



مدلسازی و تحلیل عددی جریان در بسترهای پرشده از گوی برای خنک‌سازی قلب راکتور گداخت

عطاله ربیعی^{۱*}، امیرحسین کمالی نیا، کمال حداد

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

ناریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ مرداد ۱۳۹۴

بازنگری: ۱۶ اسفند ۱۳۹۴

پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

کانال‌های پرشده از گوی

جسم متخلخل

دینامیک سیالات محاسباتی

جریان آشفته

چکیده: یکی از چالش‌های مهم در راکتورهای گداخت هسته‌ای، برداشت حرارت به کمک کانال‌های انتقال حرارت تعبیه شده می‌باشد. در کار حاضر شبیه‌سازی و تحلیل عددی انتقال حرارت در کانال‌های پرشده از گوی، به‌عنوان راه حلی برای بالا بردن میزان ضریب انتقال حرارت، با استفاده از کد عددی در دسترس مورد بررسی قرار گرفته است. گوی‌های موجود در کانال به‌صورت یک جسم پیوسته متخلخل فرض شده و ضرایب مربوط به جسم متخلخل با استفاده از معادلات ارگون و معادلات بقای مومنتوم حاکم بر جسم متخلخل برای آرایش‌های مختلف گوی‌ها در کانال، به‌دست آمده است. اثر دیواره در شبیه‌سازی جسم متخلخل به کمک مدلی اصلاحی برای مدل آشفستگی $k-\epsilon$ در نظر گرفته شده است. مشاهده شد که شبیه‌سازی عددی به کمک جسم متخلخل در مقایسه با کارهای عددی مرسوم که نیاز به تولید شبکه نامنظم و در عین حال تعداد سلول محاسباتی بالا دارند، می‌تواند با دقت مناسبی پیرامترهای مختلف میدان جریان، اعم از افت فشار و ضریب انتقال حرارت را برای آرایش‌های مختلف گوی در داخل کانال محاسبه نماید. همچنین مشاهده شد با کاهش میزان تخلخل گوی‌های موجود در لوله، مقدار افت فشار و ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا خواهند کرد.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین چالش‌ها در صنایع، انتقال حرارت بهینه به کمک مبدل‌های حرارتی موجود می‌باشد. دفع حرارت توسط مبدل‌های حرارتی مختلف همواره یکی از پژوهش‌های مورد علاقه محققین بوده است. بالا بردن ضریب انتقال حرارت در انواع مختلف مبدل‌های حرارتی با هدف دفع بیشتر گرما بسیار مطلوب می‌باشد. این پژوهش‌ها را می‌توان در صنایع مختلف نیروگاهی و به‌خصوص نیروگاه‌های هسته‌ای به‌وفور مشاهده کرد. یکی از مهمترین مسائل مرتبط با نیروگاه‌های هسته‌ای از نوع گداخت، برداشت حرارت به کمک کانال‌های انتقال حرارت تعبیه شده، از مرکز گداخت هسته‌ای با دو هدف جذب انرژی مورد نیاز، و عدم ایجاد آسیب در تجهیزات می‌باشد. این موضوع سبب شده تا از روش‌های مختلفی جهت خنک‌سازی هرچه بیشتر این بخش از راکتورها استفاده شود. یکی از روش‌های مورد مطالعه در این بخش استفاده از میدان جریان آشفته در کانال پرشده از گوی می‌باشد. آزمایش‌های زیادی توسط محققین، در مراکز تحقیقاتی مختلف انجام گرفته است تا اثربخشی این روش در بهبود انتقال حرارت را مورد بررسی و ارزیابی قرار دهند. کار حاضر به بررسی پیرامترهای جریان، اعم از افت فشار در طول کانال و بهبود ضریب انتقال حرارت کانال‌های پرشده از گوی در آرایش‌های مختلف به کمک شبیه‌سازی تئوری جسم متخلخل پرداخته است.

نائو ستو و همکاران [۱] به صورت تجربی، تاثیر نسبت قطر لوله به قطر

کره (D/d) را بر افت فشار و ضریب انتقال حرارت مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش عدد رینولدز جریان، افت فشار بالاتری در طول کانال ایجاد می‌شود. متناظر با افت فشار، ضریب انتقال حرارت میدان جریان نیز افزایش پیدا خواهد کرد. در موارد مختلف، محققین، آزمایش‌ها و تحلیل‌های مشابهی را انجام داده‌اند که همگی افزایش انتقال حرارت متناظر با عدد رینولدز و افت فشار را تایید می‌کنند. از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های چیپا و همکاران [۲] اشاره کرد که انتقال حرارت در عدد پراتل بالا در کانال‌های پرشده از گوی را مورد توجه قرار داده‌اند. در همین راستا واراهاسمی و فاند [۳] مقدار انتقال حرارت در نسبت‌های مختلف قطر گوی به لوله را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نشان داده شده است با افزایش نسبت قطر لوله به قطر کره (D/d) مقدار افت فشار و ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا خواهد کرد. در مطالعه آزمایشگاهی دیگر، اوکومورا [۴] ساختار جریان و مشخصات انتقال حرارت را برای چیدمان $D/d=2$ ، به کمک سرعت سنجی تصویری ذرات^۱ مورد ارزیابی قرار داده است. شان و همکاران [۵] پیرامترهای مختلف جریان را در حالت‌های مختلف به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. در همین پژوهش، گذر جریان از شرایط جریان آرام به آشفته در بسترهای پرشده از گوی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش مدل $k-\epsilon$ در پیش‌بینی پیرامترهای میدان جریان مطالعه و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. مشاهده شده است که استفاده از چشمه‌های مشخص در معادلات k و ϵ قابلیت معادله آشفستگی را در پیش‌بینی

(کد فلونت) شامل معادلات حاکم بر میدان جریان و نتایج، اشاره می‌شود.

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در مدلسازی میدان جریان از معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس در جسم متخلخل استفاده شده است. در ادامه به معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و روابط مورد نیاز برای مدلسازی میدان جریان و سایر روابط مورد نیاز در این بخش اشاره می‌شود.

• معادله پیوستگی

$$\frac{\partial(\gamma\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

γ بیانگر تخلخل در جسم متخلخل می‌باشد.

• معادله مومنتوم

در حل معادلات مومنتوم کد محاسباتی در دسترس موجود (فلونت) از معادله مومنتوم زیر با اضافه کردن یک عبارت چشمه بهره گرفته است.

$$\frac{\partial(\gamma\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho\vec{g} + S_i \quad (2)$$

S_i بیان‌کننده مقدار چشمه مومنتوم ناشی از قرارگیری جسم متخلخل می‌باشد که می‌توان آن را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{ij}} v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (3)$$

i می‌تواند جهت x یا y یا z باشد. C_{ij} بیانگر ماتریس ضریب اینرسی و α_{ij} بیانگر مقدار نفوذ پذیری و معکوس آن بیانگر ضریب لزجت می‌باشد. ضرایب مرتبط با جسم متخلخل در جهت طولی با استفاده از معادله ارگون [۱۵] در جسم محاسبه شده است. نفوذپذیری و ضریب اینرسی عبارتند از:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\gamma^3}{(1-\gamma)^2} \quad (4)$$

ضریب اینرسی

$$C = \frac{3.5(1-\gamma)}{D_p} \frac{1}{\gamma^3} \quad (5)$$

D_p قطر هیدرولیکی گوی‌ها در آرایش‌های مختلف و γ مقدار تخلخل در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که با توجه به غالب بودن اثر افت فشار در طول کانال (جهت z) مقادیر ضرایب در جهت x و y ناچیز در نظر گرفته شده است.

میدان جریان آشفته افزایش می‌دهد. در همین راستا، گواردو و همکاران [۶]، یانگ و همکاران [۷] و فاند و تیناکاران [۸] مدل‌های مختلف آشفته‌گی را در تحلیل بسترهای پر شده از گوی مورد بررسی قرار داده‌اند. در مطالعات مذکور نشان داده شده است که مدل $k-\epsilon$ با به کار بردن چشمه‌هایی مبتنی بر آزمایش‌ها و فرض ایجاد شبکه‌ای با کیفیت مناسب می‌تواند مدل مناسبی در تحلیل بسترهای پر شده از گوی باشد. در پژوهشی مشابه، بو و همکاران [۹] به دقت، اثرات ماکروسکوپی و محلی جریان در آرایش‌های آرایش‌های مختلف حاکم بر بستر را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش با مطالعه میدان جریان بسترهای پر شده از گوی و با بهره گرفتن از معادله آشفته‌گی $k-\epsilon$ و در نظر گرفتن اثرات دیواره بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار، اصلاحاتی نسبت به مدل آشفته‌گی در نظر گرفته شده است. در همین راستا ناکایاما و همکاران [۱۰] و چاندیس و همکاران [۱۱] اثرات کلی مدل‌های آشفته را در جریان بسترهای متخلخل مورد بررسی قرار داده‌اند. تحلیل‌های انجام گرفته توسط ناکایاما که بر اساس معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس انجام گرفته است تصحیحاتی را برای معادله $k-\epsilon$ در نظر می‌گیرد. نشان داده شده است که با اعمال این تصحیحات دقت حل جریان در کانال، لوله و دسته لوله‌ها، بهبود پیدا می‌کند.

پیچیدگی بالای بسترها در تحلیل عددی، با در نظر گرفتن معادلات حاکم بر جسم متخلخل می‌تواند تا حدود زیادی به ساده‌سازی تحلیل عددی کمک کند. از جمله مطالعاتی که از این روش بهره گرفته است می‌توان به پژوهش انجام گرفته توسط ماسلوواریچ و همکاران [۱۲] اشاره کرد. آنها در پژوهش انجام گرفته شبیه‌سازی دسته‌لوله‌های موجود در ریویولرها را با استفاده از جسم متخلخل به انجام رسانده‌اند. در این پژوهش با استفاده از کد عددی موجود و با در نظر گرفتن روابط موجود، با تقریب بسیار مناسبی، توزیع میدانی کسر حجمی بخار در ریویولر به دست آمده است. مکنیل و همکاران [۱۳] و پزو و همکاران [۱۴] نیز با استفاده از جسم متخلخل شبیه‌سازی نوعی ریویولر را با استفاده از کدهای محاسباتی عددی به انجام رسانده‌اند. تطابق بسیار خوب این شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود و استفاده از روابط ساده و کارآمد در این مقاله به وضوح قابل مشاهده است.

فعالیت‌های صورت گرفته و در عین حال در دسترس موجود نشان می‌دهد که مطالعات محدودی در راستای تحلیل کانال‌های پر شده از گوی به کمک شبیه‌سازی جسم متخلخل انجام گرفته است. لذا در این پژوهش تلاش شده است میدان جریان کانال پر شده از گوی به کمک جسم متخلخل مورد مطالعه قرار گیرد و اثر آرایش‌های مختلف گوی بر پارامترهای میدان جریان اعم از افت فشار و ضرایب انتقال حرارت، مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر است که استفاده از جسم متخلخل به عنوان یک واسطه، برای شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده به عنوان یک راه حل برای رهایی از مشکلات تولید شبکه و همچنین کوتاه کردن زمان محاسبات عددی همواره مورد توجه بوده است. در ادامه به روش انجام کار مدلسازی با کد دینامیک سیالات محاسباتی

• معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma \rho_f E_f + (1-\gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla k_{eff} \left[\nabla T + \left(\frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{\tau} \right) \right] + S_f^h \quad (6)$$

k_{eff} نشان دهنده ضریب هدایت گرمایی معادل در جسم متخلخل می باشد که عبارتست از:

$$k_{eff} = k_f + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \quad (7)$$

k_f ظرفیت گرمایی سیال در فشار ثابت و Pr_t عدد پرانتل آشفته می باشد. μ_t لزجت آشفته است که عبارتست از:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

ρ چگالی سیال و C_μ ثابت در نظر گرفته شده است. k و ε به ترتیب انرژی جنبشی آشفته و نرخ اضمحلال یا اتلاف آشفته می باشند.

بیشتر در مرجع [۱۱] موجود است. مقادیر σ_ε ، σ_k ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{1\varepsilon}$ به عنوان ثابت های معادلات متوسط گیری شده آشفته در نظر گرفته می شوند که به ترتیب برابرند با ۱، ۱/۳، ۱/۴۴، ۱/۹۲.

در معادلات (۸) و (۹)، S_k و S_ε به ترتیب چشمه های معادلات متوسط گیری شده برای معادله انرژی جنبشی آشفته (k) و معادله نرخ اتلاف آشفته (ε) می باشد که به صورت زیر در نظر گرفته شده اند:

$$S_k = \varepsilon_\infty \quad (11)$$

$$S_\varepsilon = c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon_\infty^2}{k_\infty} \quad (12)$$

$$\varepsilon_\infty = 39 \gamma^2 (1-\gamma)^{2.5} \frac{\langle u \rangle_f^3}{D} \quad (13)$$

$$k_\infty = 3.7 \gamma^{1.5} (1-\gamma) \langle u \rangle_f^2 \quad (14)$$

• نحوه محاسبه ضریب انتقال حرارت

جهت محاسبه ی ضرایب انتقال حرارت موضعی در میدان جریان نیاز به دمای متوسط توده سیال در هر مقطع می باشد که با توجه به تک فاز بودن میدان جریان می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$T_b = T_i + (T_o - T_i) \frac{x}{L} \quad (15)$$

T_i دمای ورودی به جسم متخلخل، T_o دمای خروجی از جسم متخلخل و L طول جسم متخلخل می باشد. مقدار ضریب انتقال حرارت با استفاده از معادله انتقال حرارت شار ثابت زیر در هر مقطع محاسبه می شود:

$$h_i = \frac{q}{(T_{wi} - T_b)} \quad (16)$$

مقدار ضریب انتقال حرارت متوسط کانال های پر شده از گوی در آرایش های مختلف بر مبنای سرعت های ورودی مختلف از میانگین ضرایب انتقال حرارت نقطه ای تعیین می شود.

مقدار تخلخل (γ) با استفاده از معادلات زیر برای نسبت های مختلف قطر لوله به قطر کره (D/d) محاسبه شد [۵]:

الف- $D/d \geq 2/0.33$

$$\gamma = \frac{0.151}{\left(\frac{D}{d}\right) - 1} + 0.36 \quad (17)$$

ب- $2/0.33 \leq D/d \leq 2/0.33$

$$\gamma = -0.6649 \left(\frac{D}{d}\right) + 1.8578 \quad (18)$$

• توصیفی از مدل آشفته در میدان جریان

در مدلسازی جریان آشفته در کدهای محاسباتی موجود، تحلیل مسائل با این فرض انجام می شود که دیواره های جسم متخلخل تأثیری بر نرخ تولید انرژی جنبشی جریان متلاطم ندارد. این موضوع در مسائلی می تواند صحیح باشد که نفوذ پذیری در جسم متخلخل بالا یا سرعت جریان بسیار پایین باشد. در نتیجه در مسئله حاضر با توجه به بالا نبودن مقدار تخلخل و قابل توجه بودن مقدار سرعت در تمام حالات در نظر گرفته شده، از معادلات مفروض آشفته بدون در نظر گرفتن اصلاحات در شرایط جریان آشفته نمی توان بهره جست. ناکایاما و همکاران [۱۱] مدلی را با کمک متوسط گیری معادلات موجود برای انرژی جنبشی جریان آشفته و نرخ اتلاف جریان آشفته با ارائه معادلات اصلاحی شامل تولید انرژی جنبشی جریان آشفته و تولید نرخ اتلاف ارائه کردند. این مدل به صورت بسیار مناسب، مشکل کدهای محاسباتی موجود را مرتفع می کند. معادلات حاکم بر میدان جریان آشفته با توجه به مدل k-ε به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\gamma \frac{\partial \langle k \rangle_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\gamma \langle \bar{u}_j \rangle_f \langle k \rangle_f \right) = 2\gamma \vartheta_i \langle s_{\bar{u}_i} \rangle_f \langle s_{\bar{u}_i} \rangle_f + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\vartheta + \frac{\vartheta_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \gamma \langle k \rangle_f}{\partial x_j} \right] - \gamma \langle \varepsilon \rangle_f + \gamma \varepsilon \quad (9)$$

$$\gamma \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\gamma \langle \bar{u}_j \rangle_f \langle \varepsilon \rangle_f \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\vartheta + \frac{\vartheta_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \gamma \langle \varepsilon \rangle_f}{\partial x_j} \right] + \gamma \left(2c_{1\varepsilon} \vartheta_{(u),(u)} - c_{2\varepsilon} \langle \varepsilon \rangle_f \right) \frac{\langle \varepsilon \rangle_f}{\langle k \rangle_f} + \gamma \varepsilon \quad (10)$$

در این معادلات ϑ لزجت دینامیکی جریان آشفته در نظر گرفته شده است و $\langle \rangle$ نشان دهنده متوسط حجمی پارامتر مورد نظر می باشد. جزئیات

$$D/d \leq 1/866$$

$$\gamma = 1 - \frac{2}{3 \left(\frac{d}{D}\right)^3} \sqrt{\left(\frac{2d}{D}\right) - 1} \quad (19)$$

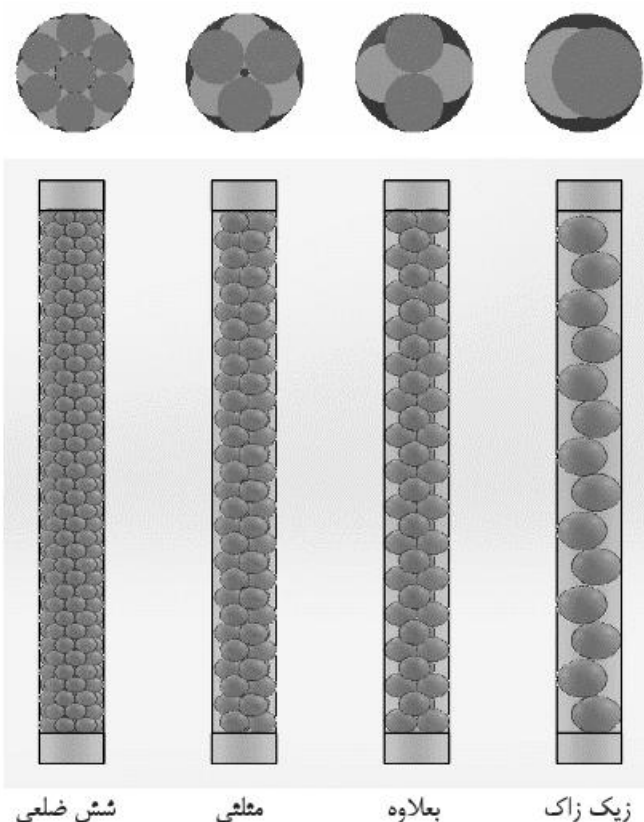


Fig. 1. Sphere arrangements in channel

شکل ۱: آرایش گوی‌ها در کانال

جدول ۲: مشخصات سیال کاری

Table 2. Working fluid characteristics

C_p [kJ/(kg.K)]	k [W/(m.K)]	μ [Pa.s]	ρ [kg/m ³]
۴/۱۷۸	۰/۶۰۳	۷/۹۷e-۴	۹۹۵/۷

۳- نتایج

جهت مدلسازی میدان جریان به کمک تئوری جسم متخلخل از یک شبکه نسبتاً ساده در لوله‌ای با هندسه مشخص استفاده شده است. با توجه به اهمیت شرایط مرزی در اینگونه تحلیل‌ها شکل ۲ به‌عنوان توصیفی از شرایط مرزی مورد استفاده قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است که در ورودی، از شرط ورودی سرعت^۲ و در خروجی از شرط فشارخروجی^۳ استفاده شده است. دیواره نیز با فرض عدم لغزش و شار یکنواخت در نظر گرفته شده است.

شکل ۳ مطالعه شبکه انجام شده در تحلیل حاضر برای مقادیر ضریب انتقال حرارت در آرایش معلقی در عدد رینولدز ۱۴۰۰۰ در تعداد شبکه‌های متفاوت را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که با افزایش تعداد سلول‌های شبکه، ضریب انتقال حرارت موضعی که حساسیت بیشتری نسبت به سایر

• شرح مسئله

این شبیه‌سازی بر مبنای آزمایش‌های انجام‌گرفته توسط نانو ستو و همکاران [۱] با هدف اندازه‌گیری آزمایشگاهی افت فشار کانال‌های پر شده از گوی در شرایط رینولدزی از ۲۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ انجام گرفته است. جدول ۱ و شکل ۱ انواع آرایش‌های مختلف گوی‌ها در کانال را ارائه می‌کند.

جدول ۱: انواع آرایش گوی‌ها در کانال

Table 1. Sphere arrangements in the channel

D/d	نوع آرایش	ردیف
۱/۳	زیک زاگ	۱
۲	بعلاوه	۲
۲/۲	معلقی	۳
۳	شش ضلعی	۴

در این تحلیل جسم متخلخل با طول ۶۰ سانتی‌متر در کانالی با طول ۶۷ سانتی‌متر و قطر ۵۶ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که روش کلی حل عددی انجام‌گرفته در این پژوهش از نوع حجم محدود و به‌صورت پایا است. معیار حل بر اساس مقدار همگرایی معادلات پیوستگی، سرعت و انرژی و متناسب با معیار ۱۰^{-۵} می‌باشد. به منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم بر میدان جریان از روش سیمپل^۱ استفاده شده و برای جداسازی جملات پخش و جابه‌جایی معادلات از روش مجزاسازی بالادست مرتبه اول بهره‌برده شده است. استفاده از میانبایی خطی برای محاسبه فشار روی دیواره هر سلول محاسباتی همگرایی بهتری را ارائه می‌کند.

شبکه مورد استفاده در این شبیه‌سازی عددی با توجه به استفاده از شبیه‌سازی عددی به کمک جسم متخلخل پیوسته به جای گوی، برای تمام آرایش‌ها یکسان می‌باشد. شبکه موجود از نوع سه‌بعدی بوده که از تعداد سلول محاسباتی در مرتبه کمتر از ۱۰۰۰۰۰ تشکیل شده است. لازم به ذکر است که اگر از تئوری جسم متخلخل برای شبیه‌سازی استفاده نشود می‌بایست از میزان تعداد سلول محاسباتی در مرتبه میلیون استفاده کرد که در این زمینه می‌توان به مرجع [۱۶] اشاره کرد.

در این تحلیل از آب در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد به‌عنوان سیال کاری استفاده شده است. جدول ۲ مشخصات سیال کاری استفاده شده را نشان می‌دهد.

2 Velocity Inlet
3 Pressure Outlet

1 Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIM-
PLE)

قدری انحراف از داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌شود. لازم به ذکر است که در شکل‌های یادشده تغییرات عدد ناسلت لوله ساده بدون گوی نیز نشان داده شده است. دیده می‌شود که حضور گوی در میدان جریان باعث افزایش عدد ناسلت، به‌طور متوسط ۵ برابر می‌شود.

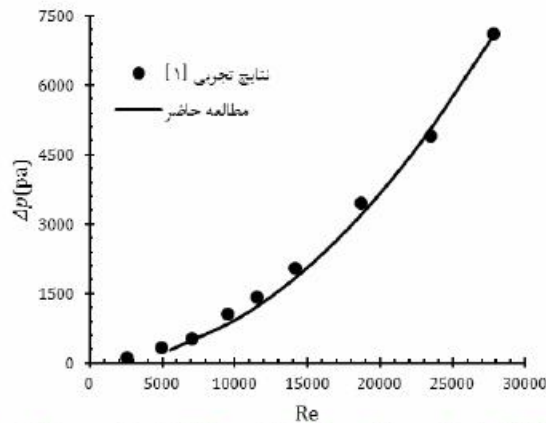


Fig. 4. Pressure loss in different inlet Reynolds number in ZigZac arrangement

شکل ۴: تغییرات افت فشار بر حسب رینولدز ورودی در آرایش زیگ زاک

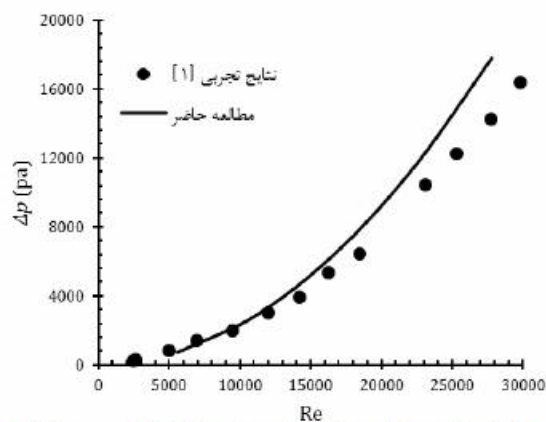


Fig. 5. Pressure loss in different inlet Reynolds number in Plus arrangement

شکل ۵: تغییرات افت فشار بر حسب رینولدز ورودی در آرایش بعلاوه

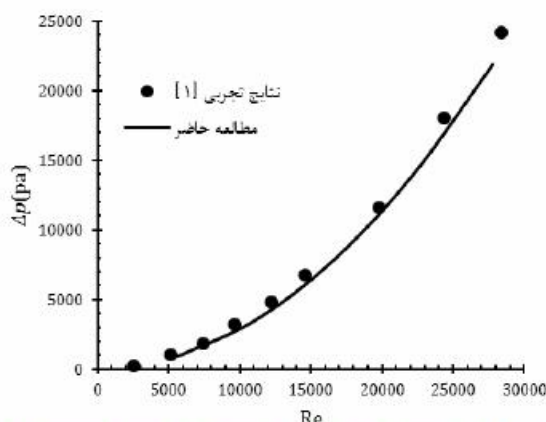


Fig. 6. Pressure loss in different inlet Reynolds number in Triangle arrangement

شکل ۶: تغییرات افت فشار بر حسب رینولدز ورودی در آرایش مثلثی

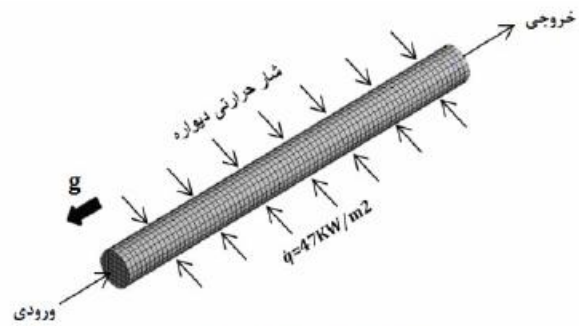


Fig. 2. Geometry overview

شکل ۲: شمای کلی هندسه

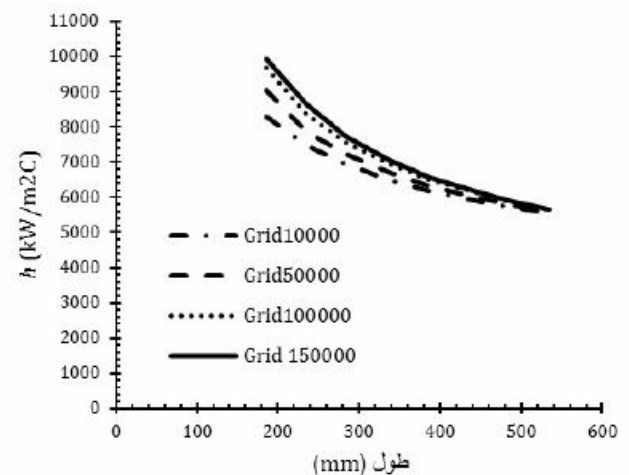


Fig. 3. Study of the grid independency within local heat transfer coefficient

شکل ۳: بررسی استقلال شبکه به کمک ضریب انتقال حرارت موضعی

پارامترهای میدانی دارد به هم نزدیکتر و با حرکت در امتداد جریان بر روی هم قرار گرفته‌اند. میزان Y^+ در اولین سلول نزدیک دیواره در بازه ۳۰ تا ۸۰ قرار دارد که خود بیانگر نوع شبکه مناسب در این تحلیل می‌باشد.

شکل‌های ۴ الی ۷ توصیفی از روند افت فشار با افزایش عدد رینولدز را برای آرایش‌های مختلف نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که در آرایش‌های زیگ زاکی، مثلثی و شش ضلعی، افت فشار با افزایش عدد رینولدز به‌خوبی با نتایج آزمایشگاهی موجود مطابقت دارد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در آرایش بعلاوه، نسبت به سایر آرایش‌های یادشده، با افزایش عدد رینولدز، افت فشار، کمی از نتایج آزمایشگاهی فاصله گرفته است. مقایسه نتایج تغییرات افت فشار در آرایش‌های مختلف گوی در کانال نشان می‌دهد که میزان افت فشار در آرایش شش ضلعی دارای بیشترین مقدار و در آرایش زیگ زاکی کمترین مقدار می‌باشد.

شکل‌های ۸ تا ۱۱، توصیفی از روند تغییرات عدد ناسلت متوسط کانال را بر حسب عدد رینولدز معادل برای آرایش‌های مختلف نشان می‌دهند. متوسط ضرایب انتقال حرارت به‌دست‌آمده در آرایش‌های زیگ‌زاکی، بعلاوه و مثلثی به‌خوبی با نتایج آزمایشگاهی موجود مطابقت می‌کند. مقدار عدد ناسلت به‌دست‌آمده برای آرایش شش ضلعی با بالا رفتن سرعت ورودی با

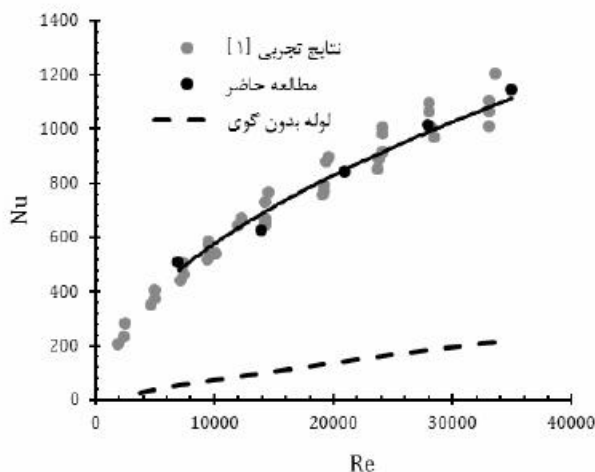


Fig. 10. Nusselt Number in different inlet Reynolds number in Triangle arrangement

شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز ورودی در آرایش مثلثی

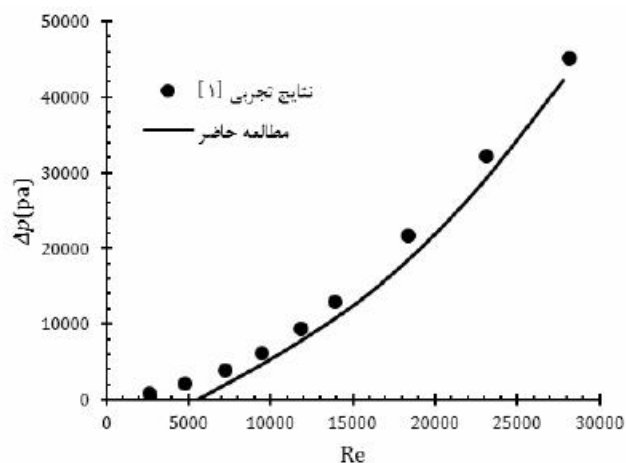


Fig. 7. Pressure loss in different inlet Reynolds number in Hexagonal arrangement

شکل ۷: تغییرات افت فشار بر حسب رینولدز ورودی در آرایش شش ضلعی

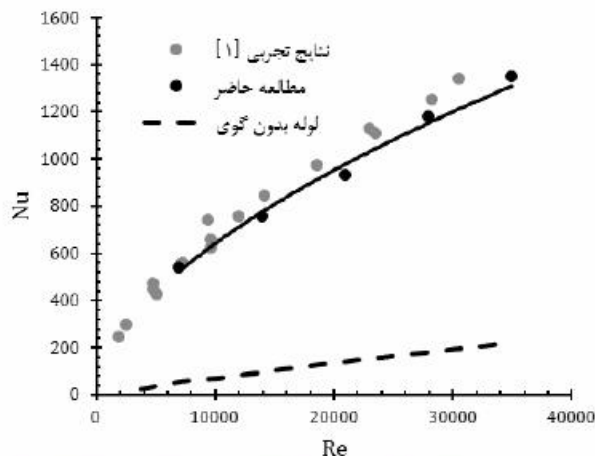


Fig. 11. Nusselt Number in different inlet Reynolds number in Hexagonal arrangement

شکل ۱۱: تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز ورودی در آرایش شش ضلعی

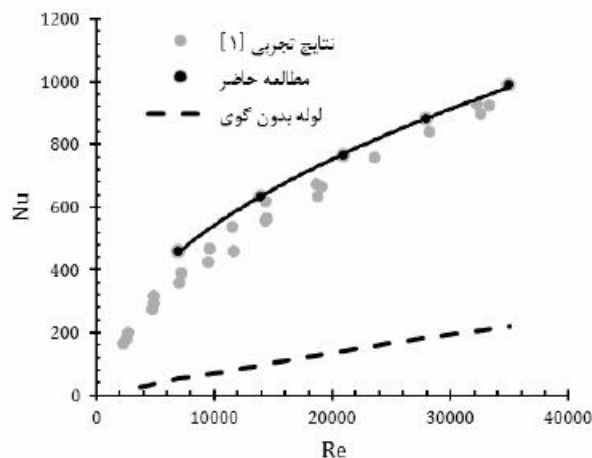


Fig. 8. Nusselt Number in different inlet Reynolds number in ZicZac arrangement

شکل ۸: تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز ورودی در آرایش زیگ زاگ

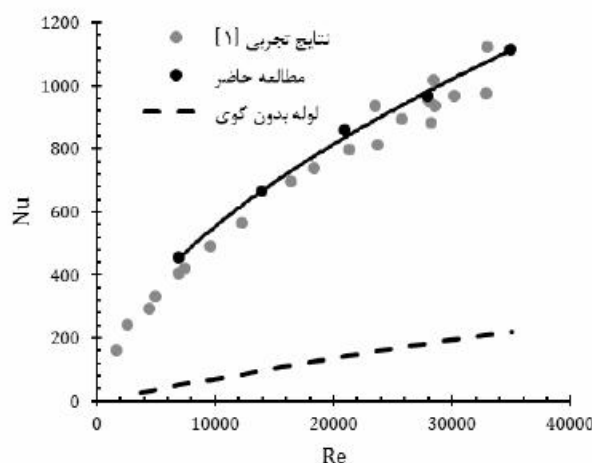


Fig. 9. Nusselt Number in different inlet Reynolds number in Plus arrangement

شکل ۹: تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز ورودی در آرایش بعلاوه

شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب توصیفی از روند تغییرات عدد ناسلت و همچنین افت فشار متوسط بر حسب عدد رینولدز در آرایش‌های مختلف گوی را به طور یکجا نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود، هر دو پارامتر ناسلت و افت فشار با کاهش مقدار تخلخل و در حقیقت محدودتر شدن فضای موجود برای جریان سیال در لوله‌های مبدل حرارتی به ترتیب در آرایش‌های شش ضلعی، مثلثی، بعلاوه و زیگ‌زاکی غالب می‌باشند.

با توجه به نتایج ذکر شده و مد نظر داشتن نیاز به دفع حرارت بالا در راکتورهای گداخت به دلیل شارهای حرارتی بسیار بالا، اهمیت روش حاضر جهت نیل به هدف ذکر شده را نشان می‌دهد. افزایش قابل ملاحظه عدد ناسلت در شکل‌های ۸ تا ۱۱ به وضوح عملکرد روش لوله‌های پر شده از گوی نسبت به لوله‌های ساده را نمایش می‌دهد. شکل ۱۵ درصد نرخ کاهش

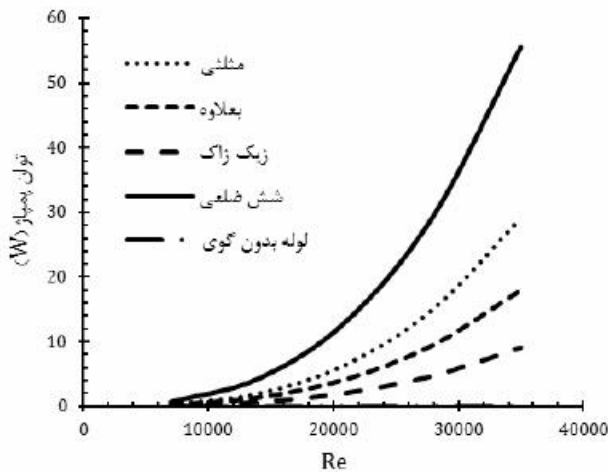


Fig. 14. Pumping Power in different Reynolds Number in various arrangement

شکل ۱۴: تغییرات توان پمپاژ بر حسب عدد رینولدز در آرایش‌های مختلف

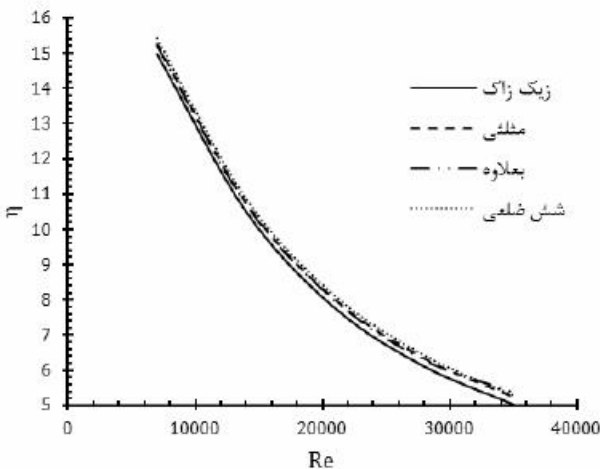


Fig. 15. Temperature loss ratio in different Reynolds Number in various arrangement

شکل ۱۵: تغییرات درصد ترخ افت دما بر حسب عدد رینولدز در آرایش‌های مختلف

در انتها در کنار نتایج عددی ارائه شده برای بررسی تاثیر گوی‌ها در میدان انتقال حرارت مقایسه‌ای بین مطالعه حاضر با در نظر گرفتن تئوری جسم متخلخل و همچنین شرایطی که از این تئوری استفاده نشود، صورت پذیرفته است. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ بیان‌کننده مقایسه مطالعه حاضر و مطالعه نظیفی فرد و همکاران [۱۶] در شرایط بدون فرض جسم متخلخل برای آرایش بعلاوه می‌باشند. لازم به ذکر است در صورتی که از تئوری جسم متخلخل برای تحلیل میدان جریان کانال پر شده از گوی استفاده نشود، نیاز به استفاده از سلول‌های محاسباتی نسبتاً بالا (مرتبه میلیون سلول محاسباتی) و در عین حال غیر سازمان‌یافته^۱ در مقایسه با تعداد سلول محاسباتی کم در روش استفاده از تئوری جسم متخلخل می‌باشد. قابل ذکر است که نتایج به‌دست آمده در کار عددی حاضر در مقایسه با نتایج به‌دست آمده بدون فرض تخلخل از تقریب بهتری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است.

متوسط دمای دیواره نسبت به متوسط دمای دیواره لوله ساده (بدون به کار بردن گوی) برای آرایش‌های مختلف را نشان می‌دهد. که این مقدار به‌صورت زیر در هر مقطع تعریف شده است:

$$\eta = \frac{T_i - T_{st}}{T_i} \times 100 \quad (20)$$

در این رابطه دمای دیواره لوله ساده و T_i دمای دیواره لوله حاوی گوی می‌باشد.

همانطور که دیده می‌شود استفاده از گوی‌ها مابین ۵ تا ۱۶ درصد در رینولدزهای متفاوت باعث خنک‌تر شدن نسبی دمای دیواره کانال نسبت به کانال بدون گوی شده است. با در نظر گرفتن نتایج به‌دست آمده ذکر این نکته لازم است که وجود هر گونه سد در برابر جریان می‌تواند باعث بالا رفتن مقدار افت فشار و در نتیجه توان بیشتر برای پمپاژ سیال شود که باید به‌عنوان هزینه اجرای طراحی مورد ارزیابی قرار گیرد.

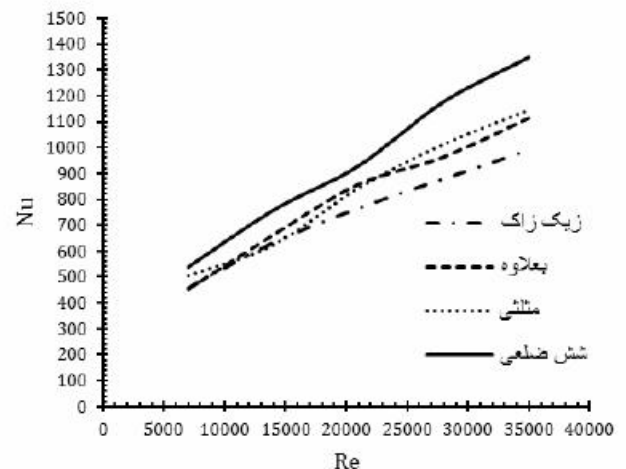


Fig. 12. Nusselt Number in different Reynolds number in various arrangement

شکل ۱۲: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در آرایش‌های مختلف

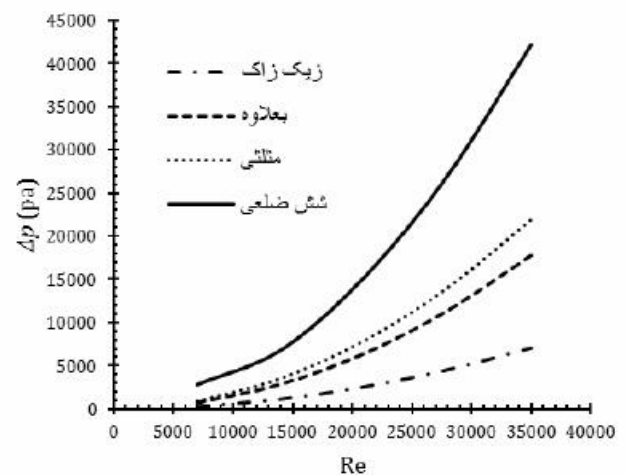


Fig. 13. Pressure loss in different Reynolds number in various arrangement

شکل ۱۳: تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز در آرایش‌های مختلف

1 Unstructured Grid

شار حرارتی بالا، می‌تواند بین ۵ تا ۱۶ درصد در رینولدزهای متفاوت باعث خنک‌تر شدن نسبی دمای دیواره کانال نسبت به کانال بدون گوی شود. با در نظر گرفتن نتایج به‌دست‌آمده ذکر این نکته لازم است که وجود هر گونه سد در برابر جریان می‌تواند باعث بالا رفتن مقدار افت فشار و در نتیجه توان بیشتر برای پمپاژ سیال شود که باید به‌عنوان هزینه اجرای طراحی مورد توجه قرار گیرد. در نهایت ذکر این نکته حائز اهمیت است که کار عددی حاضر در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده بدون فرض تخلخل، نشان می‌دهد که با توجه به تعداد سلول محاسباتی کم (از مرتبه ده‌ها هزار) در استفاده از تئوری جسم متخلخل، در کنار کیفیت بالای شبکه قابل تولید در مقابل تعداد سلول محاسباتی از مرتبه میلیون، پارامترهای میدانی را با تقریب بهتری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند.

منابع

- [1] Seto, N., K. Yuki, H. Hashizume and A. Sagara, "Heat Transfer Enhancement in Sphere-Packed Pipes under High Reynolds Number Condition", *Fusion Engineering and Design*, October (2008): 1102-1107.
- [2] Chiba, S., M. Omae, K. Yuki, H. Hashizume, S. Toda and A. Sagara, "Experimental Research on Molten Salt Thermofluid Technology Using a High-Temperature Molten Salt Loop Applied for a Fusion Reactor Flibe Blanket", *Fusion Engineering and Design*, 2002.
- [3] Varahasamy, M. and R.M. Fand, "Heat Transfer by Forced Convection with Porous Media whose Matrices are Composed of Spheres", *Heat mass transfer*, (1996): 3931-3947.
- [4] Okumura, M., K. Yuki, H. Hashizume and A. Sagara, "Evaluation of Flow Structure in Packed-Bed Tube by Visualizing Experiment", *Fusion science Technology*, (2005): 1089-1093.
- [5] Bu, S., J. Yang, Q. Dong and Q. Wang, "Experimental study of flow transitions in structured packed beds of spheres with electrochemical technique", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60 (2015): 106-114.
- [6] Guardo, A., M. Coussirat, M.A. Larrayoz, F. Recasens and E. Egusquiza, "Influence of the turbulence model in CFD modeling of wall-to-fluid heat transfer in packed beds", *Chemical Engineering Science*, 60 (2005): 1733 - 1742.
- [7] Guardo, A., M. Coussirat, M.A. Larrayoz, F. Recasens and E. Egusquiza, "Influence of the turbulence model in CFD modeling of wall-to-fluid heat transfer in packed beds", *Chemical Engineering Science*, 60 (2005): 1733 - 1742.
- [8] Fand, R. M. and R. Thinakaran, "The Influence of the Wall on Flow Through Pipes Packed With Spheres",

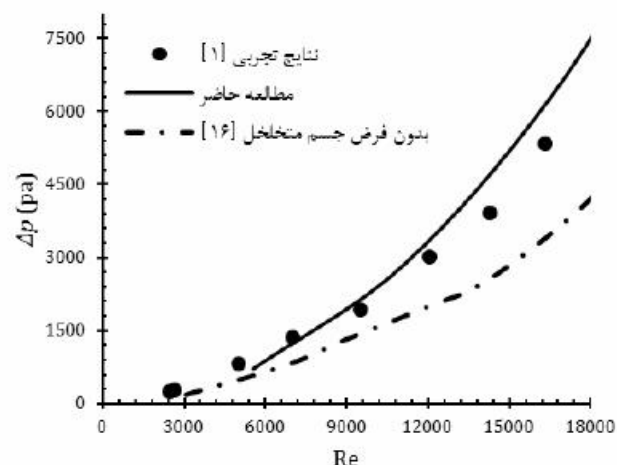


Fig. 16. Comparison of the pressure loss in different Reynolds number

شکل ۱۶: مقایسه تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز

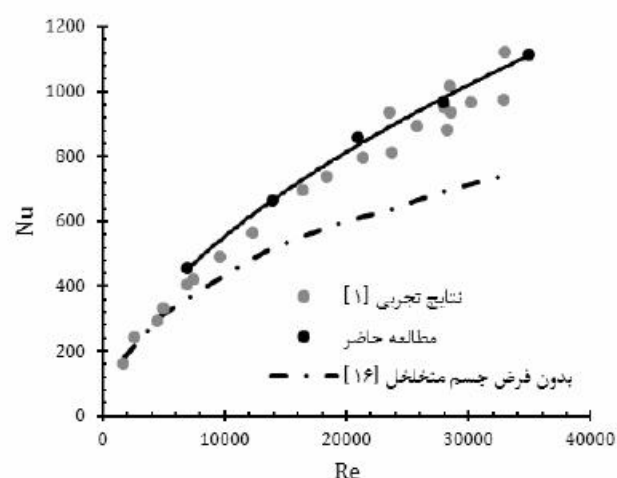


Fig. 17. Comparison of the Nusselt number in different Reynolds number

شکل ۱۷: مقایسه تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدز

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی میدان جریان به کمک جسم متخلخل برای کانال‌های پر شده از گوی با آرایش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج عددی کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان می‌دهد که با کاهش ضریب تخلخل، افت فشار و ضریب انتقال حرارت دیواره همزمان افزایش می‌یابد.

مشاهده شد که در تمام الگوهای یادشده میزان ضریب انتقال حرارت متوسط با افزایش سرعت یا عدد رینولدز به‌طور منطقی روند افزایشی به خود گرفته است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای ضرایب انتقال حرارت به ازای اعداد رینولدز مختلف برای آرایش‌های گوناگون گوی نشان می‌دهد که میزان ضریب انتقال حرارت در کانال پر شده از گوی در آرایش شش‌ضلعی دارای بیشترین مقدار و در آرایش یک‌زاک دارای کمترین مقدار می‌باشد. شایان ذکر است که استفاده از آرایش‌های مختلف گوی در داخل کانال تحت

- [13] Maslovacic, B., V. D. Stevanovic and S. Milivojevic, "Numerical simulation of two-dimensional kettle reboiler shell side thermal-hydraulics with swell level and liquid mass inventory prediction", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75 (2014): 109-121.
- [14] Pezo, M., V. Stevanovic and Z. Stevanovic, "A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (2006): 1214-1224.
- [15] Vafai, K., "Handbook of porous media", Second Edition, Taylor & Francis, 39-78, 2005.
- [16] Naziffard, M., M.R. Nematollahi and Y. Suh, "Augmented Heat Transport of Mono-Sized Sphere-Packed Pipe for Force Free Helical Reactor", *Transaction of Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, October, 2012.
- Heat mass transfer*, 112 (1990).
- [9] Bua, S.S., J. Yanga, M. Zhoua, S.Y. Lia, Q.W. Wanga and Z.X. Guob, "On contact point modifications for forced convective heat transfer analysis in a structured packed bed of spheres", *Nuclear Engineering and Design*, 270.15 (2014): 21-33.
- [10] Nakayama, A. and F. Kuwahara, "Turbulence Model for Flows in Packed Beds, Channels, Pipes, and Rod Bundles", *Journal of Fluids Engineering*, 130 (2008).
- [11] Chandesris, M., G. Serre and P. Sagaut, "A macroscopic turbulence model for flow in porous media suited for channel, pipe and rod bundle flows", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (2006): 2739-2750.
- [12] McNeil, D.A., K. Barmardouf, B.M. Burnside and M. Almehaal, "Investigation of flow phenomena in a kettle reboiler", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53 (2010): 836-848.

Please cite this article using:

A. Rabiee, A. H. Kamalinia, K. Hadad, "Modeling and Numerical Analysis of Sphere Packed Beds for Cooling a Fusion Reactor Core", *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 127-136.
DOI: 10.22060/mej.2016.714

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



