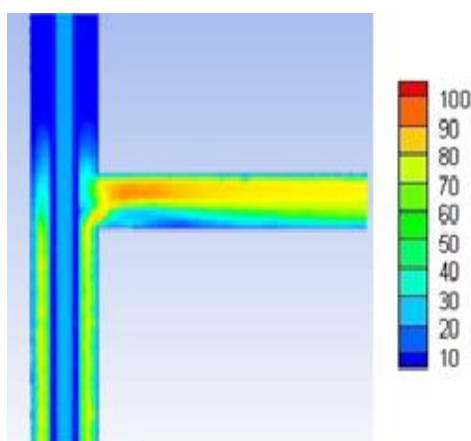
برای مدل‌سازی جریان مغشوش از روش $k-\epsilon$ استاندارد و برای مدل‌سازی جریان نزدیک دیواره‌ها، از مدل دو ناحیه‌ای ولفاشتاین استفاده شده است. از الگوریتم استاندارد سیمپل برای حل معادلات کوپل سرعت و فشار و از روش مرتبه دوم در گسسته‌سازی معادلات کمک گرفته شده است. برای حل معادلات از یک روند تکرار استفاده شده، حل تا رسیدن به

² Fluent

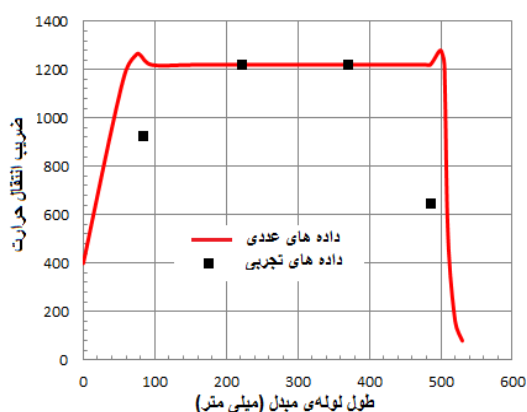
¹ Gambit



شکل ۴- کانتور دما



شکل ۵- کانتور سرعت



شکل ۶- ضریب انتقال حرارت جابجایی به دست آمده از حل عددی در طول لوله و مقایسه با داده‌های تجربی [۱۰]

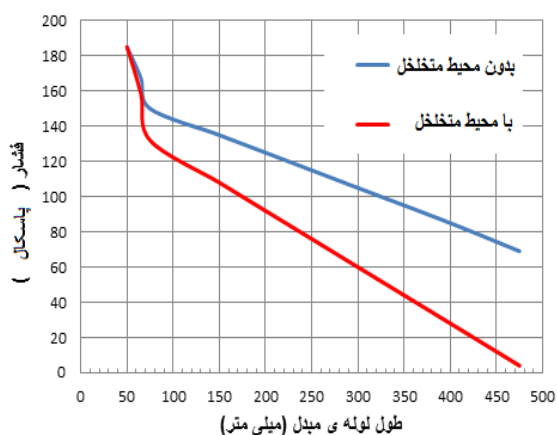
بنابراین دمای محصولات در ۲ ثانیه ۱۰۰ درجه کاهش می‌یابد که این امر به خوبی می‌تواند کیفیت مطلوب محصولات را تضمین کند. بعد از این طول، شیب تغییرات دما کمتر شده، محصولات با شدت کمتری دمای خود را از دست می‌دهند تا به دمای آب خنک کن برسند.

در شکل ۴ و ۵، کانتورهای دما و سرعت برای قسمت بالایی مبدل حرارتی نشان داده شده است. دلیل بررسی این قسمت از هندسه، حل این است که تغییرات اصلی در دمای محصولات در این قسمت، از مبدل رخ می‌دهد. با مشاهده کانتور دما، این امر کاملاً واضح است که تغییرات در نزدیکی خروجی آب خنک کن به شدت سریع است. در قسمت بالای لوله‌ی آب خنک کن با توجه به کانتور سرعت که در شکل ۵ دیده می‌شود، یک منطقه راکد ایجاد شده است. این امر، اندکی بین نتایج تجربی و عددی تفاوت ایجاد می‌کند که با نزدیک کردن خروجی آب خنک کن به ورودی محصولات، می‌توان این مشکل را برطرف کرد.

در شکل ۶، نمودار ضریب انتقال حرارت جابجایی به دست آمده از حل عددی ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ضریب انتقال حرارت در طول لوله بین ورودی و خروجی آب خنک کن، تقریباً مقدار ثابتی دارد؛ اما در محدوده محل ورود و خروج آب خنک کن، مقداری افزایش یافته و مقدار بیشینه آن، در این نواحی رخ می‌دهد. در انتهای لوله به دلیل راکد بودن آب، افت شدید ضریب انتقال حرارت مشاهده می‌شود. در میانه طول لوله داده‌های عددی و تجربی تطابق مناسبی دارند؛ اما در مناطق راکد، این تطابق کمتر است. این امر به دلیل راکد بودن آب در این مناطق است؛ زیرا میزان خطای حل عددی و اندازه‌گیری تجربی در این منطقه افزایش می‌یابد.

۴-۲- استفاده از محیط متخلخل برای بهبود انتقال حرارت

در حالت عادی (بدون استفاده از محیط متخلخل)، مبدل حرارتی در ۲ ثانیه اول ۱۰۰ درجه دمای محصولات را کاهش می‌دهد که این امر به معنی، نرخ کاهش ۵۰ درجه سلسیوس در ثانیه است. با مشاهده شکل ۷ که در آن تغییرات دما در طول مبدل برای حالت معمولی و با محیط متخلخل آمده



شکل ۸- تغییرات فشار آب خنک کن در فاصله‌ی ورودی و خروجی آب

۵- جمع بندی

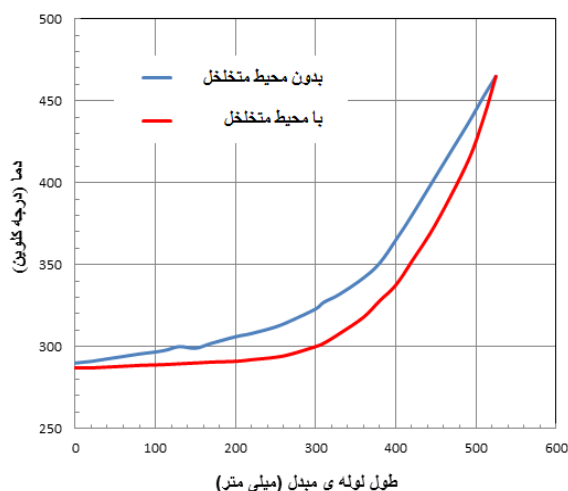
در این مقاله در مرحله اول، یک روش مدل‌سازی عددی برای مدل‌سازی جریان در یک مبدل حرارتی در سیستم CHFS ارائه شد. نتایج عددی با داده‌های تجربی مقایسه شد و درستی مدل‌سازی به خوبی مورد تایید قرار گرفت. در مرحله دوم با استفاده از محیط متخلخل سعی شد، سرعت کاهش دمای محصولات افزایش داده شود. نتایج بدست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

(۱) مشاهده شد، در حالت به کارگیری محیط متخلخل در مبدل، دمای محصولات با توجه به دبی آن ۱۴۰ درجه سلسیوس در طول ۲ ثانیه کاهش می‌یابد که به معنی ۷۰ درجه سلسیوس بر ثانیه است و بدین ترتیب، نرخ انتقال حرارت ۴۰٪ افزایش می‌یابد؛ بنابراین استفاده از محیط متخلخل، تاثیر چشم‌گیری بر خنک‌سازی محصولات دارد که این امر کیفیت بهتر محصولات را تضمین می‌کند.

(۲) با استفاده از محیط متخلخل، می‌توان از مبدلی با طول ۳۵٪ کمتر از مدل قبل برای خنک‌کاری بهره برد؛ چراکه در طول کمتری از مبدل دمای دلخواه محصولات حاصل می‌شود.

(۳) افت فشار در مبدل متخلخل، اندکی بیشتر از حالت بدون محیط متخلخل است و باید مصالحه‌ای بین افزایش انتقال حرارت به اندازه‌ی ۴۰٪ و این افزایش افت فشار مورد نظر قرار بگیرد.

است، می‌توان دریافت که در حالت مبدل با محیط متخلخل، دمای محصولات با توجه به دبی آن، ۱۴۰ درجه سلسیوس در طول ۲ ثانیه کاهش می‌یابد که به معنی ۷۰ درجه سلسیوس بر ثانیه است. انتقال حرارت در ابتدای لوله به شدت افزایش یافته، دمای محصولات در لوله میانی با توجه به انتهای لوله با شتاب بیشتری کاهش را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تغییرات دمای محصولات در طول لوله‌ی مبدل برای حالت بدون وجود و با وجود محیط متخلخل

به این ترتیب مشاهده می‌شود، استفاده از محیط متخلخل با افزایش ۴۰ درصدی در نرخ انتقال حرارت، تاثیر چشم‌گیری بر خنک‌سازی محصولات دارد و این امر کیفیت بهتر محصولات را تضمین می‌کند. همچنین با استفاده از این سیستم می‌توان از مبدلی با طول ۳۵٪ کمتر برای خنک‌کاری بهره برد، زیرا در طول کمتری از مبدل، دمای دلخواه محصولات می‌تواند حاصل شود.

برای بررسی امکان استفاده از محیط متخلخل در مبدل، بررسی افت فشار در لوله آب خنک‌کن نیز اهمیت دارد. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که افت فشار در طول لوله به اندازه اندکی با حالت بدون محیط متخلخل تفاوت دارد و این تفاوت کمتر از ۳۳٪ مقدار فشار ورودی است، بنابراین در مبدل متخلخل، افت فشار نامطلوب زیادی ایجاد نمی‌شود و از این نظر نیز قابل قبول است.

- [10] Cai YM, Christopher JT (2011) Numerical modelling of hydrothermal fluid flow and heat transfer in a tubular heat exchanger under near critical conditions. *J Supercrit Fluid* 57: 236–246
- [11] Jiang P.X, Zhao C.R, Shi R.F (2009) Experimental and numerical study of convection heat transfer of CO₂ at supercritical pressures during cooling in a small vertical tube. *Int J Heat Mass Tran* 52: 4748–4756.
- [12] Licht J, Anderson M, Corradini M (2008) Heat transfer to water at supercritical pressures in a circular and square annular flow geometry. *Int J Heat Fluid Fl* 29: 156–166.
- [13] Nazari M, Kayhani MH, Mohebbi R (2013) Heat transfer enhancement in a channel partially filled with a porous block: lattice Boltzmann method. *Int J Mod Phys C* 24.09.
- [14] Nazari M, Ashouri M, Kayhani MH, Tamayol A (2014) Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid through a pipe filled with metal foam. *Int J Therm Sci* 88: 33–39.
- [15] Cai Y.M, Jing J, Yang Z, Xue Z (2015) Simulation for scale-up of a confined jet mixer for continuous hydrothermal flow synthesis of nanomaterials. *J Supercrit Fluid* 58: 211–222.
- [16] Dittus F.W, Boelter L.M.K (1930) Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. University of California Publication: Engineering 2: 443–461.
- [17] Krasnoshchekov E.A, Petukhov B.S, Protopopov V.S (1961) An investigation of heat transfer to fluids flowing in pipes under supercritical conditions. in: Proceedings of the Second International Heat Transfer Conference, University of Colorado, Boulder, USA, 569–578.
- [18] Jackson J.D, Hall W.B (1979) Forced convection heat transfer to fluids at supercritical pressure. in: Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 2: 563–611.
- [19] Watts MJ, Chou CT (1982) Mixed convection heat transfer to supercritical pressure water. in: Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Munchen, Germany, 495–500.
- [20] Vesna M., Christopher J., Suela K (2015) Imaging the continuous hydrothermal flow synthesis of nanoparticulate CeO₂ at different supercritical water temperatures using in situ angle-dispersive diffraction. *J Supercrit Fluid* 87: 118–128.
- [21] Brett K, Veruscha F (2015) Critical process parameters and their interactions on the continuous hydrothermal synthesis of iron oxide nanoparticles. *Chem Eng J* 281: 312–321.
- [22] Sherif E, Hosam E.M (2015) Synthesis and surface modification of nanophosphorous-based flame retardant agent by continuous flow

۶-علائم

| | |
|-------------------|---------------|
| انتروپی | h |
| انرژی جنبشی آشفته | K |
| فشار | P |
| عدد پرانتل آشفته | Pr_t |
| اتلاف لزجت | S_h |
| دما | T |
| انتروپی | U |
| علائم یونانی | |
| نرخ اتلاف | ε |
| هدایت گرمایی | λ |
| لزجت توربولانسی | μ_t |
| چگالی | ρ |
| تنش صفحه‌ای | τ |

مراجع

- [1] Aimable A, Muhr H (2009) Continuous hydrothermal synthesis of inorganic nanopowders in supercritical water: towards a better control of the process. *Powder Technol* 190: 99–106.
- [2] Bermejo M.D, Cocero M.J (2006) Supercritical water oxidation: a technical review. *AIChE Journal* 52: 3933–3951.
- [3] Moussiere S, Jousot-Dubien P (2007) Modelling of heat transfer and hydrodynamic with two kinetics approaches during supercritical water oxidation proces. *J Supercrit Fluid* 43: 324–332.
- [4] Lester E, Blood P (2006) Reaction engineering: the supercritical water hydrothermal synthesis of nanoparticles. *J Supercrit Fluid* 37: 209–214.
- [5] Darr J.A, Poliakoff M (1999) New directions in inorganic and metal-organic. Coordination chemistry in supercritical fluids. *Chem Rev* 99: 495–541.
- [6] Adschiri T, Kanazawa K (1992) Rapid and continuous hydrothermal synthesis of boehmite particles in sub and supercritical water. *J Am Ceram Soc* 75: 2615–2618.
- [7] Zhou N, Krishnan A, Vogel F (2000) A computational model for supercritical water oxidation of organic toxic wastes. *Adv Environ Res* 4: 79–95.
- [8] Scheidegger AE (1974) The Physics of flow through porous media. Univ. Toronto Press.
- [9] Kaviany M (1995) Principles of heat transfer in porous media. Springer.

- 70: 1040–1049
- [25] Bourantas GC, Skouras ED, Loukopoulos VC (2014) Heat transfer and natural convection of nanofluids. *Euro J Mech-B/Fluids* 43: 45–56
- [26] Wilcox DC (1994) *Turbulent Modeling for CFD*. 2nd edn. California, DCW Industries.
- [27] Jones WP, Launder BE (1972) The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *Int J Heat Mass Tran* 15: 301–314.
- hydrothermal synthesis. *Particuology* 22: 82-88.
- [23] Gheorghe J (2014) The influence of the porous media permeability on the unsteady conjugate forced convection heat transfer from a porous sphere embedded in a porous medium. *Int J Heat Mass Tran*:1124–1132
- [24] Fumei R, Wenhuan Zh, Baochang Sh (2014) Numerical study of heat transfer enhancement in a pipe filled with porous media by axisymmetric TLB model based on GPU. *Int J Heat Mass Tran*