

# شبیه‌سازی عددی جریان جابه‌جایی اجباری آشفته درون یک لوله پهن شده با به‌کارگیری ماده متخلخل در دو آرایش مرزی و مرکزی

محمد طیبی رهنی<sup>۱</sup>      مرتضی خیاط<sup>۲</sup> و رضا علی‌عباسی<sup>۳</sup>  
گروه مهندسی هوافضا      گروه مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی شریف      دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات  
(تاریخ دریافت: ۹۰/۱۰/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۳/۲۷)

## چکیده

در این مطالعه، مقایسه و بررسی جریان و نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری آشفته درون یک لوله از نوع پهن شده، که ماده متخلخل به‌طور جزئی یا کامل در دو آرایش متفاوت مرکزی و مرزی قرار گرفته، به‌صورت عددی و در حالت سه‌بعدی، مورد نظر است. شرط مرزی حاکم بر دیواره لوله، ثابت بودن دما می‌باشد. همچنین اثر ضخامت ماده متخلخل و نفوذپذیری، بر نرخ انتقال حرارت و افت فشار، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که در آرایش مرکزی، با افزایش ضخامت ماده متخلخل تا میزان مشخصی، انتقال حرارت افزایش و سپس کاهش یافته ولی در آرایش مرزی با افزایش ضخامت ماده متخلخل تا مقدار مشخص، انتقال حرارت کاهش و سپس افزایش می‌یابد تا اینکه در حالت کاملاً پر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. پس می‌توان از آرایش مرکزی به‌منظور افزایش انتقال حرارت و از آرایش مرزی به‌عنوان عایق استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** ماده متخلخل، جابه‌جایی اجباری، جریان آشفته، لوله پهن شده، شرط دمای ثابت

## Numerical Simulation of Forced Convection Flow through a Flattened Pipe Using Porous Material in the Central and Boundary Arrangement

M. Taeibi-Rahni

Aerospace Eng. Dep't  
Sharif Univ. of Tech.

M. Khayat and R. Aliabbasi

Mech. Eng. Dep't  
Islamic Azad Univ., Sci. and Research Branch

(Received: 15 January, 2012; Accepted: 16 June, 2012)

## ABSTRACT

In this work, three-dimensional turbulent forced convection flow through a flattened pipe, partially and completely filled with a porous material, was investigated numerically. Here, the effects of permeability and thickness of the porous layer on the rate of heat transfer and pressure drop were investigated. For this purpose, porous material was inserted in two geometrical arrangements: central and boundary. Also, the pipe had constant-temperature condition. The results for central arrangement show that the rate of heat transfer first increases and then decreases with increasing the thickness of the porous layer, while the pressure drop is monotonically increasing. While for the porous medium boundary arrangement, the rate of heat transfer first decreases and then increases with increasing the thickness of the porous layer. Also the maximum of Nusselt number is occurred for the fully porous pipe configuration.

**Keywords:** Porous Media, Forced Convection, Turbulent Flow, Flattened Tube, Constant Temperature Condition

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): taeibi@sharif.edu

۲- استادیار: mkhayat@srbiau.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد: abbasi.65@gmail.com

## فهرست علائم

$C_2$	مقاومت اینرسی، $1/m$
$Da = \alpha / H^2$	عدد دارسی
$D_H$	قطر هیدرولیکی، $m$
$d_p$	قطر ذرات، $m$
$h$	ضخامت ماده متخلخل، $m$
$H$	ضخامت لوله، $m$
$h_p = h/H$	نسبت ضخامت ماده متخلخل به ضخامت لوله
$p$	فشار، $pa$
$Re = (\rho u_{in} D_H) / \mu$	عدد رینولدز
$u$	سرعت طولی، $m/s$
$y$	مختصه عرضی، $m$
$z$	مختصه طولی در امتداد کانال، $m$
$P^* = \Delta p / \rho u_{in}^2$	افت فشار بدون بعد

## علائم یونانی

$\gamma$	ضریب تخلخل
$\alpha$	نفوذپذیری، $m^2$
$1/\alpha$	مقاومت ویسکوز، $1/m^2$

## ۱- مقدمه

در زمینه انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در کانال‌هایی که ماده متخلخل درون آنها قرار گرفته، تحقیقات متعددی انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به حل عددی جریان توسعه یافته و جابه‌جایی اجباری در یک کانال با صفحات موازی که به صورت جزئی با ماده متخلخل پر شده است، توسط چانگ و چن<sup>۱</sup> [۱]، حل گذرای جریان غیر قابل تراکم از میان بستر متخلخل توسط وفایی و امیری [۲]، حل متخلخل توسط وفایی و مارافی [۳]، بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت در مبدل‌های گرمایی مجهز به ماده متخلخل توسط بوقدان<sup>۲</sup> و همکارانش [۴]، حل عددی انتقال حرارت درون یک لوله یا کانال که ماده متخلخل در مرکز لوله قرار

می‌گیرد، توسط محمد و همکارانش [۵]، حل عددی انتقال حرارت و جریان آشفته در درون یک لوله دایروی که با مواد متخلخل پر شده است، توسط یانگ و هانگ<sup>۳</sup> [۶]، بررسی عددی و تجربی میزان افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان مرکزی با قرار دادن ماده متخلخل در لوله دایروی توسط هانگ و همکارانش [۷]، پیشنهاد یک مدل جدید برای مدل‌سازی جریان آشفته و انتقال حرارت در محیط متخلخل توسط آقایان سیتو و دیلموس<sup>۴</sup> [۸]، حل عددی جریان سیال و انتقال حرارت در یک کانال که تعدادی بلوک متخلخل به صورت شطرنجی در آن قرار دارد، توسط لی<sup>۵</sup> و همکاران [۹]، حل عددی جریان آشفته در یک کانال که با ماده متخلخل پر شده است، با در نظر گرفتن شرط پرش تنش برشی در فصل مشترک ناحیه تمیز و متخلخل توسط سیلوا و دیلموس<sup>۶</sup> [۱۰] اشاره کرد. ایشان جریان سیال و انتقال حرارت بین دو صفحه موازی را که ماده متخلخل با ضخامت‌های مختلف در وسط دو صفحه قرار داده شده، به صورت دوبعدی بررسی کرده‌اند. تفاوت این تحقیق با کار ایشان عمدتاً در نوع هندسه مسئله است، به این صورت که هندسه مسئله مورد بررسی در این تحقیق سه‌بعدی می‌باشد که به واقعیت نزدیک‌تر است.

مطالعه حاضر شامل شبیه‌سازی عددی جریان آشفته و انتقال حرارت درون لوله پهن شده است که ماده متخلخل با ضخامت‌های مختلف در دو آرایش مرزی و مرکزی درون لوله قرار داده می‌شود و جدار لوله در دمای ثابتی نگه داشته می‌شود. در این تحقیق اثر نفوذپذیری و ضخامت ماده متخلخل بر روی میزان انتقال حرارت و افت فشار جریان سیال مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که یکی از کاربردهای لوله‌های پهن شده در رادیاتور خودروهای سواری به منظور خنک کاری موتور می‌باشد.

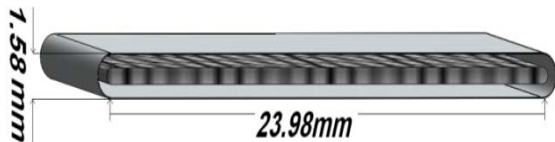
## ۲- تعریف مسئله و شرایط مرزی

طرحواره مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است. طول لوله ۰/۶ متر بوده و جنس آن از آلومینیوم می‌باشد. ماده متخلخل با ضخامت‌های مختلف در مرکز این کانال قرار داده می‌شود.

3- Yang and Hwang  
4- Saito and De Lemos  
5- Li  
6- Silva and De Lemos

1- Jang and Chen  
2- Bogdan

معادلات ناویر- استوکس<sup>۲</sup> به‌دست می‌آید. در این تحقیق، جریان سه‌بعدی، آشفته و دائم در نظر گرفته شده و از انتقال حرارت تشعشعی و جابه‌جایی طبیعی صرف‌نظر شده است. همچنین، ماده متخلخل صلب فرض شده است.



شکل (۱): هندسه مسئله، شماتیک لوله پهن شده با آرایش مرکزی ماده متخلخل.

با فرض تخلخل همگن و جریان تک فازی، معادلات حاکم عبارت است از:

- معادله پیوستگی ماکروسکوپی:

$$\nabla \cdot (\gamma \rho \vec{v}) = 0. \quad (1)$$

- معادله مومنتوم برای سیال در محیط متخلخل [۱۱]:

$$\nabla \cdot (\gamma \rho \vec{v} \vec{v}) = -\gamma \nabla P + \nabla \cdot (\gamma \vec{\tau}) + \gamma \vec{B}_f - \left( \frac{\mu}{\alpha} + \frac{C_2 \rho}{2} |\vec{v}| \right) \vec{v}. \quad (2)$$

در این معادلات،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال،  $\gamma$  ضریب تخلخل و  $\alpha$  نفوذپذیری ماده متخلخل است. دو ترم آخر در معادله مومنتوم، نشانگر نیروهای درگ لزجی و اینرسی وارد بر واحد حجم سیال در اثر وجود ماده متخلخل می‌باشند. همچنین ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل ( $\alpha$ ) و مقاومت

اینرسی ( $C_2$ ) از (۳) و (۴) به‌دست می‌آیند [۱۱].

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

$$C_2 = \frac{3.5}{\sqrt{150\alpha} \cdot \gamma^{3/2}}. \quad (4)$$

در این معادلات،  $d_p$  قطر ذرات تشکیل دهنده ماده متخلخل می‌باشد.

- معادلات ماکروسکوپی برای  $k$  و  $\varepsilon$ :

انرژی جنبشی توربولانس یعنی  $k$  و نرخ اتلاف آن یعنی  $\varepsilon$  از معادلات انتقال (۵) و (۶) به‌دست می‌آیند [۱۱].

خواص سیال در طول لوله و در داخل ناحیه تمیز و ناحیه متخلخل ثابت فرض می‌شود. سیال با دبی ۲۵۰ لیتر بر ساعت، رینولدز حدود ۵۰۰۰ و دمای ثابت ۳۰۰ کلوین وارد لوله می‌شود. برای مدل‌سازی و شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی، از نرم‌افزار گمبیت<sup>۱</sup> استفاده شده است. شرایط مرزی تعریف شده برای کانال‌های مورد نظر به‌صورت زیر می‌باشد:

**شرط مرزی در ورودی کانال:** در ورودی لوله جریان یکنواخت محوری وارد می‌شود که سرعت آن بر اساس پیشینه دبی مورد استفاده در رادیاتور خودرو (که برای یک لوله برابر با ۲۵۰ لیتر بر ساعت است) و مشخصات هندسی کانال و خواص فیزیکی سیال محاسبه می‌شود. جهت سرعت، عمود بر سطح مقطع ورودی کانال است. البته در اینجا علاوه بر سرعت، دمای ورود سیال به کانال، قطر هیدرولیکی و شدت آشفته‌گی نیز وارد می‌شوند. با استفاده از دبی ۲۵۰ لیتر بر ساعت، مقدار سرعت ورودی ۱/۷۲ متر بر ثانیه و عدد رینولدز ۵۲۱۲ به‌دست می‌آید.

**شرط مرزی در خروجی کانال:** در خروجی لوله شرط توسعه یافتگی اعمال می‌شود، یعنی گرادیان تمام متغیرها در جهت محوری صفر است.

**شرط مرزی در دیواره‌های کانال:** روی دیواره شرط عدم لغزش در نظر گرفته می‌شود. یعنی کلیه متغیرها به‌جز دما روی دیواره صفر بوده و برای دما نیز از شرط دمای ثابت دیواره استفاده شده است (۳۷۰ درجه کلوین).

**شرط مرزی در سطح مشترک:** برای سطح مشترک میان سیال و ماده متخلخل و سیال تمیز نظرات گوناگونی وجود دارد. بعضی از محققین شرط پیوستگی را برای تمام متغیرها و گرادیان‌های آنها در نظر می‌گیرند. برخی دیگر برای تنش برشی یا شار انرژی جنبشی آشفته یک پرش در نظر می‌گیرند که ضریب ثابت ایجاد شده باید به کمک آزمایش تعیین شود (از هر دو روش مذکور قبلاً در مقالات معتبر بسیاری استفاده شده است). در اینجا برای سادگی و همچنین به‌دلیل عدم وجود داده‌های تجربی برای این هندسه‌ی خاص، از شرط پیوستگی کمیت‌ها در فصل مشترک استفاده شده است.

### ۳- معادلات حاکم و روش حل عددی

فرم ماکروسکوپی معادلات حاکم با متوسط‌گیری حجمی از

رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$h(z) = \frac{q''(z)}{T_{wall} - T_{bulk}(z)}, \quad (10)$$

$$Nu(z) = \frac{h(z)D_h}{k}, \quad (11)$$

دمای میانگین  $T_{bulk}$  دمای دیواره،  $T_{wall}$  که در این روابط، ضریب هدایت  $k$  قطر هیدرولیکی کانال و  $D_h$  حجمی سیال، از رابطه (۱۲) محاسبه  $T_{bulk}$  حرارتی سیال است. همچنین می‌شود:

$$T_{bulk} = \frac{\int_A T |\rho v| dA}{\int_A |\rho v| dA}. \quad (12)$$

- روش حل عددی

نرم‌افزار فلونت<sup>۱</sup> که در شبیه‌سازی عددی موجود از آن استفاده شده است، از تکنیک حجم محدود برای تبدیل معادلات پیوسته حاکم بر مسئله به معادلات جبری گسسته استفاده می‌کند. معادلات گسسته شده با استفاده از الگوریتم سیمپل<sup>۲</sup> حل شده و خطای حل  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده شده و همچنین برای ناحیه نزدیک دیواره لوله از توابع دیوار بهبود یافته استفاده شده است.

#### ۴- بررسی میزان حساسیت به شبکه

در روش‌های حل عددی، شبکه‌بندی هندسه مسئله باید به‌گونه‌ای باشد که جواب‌های نهایی از دقت خوبی برخوردار باشند، باید توجه داشت که کوچک کردن بیش از اندازه شبکه خود باعث ایجاد خطا در جواب و حتی در بعضی مواقع موجب واگرایی حل می‌شود. بنابراین ابعاد شبکه باید بهینه باشد. در این مطالعه، با بررسی سایزهای مختلف شبکه مشاهده شد که برای داری  $10^{-6}$  و شبکه‌های با تعداد المان‌های بیشتر از  $604800$  تمام حل‌ها به سمت یک جواب همگرا می‌گردند. این مطلب در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (6)$$

در معادلات فوق،  $G_k$  نشان‌گر تولید انرژی جنبشی توربولانس به‌خاطر گرادیان سرعت متوسط و  $C_{1\varepsilon}$  و  $C_{2\varepsilon}$  مقادیر ثابت می‌باشند.  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  نیز اعداد پراکتل در جریان توربولانس برای  $k$  و  $\varepsilon$  هستند.

- مدل سازی ویسکوزیته آشفته:

ویسکوزیته آشفته با ترکیب  $k$  و  $\varepsilon$  از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

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

در این معادله،  $C_\mu$  یک ثابت می‌باشد.

ثابت‌های مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد عبارت است از:

$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1, \sigma_\varepsilon=1.3$  این ثوابت از آزمایشات تجربی برای جریان‌های برشی آشفته همگن به دست آمده‌اند و برای گستره وسیعی از جریان‌های برشی و نیز جریان‌های محدود به دیواره به خوبی عمل می‌کنند [۱۲].

- معادله انرژی در محیط متخلخل [۱۲]:

$$\nabla \cdot (\bar{v} \rho_f E_f) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T + (\bar{v} \bar{v}) \right) + S_f^h, \quad (8)$$

در این رابطه،  $E_f$  انرژی کلی سیال،  $\gamma$  ضریب تخلخل ماده و  $S_f^h$  ترم آنتالپی سیال است. همچنین  $k_{eff}$  ضریب هدایت گرمایی مؤثر ماده می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

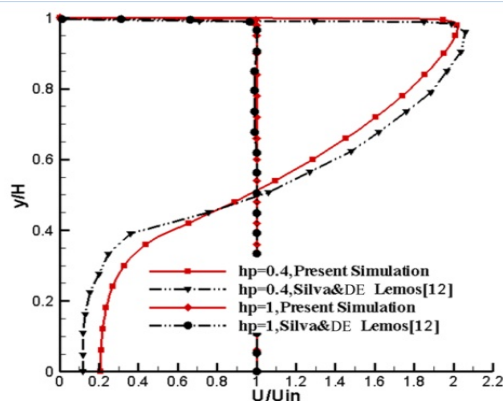
$$k_{eff} = \gamma k_f + (1-\gamma)k_s. \quad (9)$$

در رابطه فوق،  $k_f$  ضریب هدایت گرمایی فاز سیال  $k_s$  ضریب هدایت گرمایی فاز جامد می‌باشد.

- محاسبه عدد نوسلت در شرط مرزی دماتاب:

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد نوسلت موضعی از

1- FLUENT  
2- SIMPLE



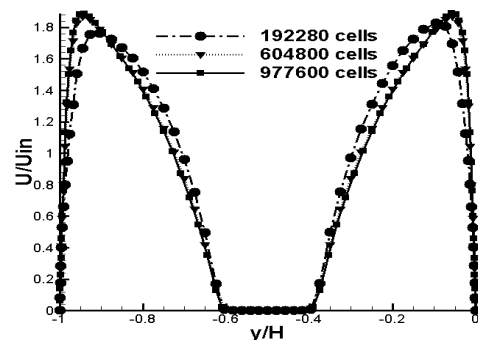
شکل (۴): پروفیل سرعت محوری توسعه یافته برای کانال با صفحات موازی.

#### ۶- نتایج و بحث

پس از اطمینان از صحت روش حل عددی، با حل معادلات حاکم نتایج ذیل حاصل می‌شوند:

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب بیانگر پروفیل سرعت محوری توسعه یافته بی‌بعد شده برای اعداد دارسی  $10^{-6}$  و  $10^{-3}$  به ازای ضخامت‌های مختلف ماده متخلخل در آرایش مرکزی ماده متخلخل می‌باشند. طبق این نمودارها، افزایش ضخامت ماده متخلخل باعث می‌شود که سیال بیشتری در فضای بین دیواره لوله و محیط متخلخل جریان یابد و از طرفی سرعت سیال در این فضای تمیز افزایش می‌یابد که این امر طبق تشابه رینولدز باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با کاهش عدد دارسی، مقدار سرعت نیز در فضای تمیز کاهش و در محیط متخلخل افزایش می‌یابد.

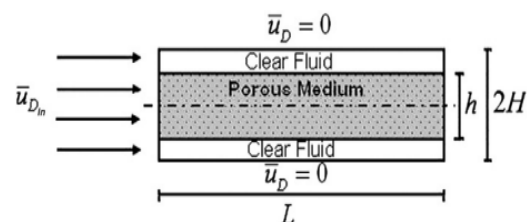
شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب بیانگر پروفیل سرعت محوری توسعه یافته بی‌بعد شده برای اعداد دارسی  $10^{-6}$  و  $10^{-3}$  به ازای ضخامت‌های مختلف ماده متخلخل در آرایش مرزی می‌باشند. مطابق این نمودارها افزایش ضخامت ماده متخلخل موجب می‌شود که دبی عبوری از این ناحیه کاهش یابد و به علت ارضای قانون پیوستگی، دبی بیشتری از ناحیه تمیز عبور کند. پس می‌توان گفت با افزایش ضخامت ماده متخلخل در آرایش مرزی، انتقال حرارت از دیواره‌های کانال کاهش می‌یابد.



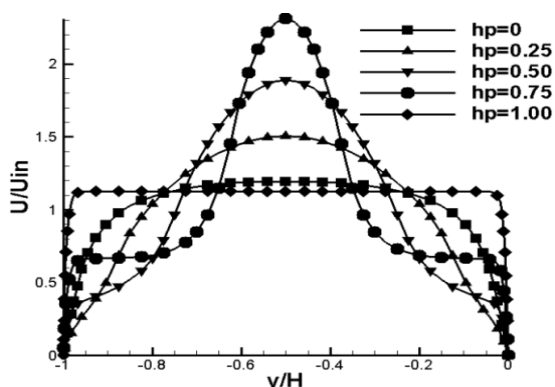
شکل (۲): پروفیل سرعت محوری توسعه یافته به ازای تعداد المان‌های مختلف.

#### ۵- صحت‌گذاری روش حل

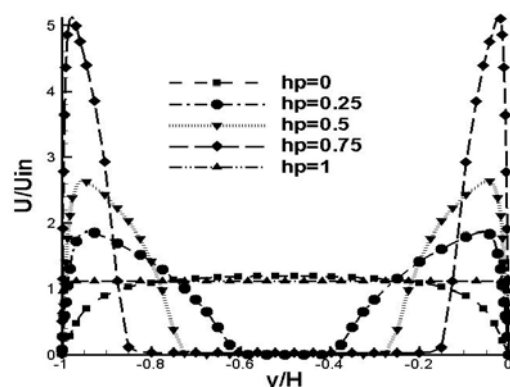
با توجه به اینکه نتایج تجربی برای موضوع مورد بحث در این مقاله وجود ندارد، روش حل صحت‌گذاری شده، سپس این روش برای مسئله مورد نظر اجرا می‌شود. شکل ۳ نشانگر دو صفحه موازی به طول  $L$  است. فاصله این دو صفحه  $2H$  بوده و یک ماده متخلخل به ضخامت  $h$  در فضای بین این دو صفحه قرار داده شده است. ماده متخلخل در مرکز لوله قرار دارد. عدد دارسی ماده متخلخل برابر با  $10^{-4}$  متر مربع و ضریب تخلخل آن  $0.5$  می‌باشد. یک جریان یکنواخت مغشوش با سرعت  $3/01$  متر بر ثانیه و رینولدز ورودی  $3 \times 10^5$  وارد فضای بین دو صفحه می‌شود. در حالت اول فرض شده است که نسبت ضخامت ماده متخلخل به ضخامت کل  $0.4$  باشد و در حالت دوم این نسبت  $1$  در نظر گرفته شده است. سیلوا و دیلموس [۱۳] به کمک شبیه‌سازی عددی، پروفیل سرعت توسعه یافته را برای چنین حالتی ارائه داده‌اند. برای بررسی صحت جواب‌های به‌دست آمده و روش حل، این جواب‌ها با نتایج سیلوا و دیلموس در شکل ۴ مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش حل از دقت مناسبی برخوردار است.



شکل (۳): شماتیکی از مسئله مورد بررسی توسط سیلوا و دیلموس [۱۳].

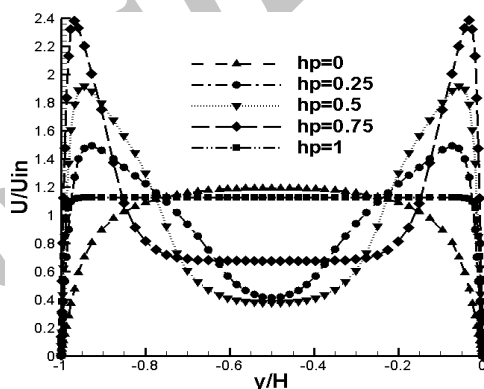


شکل (۸): پروفیل سرعت محوری توسعه یافته بدون بدون بعد به ازای ضخامت‌های مختلف ماده متخلخل برای دارسی  $10^{-6}$  در آرایش مرزی ( $\gamma = 0.9$ ).

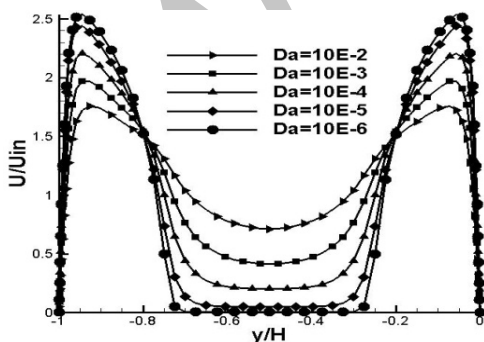


شکل (۵): پروفیل سرعت محوری توسعه یافته بدون بدون بعد به ازای ضخامت‌های مختلف ماده متخلخل برای دارسی  $10^{-6}$  در آرایش مرکزی ( $\gamma = 0.9$ ).

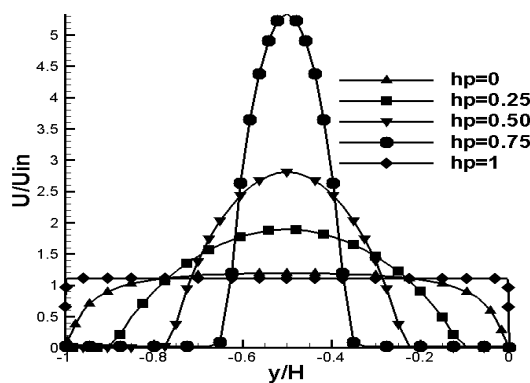
شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب سرعت محوری توسعه یافته بی‌بعد را برای اعداد دارسی مختلف در آرایش‌های مرکزی و مرزی ماده متخلخل نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش عدد دارسی یا در واقع کاهش نفوذپذیری ماده متخلخل، دبی و سرعت سیال درون ناحیه متخلخل کاهش یافته و در ناحیه تمیز افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت در ناحیه تمیز که برای آرایش مرکزی، همان ناحیه نزدیک دیواره می‌باشد، انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. برای آرایش مرزی ناحیه تمیز ناحیه مرکزی لوله می‌باشد. در نتیجه برای این آرایش سرعت در نزدیک دیواره کاهش یافته و انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. توجه شود کاهش عدد دارسی منجر به افزایش افت فشار می‌شود.



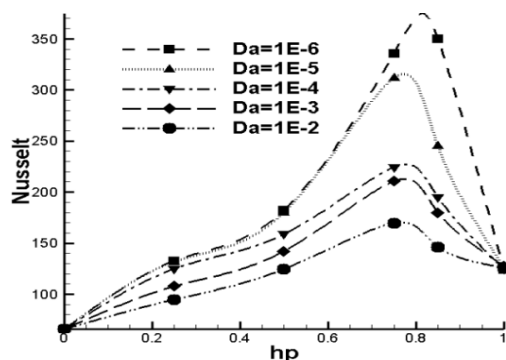
شکل (۶): پروفیل سرعت محوری توسعه یافته بدون بدون بعد به ازای ضخامت‌های مختلف ماده متخلخل برای دارسی  $10^{-3}$  در آرایش مرکزی ( $\gamma = 0.9$ ).



شکل (۹): پروفیل سرعت محوری توسعه یافته بدون بدون بعد به ازای دارسی‌های مختلف در آرایش مرکزی ( $\gamma = 0.9$  &  $h_p = 0.5$ ).

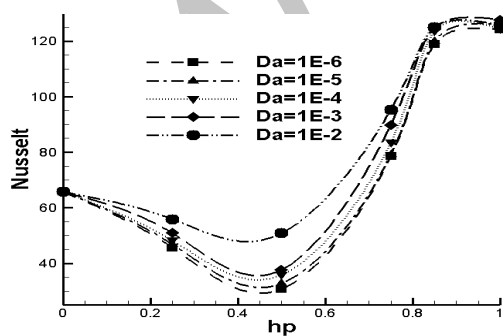


شکل (۷): پروفیل سرعت محوری توسعه یافته بدون بدون بعد به ازای ضخامت‌های مختلف ماده متخلخل برای دارسی  $10^{-6}$  در آرایش مرزی ( $\gamma = 0.9$ ).

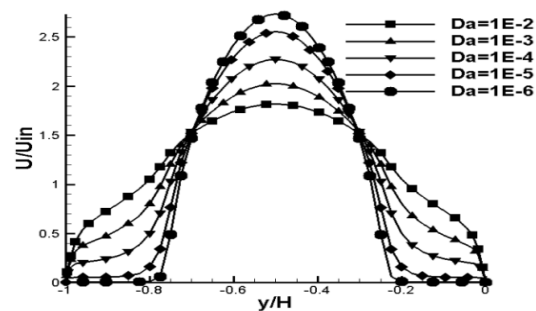


شکل (۱۱): تغییرات نوسلت برحسب ضخامت ماده متخلخل در آرایش مرکزی ( $\gamma = 0.9$ ).

تغییرات عدد نوسلت توسعه یافته برحسب ضخامت ماده متخلخل و برای اعداد دارسی مختلف در آرایش مرکزی، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. به‌طور کلی، در آرایش مرزی عدد نوسلت با افزایش ضخامت ماده متخلخل کاهش می‌یابد. زیرا افزایش ضخامت ماده متخلخل باعث ایجاد مقاومت بیشتر در برابر عبور سیال شده و باعث کم شدن دبی و سرعت جریان در ماده متخلخل نزدیک دیوار می‌شود. به‌علت کاهش دبی عبوری از ماده متخلخل، عدد نوسلت نیز کاهش می‌یابد. با ازدیاد ضخامت ماده متخلخل بیشتر از این مقدار، فضای ناحیه تمیز کم شده و سیال بیشتری در ناحیه متخلخل جریان می‌یابد که این امر باعث افزایش عدد نوسلت می‌شود. زمانی که تمام لوله از ماده متخلخل پر می‌شود، پروفیل سرعت در مقطع لوله ثابت می‌شود و عدد نوسلت بیشترین مقدار را خواهد داشت.

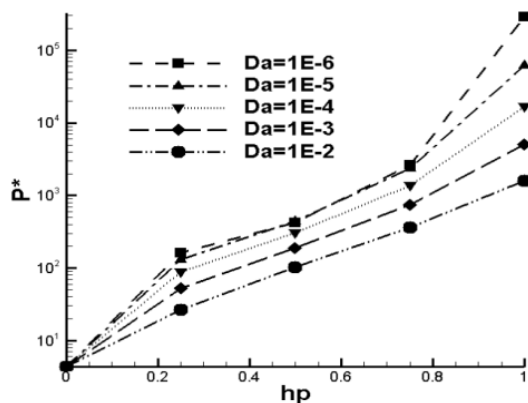


شکل (۱۲): تغییرات نوسلت برحسب ضخامت ماده متخلخل در آرایش مرزی ( $\gamma = 0.9$ ).



شکل (۱۰): پروفیل سرعت محوری توسعه یافته بدون بعد به ازای دارسی‌های مختلف در آرایش مرزی ( $\gamma = 0.9$  &  $h_p = 0.5$ )

تغییرات عدد نوسلت توسعه یافته برحسب ضخامت ماده متخلخل و برای اعداد دارسی مختلف در آرایش مرکزی، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی، عدد نوسلت (نرخ انتقال حرارت) با افزایش ضخامت ماده متخلخل تا مقدار مشخصی افزایش می‌یابد. در واقع، افزایش ضخامت ماده متخلخل باعث می‌شود که سیال بیشتری از ناحیه بدون ماده متخلخل (ناحیه تمیز) که مقاومت کمتری در مقابل عبور جریان از خود نشان می‌دهد، عبور کند. بنابراین، دبی جریان و سرعت سیال در ناحیه تمیز که ناحیه نزدیک به دیواره است، افزایش می‌یابد. بنابراین در ناحیه کوچکی گرادیان سرعت بزرگی ایجاد می‌شود. در نتیجه طبق نظریه تشابه رینولدز عدد نوسلت هم افزایش خواهد یافت. البته افزایش انتقال حرارت با افزایش ضخامت ماده متخلخل تا زمانی ادامه می‌یابد که مقاومت ناحیه تمیز باقی مانده برای عبور جریان کمتر از مقاومت ناحیه متخلخل باشد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، این حالت به ازای ضخامت ماده متخلخل کمتر از حدود ۷۵ درصد، اتفاق می‌افتد. با افزایش ضخامت ماده متخلخل بیشتر از این مقدار، سیال بیشتری در ناحیه متخلخل جریان می‌یابد. از طرفی سرعت سیال در ناحیه تمیز کاهش یافته که این امر باعث کاهش عدد نوسلت می‌شود. زمانی که  $h_p$  برابر با یک شود، یعنی تمام لوله از ماده متخلخل پر شود، پروفیل سرعت در مقطع لوله ثابت می‌شود بنابراین عدد نوسلت کاهش می‌یابد. توجه شود که به‌کار بردن ماده متخلخل برای افزایش انتقال حرارت باعث افزایش زیاد افت فشار در لوله نیز خواهد شد.



شکل (۱۴): تغییرات افت فشار بی بعد شده برحسب ضخامت ماده متخلخل در آرایش مرزی ( $\gamma = 0.9$ ).

جدول (۱): درصد افزایش عدد نوسلت با استفاده از ماده متخلخل با آرایش مرکزی.

$\frac{Da}{hp}$	10e-6	10e-5	10e-4	10e-3	10e-2
hp=۰/۲۵	%۹۱/۰۱	%۸۷/۶	%۷۸/۲۳	%۵۷	%۴۰/۱
hp=۰/۵۰	%۱۶۹/۷	%۱۶۵/۶	%۱۳۶/۳	%۱۱۲/۱	%۸۶/۸
hp=۰/۷۵	%۳۱۵/۶	%۳۰۵/۸	%۲۹۲/۳	%۲۳۳/۵	%۱۶۱/۶
hp=۱/۰۰	%۱۰۷/۲	%۱۱۳/۷	%۱۰۶/۹	%۱۱۲/۸	%۱۰۷/۲

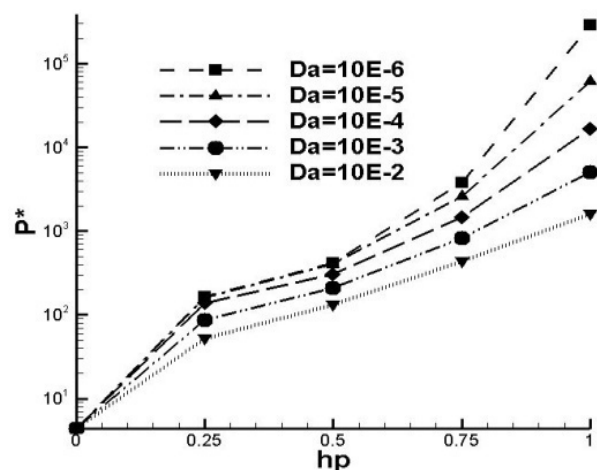
#### ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، جابه جایی اجباری آشفته درون یک لوله پهن شده که به طور جزئی یا کامل از ماده متخلخل پر شده، در دو نوع آرایش متفاوت به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است و اثر ضخامت و نفوذپذیری ماده متخلخل بر نرخ انتقال حرارت و افت فشار بررسی شده است. نتایج نشان می دهند که با استفاده از ماده متخلخل به صورت جزئی در آرایش مرکزی، با افزایش ضخامت لایه متخلخل تا حدود ۰/۷۵، انتقال حرارت افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. کاهش عدد دارسی نیز از عواملی است که انتقال حرارت را افزایش می دهد. ولی باید توجه داشت که افزایش انتقال حرارت توأم با افزایش افت فشار می باشد که البته با توجه به صرفه اقتصادی باید حالت بهینه ای در نظر گرفت. همچنین، استفاده از ماده متخلخل به صورت جزئی انتقال حرارت بیشتر و افت فشار خیلی کمتری نسبت به حالت کامل ایجاد می کند. پس در واقع با به کارگیری ماده متخلخل به صورت جزئی می توان

شکل ۱۳ نمایانگر تغییرات افت فشار بی بعد شده برحسب ضخامت ماده متخلخل در اعداد دارسی مختلف برای آرایش مرکزی می باشد. مشاهده می شود در یک عدد دارسی معین، افزایش ضخامت ماده متخلخل باعث افزایش افت فشار می شود. همچنین، افت فشار درون لوله با تغییر عدد دارسی تا ضخامت نسبی ۰/۵ تغییرات کمتری در مقایسه با سایر حالتها از خود نشان می دهد. پس می توان این ضخامت را به عنوان ضخامت بهینه در نظر گرفت. باید توجه کرد که افت فشار در حالتی که لوله به طور کامل از ماده متخلخل پر شود به طور ناگهانی افزایش می یابد و به بیشینه مقدار خود می رسد. شکل ۱۴ نشانگر تغییرات افت فشار بی بعد شده برحسب ضخامت ماده متخلخل در اعداد دارسی مختلف برای آرایش مرزی است. مشاهده می شود که این منحنی مشابه منحنی حالت مرکزی می باشد. در اینجا نیز در یک عدد دارسی معین، افزایش ضخامت ماده متخلخل، باعث افزایش افت فشار می شود و افت فشار در حالتی که لوله به طور کامل از ماده متخلخل پر شود، بیشینه است.

در جدول ۱ درصد افزایش انتقال حرارت (عدد نوسلت)

برای اعداد دارسی و ضخامت های مختلف لایه متخلخل، در آرایش مرکزی محاسبه شده است.



شکل (۱۳): تغییرات افت فشار بی بعد شده برحسب ضخامت ماده متخلخل در آرایش مرکزی ( $\gamma = 0.9$ ).



6. Yang, Y.T. and Hwang, M.L. "Numerical Simulation of Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Heat Exchangers Fitted with Porous Media", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No's. 13-14, pp. 2956-2965, 2009.
7. Huang, Z.F., Nakayama, A., Yang, K., and Liua, W. "Enhancing Heat Transfer in the Core Flow by Using Porous Medium Insert in a Tube", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No's. 5-6, pp. 1164-1174, 2010.
8. Saito, M.B. and De Lemos, M.J.S. "A Macroscopic Two-Energy Equation Model for Turbulent Flow and Heat Transfer in Highly Porous Media", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No's. 11-12, pp. 2424-2433, 2010.
9. Li, H.Y., Leong, K.C., Jin, L.W., and Chai, J.C. "Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in a Channel with Staggered Porous Block", *Int. J. Thermal Sci.*, Vol. 49, No. 6, pp. 950-962, 2010.
10. Silva, R.A., and De Lemos, M.J.S. "Turbulent Flow in a Channel Occupied by a Porous Layer Considering the Stress Jump at the Interface", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 26, pp. 5113-5121, 2003.
11. Ergun, "Fluid Flow through Packed Columns", *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, No. 2, pp. 89-94, 1952.
12. FLUENT 6.3 User's Guide.
13. Silva, R.A., and De Lemos, M.J.S. "Turbulent Flow in a Composite Channel", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 8, pp. 1019-1023, 2011.

مبدلی با حجم و وزن کمتر، ولی انتقال حرارت بیشتر داشت. بر خلاف آرایش مرکزی، در آرایش مرزی با افزایش ضخامت لایه متخلخل تا مقدار مشخصی، (ضخامت حدود ۰/۵) انتقال حرارت ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد تا اینکه در حالت کاملاً متخلخل به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

#### مراجع

1. Jang, J.Y. and Chen, J.L. "Forced Convection in A Parallel Plate Channel Partially Filled With a High Porosity Medium", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, No. 2, pp. 263-273, 1992.
2. Amiri, A. and Vafai, K. "Transient Analysis of Incompressible Flow Through a Packed Bed", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 24, pp. 4259-4279, 1998.
3. Marafie, A. and Vafai, K. "Analysis of Non-Darcian Effects on Temperature Differentials in Porous Media", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 23, pp. 4401-4411, 2001.
4. Bogdan, I. and Abdulmajeed, A. "An Experimental and Numerical Study on Heat Transfer Enhancement For Gas Heat Exchangers Fitted with Porous Media", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 23, pp. 4939-4952, 2004.
5. Mohamad, A. "Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers Fitted with Porous Media. Part I: Constant Wall Temperature", *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 42, No. 4, pp. 385-395, 2003.