



## مدل‌سازی و بررسی تأثیرات رژیم جریان بر حرکت سیال درون محفظه سه‌بعدی با دیواره متخلخل

سید ابوذر فنایی<sup>۱\*</sup> و رضا خیری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، ایران  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، ایران  
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۰

### چکیده

در کار حاضر شبیه‌سازی سه‌بعدی رژیم جریان لغزش برای مطالعه دقیق محفظه پیل سوختی با دیواره پایینی متخلخل در ابعاد کوچک بررسی می‌شود. این بررسی برای مشخص نمودن تغییرات سرعت متوسط، اختلاف فشار و ضریب اصطکاک با توجه به مقدار جرم نفوذ یافته از دیواره متخلخل، مساحت سطح مقطع دیواره و محفظه و نسبت منظری انجام شده است؛ همچنین نتایج حاصله با مدل‌سازی رژیم جریان پیوسته، مقایسه شده است. در این مدل‌سازی معادلات پایستگی جرم و مومنتوم برای رژیم‌های جریانی پیوسته و لغزشی به کمک نرم‌افزار فرترن توسعه داده شده و با نتایج موجود در ادبیات فن مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند. نتایج برای مساحت سطح مقطع‌های مختلف برای اعداد نادسن متفاوت در دو رژیم پیوسته و لغزشی به دست آمده‌اند. با در نظر گرفتن نسبت منظری یک، با کاهش عدد نادسن، ضریب اصطکاک، سرعت متوسط و اختلاف فشار افزایش می‌یابد؛ همچنین با در نظر گرفتن رژیم لغزشی درون محفظه، مقدار سرعت متوسط، اختلاف فشار و ضریب اصطکاک دقیق‌تر (در بهترین حالت ۵٪) از رژیم غیرلغزشی محاسبه می‌شوند؛ همچنین موقعی که عدد نادسن و نسبت منظری به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱ و ۵ باشند، تغییر رژیم جریان از رژیم پیوسته به لغزشی سبب افزایش اختلاف فشار و سرعت متوسط مورد انتظار می‌شود.

**کلمات کلیدی:** دیواره متخلخل، نسبت منظری، عدد نادسن، رژیم لغزش.

## Modeling and Evaluation of the Flow Regime Effects on Fluid Movement into Three-Dimensional Channel with Porous Wall

S. A. Fanaee<sup>1,\*</sup>, R. Kheiri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran.

<sup>2</sup> Phd Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran.

### Abstract

In the present work a three-dimensional simulation of the slip flow regime for a small-sized channel of a fuel cell with lower porous wall. This study is used to determine the variations of average velocity, pressure difference, and friction coefficient considering the penetrated mass from porous wall, the wall and channel cross-sectional area, and aspect ratio of channel. Furthermore, the results are comprised with Continuous flow regime. In this solution, the equations of mass and momentum for continuous and slip regimes evaluated with developed Fortran code, and Validated with papers. The results with different channel area for two fluid regimes are obtained. Considering the aspect ratio equal to one, the friction coefficient average velocity, and the pressure difference are increased with decreasing at Knudsen number. Considering the slip regime into the channel, the friction coefficient, pressure difference and average velocity values are calculated more accurate (at best 5%), than non-slip regimes. Furthermore, when Knudsen number and aspect ratio are respectively equal to 0.001 and 5, changing the flow assumption from non-slip regime to slip one is occurred to increasing the expected pressure difference and average velocity.

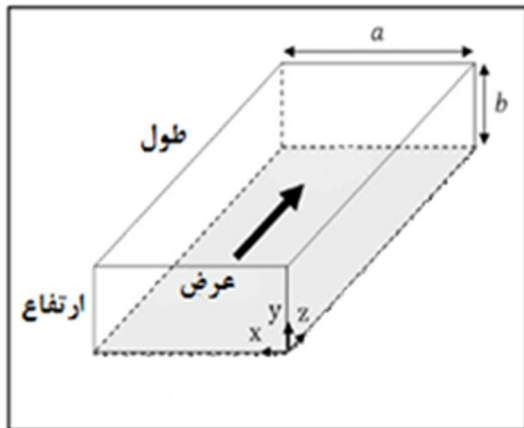
**Keywords:** Porous Wall; Aspect Ratio; Knudsen Number; Flow Regimes.

## ۱- مقدمه

پیل‌های سوختی، دستگاه‌های الکتروشیمیایی هستند که انرژی شیمیایی سوخت را بطور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. از مزایای پیل‌های سوختی می‌توان به راندمان بالا و آلودگی زیست محیطی و صوتی کمتر اشاره کرد [۱]. با توجه به مزایای یاد شده این تجهیزات مهمترین انتخاب برای توسعه، سیستم‌های تولید الکتریسیته می‌باشند. البته مهمترین عیب پیل‌های سوختی، هزینه بالای آنها است [۲ و ۳]، اما با این حال این سیستم‌ها در بسیاری از کاربری‌های تجاری [۴ و ۵] قابل اجرا هستند و حتی می‌توان برای کاربردهای مسکونی هم مورد استفاده قرار گیرند [۶ و ۷]. پیل‌های سوختی انواع مختلفی دارند که بر اساس نوع کاربرد و دمای کاری تقسیم‌بندی می‌شوند [۸]. به لحاظ ابعادی مدل‌سازی مجراهای مختلف یک پیل سوختی در محدوده مدل‌سازی مسائل جریانی در ابعاد کوچک قرار می‌گیرد. با توجه به مفاهیم پایه این مسائل اگر عدد نادسن کوچک‌تر از  $10^{-3}$  باشد، رژیم جریان پیوسته بوده و اگر عدد نادسن بین  $10^{-3}$  تا  $10^{-1}$  باشد، رژیم جریان لغزشی، برای عدد نادسن بین  $10^{-1}$  تا  $10^0$  رژیم جریان گذر و نهایتاً در محدوده عدد نادسن بزرگ‌تر از  $10^0$  رژیم حرکت آزادانه مولکول‌ها وجود دارد [۹]. محفظه پیل سوختی یکی از مهمترین اجزائی که کارکرد آن بر کارایی کلی پیل تأثیر می‌گذارد، بنابراین یکی از مهمترین ضروریات طراحی پیل‌های سوختی است [۱۰ و ۱۱]. بطور معمول مدل‌سازی‌های انجام شده در این زمینه، جریان درون محفظه را یا با فرض سرعت ثابت [۱۲] و یا با تعیین رابطه ساده‌ای برای غلظت واکنش‌دهنده‌ها [۱۳]، مدل‌سازی کرده‌اند. بطور کلی دو رویکرد اصلی برای مدل‌سازی جریان محفظه وجود دارد که شامل تجزیه و تحلیل محفظه به‌صورت مستقل و تجزیه و تحلیل محفظه با در نظر گرفتن شروط واقعی پیل سوختی می‌باشند که در روش اول از روش‌های تنوری و نظری برای بررسی تغییرات جریان استفاده می‌کند و شامل تعیین دبی و غلظت سیال در طول محفظه است؛ اما روش دوم از CFD<sup>۱</sup> برای بررسی دوبعدی و سه‌بعدی جریان

استفاده می‌کند [۱۴ و ۱۵]. کینی<sup>۲</sup> [۱۶]، ضریب اصطکاک را برای لوله متخلخل بررسی کرده و روی تأثیر مکش<sup>۳</sup> و دمش<sup>۴</sup> سیال بر ضریب اصطکاک، مطالعاتی را انجام داده است. در این مطالعه نشان داده شد که برای بررسی محفظه با دیواره متخلخل، شرط توسعه‌یافتگی برقرار است. وانگ<sup>۵</sup> و همکارانش [۱۷]، به بررسی یک محفظه مربعی با ضلع متخلخل پرداخته‌اند. در این مطالعه علاوه بر تأیید نتایج مرجع [۱۶]، یک ضریب تصحیح برای تبدیل محفظه متخلخل به غیر متخلخل ارائه شده است؛ همچنین در این مطالعه بیان شد، در مواقعی که سرعت مکش سیال از دیواره متخلخل زیاد باشد، برگشت جریان اتفاق خواهد افتاد. یان<sup>۶</sup> و همکارانش [۱۸]، جریان کاملاً توسعه یافته را برای محفظه دوزنقه‌ای شکل محفظه پیل سوختی شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه محفظه برای نسبت‌های منطری مختلف بررسی شده است. مدل‌سازی با رژیم جریان پیوسته نشان می‌دهد که کمترین ضریب اصطکاک در نسبت منطری یک بدست می‌آید. چنگ<sup>۷</sup> و وانگ<sup>۸</sup> [۱۹] به صورت تجربی نفوذ سیال از محفظه را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش نتایج بدست آمده با نتایج مدل‌سازی عددی مقالات پیشین ارزیابی شده و نتیجه بدست آمده اختلاف ۱۰ الی ۱۵٪ را با مدل‌سازی‌های پیشین نشان می‌دهد. تاکنون مدل‌سازی‌های مختلفی برای بررسی محفظه با ابعاد کوچک انجام شده که فقط محدود به رژیم پیوسته بوده [۲۰] و دارای خطای زیادی است [۲۱ و ۲۲]. برای بررسی یک محفظه در ابعاد کوچک باید از تعاریف مربوط به رژیم‌های سیالی به کمک عدد نادسن<sup>۹</sup> [۲۳] استفاده کرد. از این رو برای بررسی دقیق‌تر رفتار سیال به خصوص در محفظه متخلخل باید مقدار عدد نادسن را مشخص کرد و بر مبنای آن معادلات جریان و شرایط مرزی را نوشت. با توجه به پژوهش‌های مرور شده، در تحقیقات گذشته در رابطه با رژیم جریان لغزش و تأثیر آن بر مسئله حاضر بررسی‌ای انجام نشده و در تمام مدل‌سازی‌های عددی از رژیم

<sup>2</sup> Kinney<sup>3</sup> Suction<sup>4</sup> Injection<sup>5</sup> Hwang<sup>6</sup> Yuan<sup>7</sup> Cheng<sup>8</sup> Hwang<sup>9</sup> Knudsen (Kn)<sup>1</sup> Computation Fluid Dynamic



شکل ۱- شماتیک محفظه مدل سازی مسئله

توسعه یافتگی میدان سرعت همزمان با فرض انتقال یکنواخت جرم بدست آمده است. این تعریف جامع توسعه یافتگی میدان سرعت همراه با انتقال یکنواخت جرم است. لازم به ذکر است که تعریف مرسوم عمومی ( $\partial w / \partial z = 0$ ) که در آن انتقال جرم از دیواره‌ها صفر است، حالت خاص تعریف جامع فوق است؛ همچنین با فرض توسعه یافتگی هیدرودینامیکی، از جمله پخش محوری در معادلات در مقایسه با جملات پخش در راستاهای دیگر صرف نظر شده است و در موارد انتقال جرم به خاطر این که مقدار نفوذ جابه جایی جرمی در دیواره متخلخل خیلی کمتر از جهت جریان اصلی است؛ یعنی  $Re \gg Re_m$ ، از جملات جابجایی  $u$  و  $v$  صرف نظر شده است. برای شرایط مرزی در حل پیوسته، شرط مرزی به صورت زیر می‌باشد.

$$u = v = w = 0 \quad (4)$$

اما در حالت حل رژیم ناپیوسته داخل لوله شرط مرزی لغزشی به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود [۹]:

$$w_s - w_{wall} = \frac{2-\sigma}{\sigma} \lambda_m \left( \frac{\partial w_s}{\partial n} \right)_{n=w} \quad (5)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\mu}{\mu_0} * \frac{P_0}{P} * \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.5} \quad (6)$$

محفظة بررسی شده در این پژوهش محفظه هوای پیل سوختی است که سیال هوا مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مقدار  $\lambda$  در رابطه (۵) برای حالت ناپیوسته با توجه به مرجع [۲۷ و ۲۸] از رابطه (۶) بدست خواهد آمد.

در رابطه (۶) زیر نویس صفر، نشان دهنده خواص در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و ۱ اتمسفر است. با توجه به این رابطه و

جریان پیوسته استفاده شده است. این در حالی است که برای مدل سازی عددی هر سیالی داخل محفظه باید ابتدا عدد نادسن بررسی شده تا مشخص شود که در کدام رژیم جریانی سیال قرار دارد و باید از معادلات کدام رژیم جریان استفاده نمود. هدف کار حاضر بررسی سه بعدی محفظه پیل سوختی با دیواره متخلخل در مقادیر مختلف نسبت منظری و سطح مقطع ورودی محفظه به منظور محاسبه دقیق ضریب اصطکاک، سرعت متوسط و اختلاف فشار است. در این بررسی ابتدا محفظه در رژیم پیوسته و سپس برای دقیق تر شدن نتایج، مدل سازی در رژیم لغزش با توجه به عدد نادسن محاسبه شده انجام می‌شود. طراحی این مدل با توجه به انتخاب محفظه حاضر به عنوان بخشی از یک پیل سوختی پلیمری برای تأمین انرژی لپ تاب انجام شده است.

## ۲- تعریف مسئله

در شکل ۱ شماتیک محفظه پیل سوختی بررسی شده در این تحقیق نشان داده شده است. مطابق با این شکل، مدل مسئله شامل یک محفظه سه بعدی با دیواره پایینی متخلخل است که ابعاد این محفظه کوچک در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی برای بررسی رژیم مسئله از تعریف عدد نادسن به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

سیال در جهت نشان داده شده در شکل ۱ وارد محفظه می‌شود. معادلات حاکم برای حل مسئله شامل، معادله پیوستگی و مومنتوم از مرجع [۲۴ و ۲۵]، به صورت معادلات زیر می‌باشند که در این حل چگالی و ویسکوزیته سیال ثابت فرض شده و جریان پایا در نظر گرفته می‌شود [۲۶].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$w \frac{\partial w}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} \quad (3)$$

زمانی که انتقال جرم یکنواخت در نظر گرفته می‌شود،  $\partial w / \partial z \neq 0$  که یک تعریف جدید از توسعه یافتگی هیدرودینامیکی مشابه با مرجع [۱۶] است که در آن نسبت سرعت محلی در مقطع محفظه به سرعت متوسط مقطع  $(w/w_b)$  به جهت جریان بستگی دارد. به عبارت دیگر جریان سیال با مکش یا دمش از دیواره متخلخل محفظه می‌تواند به صورت جریان توسعه یافته در نظر گرفته شود که در واقع

ضریب اصطکاک با انتگرال‌گیری از رابطه (۱۰) به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۶ و ۳۲]:

$$fRe = \frac{D_h^2}{2\mu} \left( \frac{dp}{dz} \right) - 2\beta Re_m \frac{a}{p}; \beta = \frac{(w_b^2)}{w_b^2} \quad (12)$$

### ۳- نتایج

در این پژوهش به بررسی جریان سه‌بعدی درون ریزمحفظه با محفظه‌های متخلخل و تحت تأثیر جریان با شرایط مختلف پرداخته می‌شود؛ همچنین تأثیرات تخلخل، کمیت‌های هندسی و رژیم جریان در حالت رژیم پیوسته و لغزشی بر پارامترهای عملکردی در محفظه با ابعاد کوچک بررسی می‌شود. نتایج عددی حاضر به کمک کد نوشته شده در نرم‌افزار فرتن [۳۳] به دست آمده که در این کد ابعاد محفظه و سیال ورودی قابل تغییر است. با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب حل جریان در دو رژیم پیوسته و لغزشی با سطح مقطع ورودی محفظه متغیر بررسی شده است. کمیت‌های هندسی به طوری تعیین می‌شوند که محدوده عدد نادن در رژیم پیوسته یا لغزشی قرار گرفته و سپس با بکارگیری شرایط مرزی مربوطه به حل مسئله پرداخته می‌شود. برای حل مسئله باید ابتدا استقلال از شبکه بررسی شود. در جدول ۱ نتایج ضریب اصطکاک برای شبکه‌های مختلف برای نسبت منظری برابر با دو آورده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، اگر شبکه‌بندی هندسی از مقدار ۶۰ در ۳۰ بیشتر شود، تغییر محسوسی در ضریب اصطکاک دیده نخواهد شد؛ بنابراین شبکه‌بندی برای نسبت منظری دو، ۶۰ در ۳۰ انتخاب می‌شود.

به همین ترتیب برای سایر نسبت‌های منظری، شبکه‌بندی مناسب در جدول ۲ آورده شده است؛ همچنین مرجع [۲۶] تأیید کننده شبکه‌بندی ارائه شده در جدول ۲ است.

نمایی از شبکه‌بندی هندسه در شکل ۲ آورده شده است. این شبکه تشکیل شده از یک مجموعه منظم مربعات است که در محفظه مکعبی سه‌بعدی قرار گرفته‌اند. در طول این محفظه شبکه‌بندی انجام شده در هر مقطع تکرار می‌شود.

با در نظر گرفتن دمای ۵۰ درجه سلسیوس مقدار  $\lambda$  برابر با ۸۱۳ نانومتر بدست آمده است؛ همچنین مقدار  $\sigma$  با توجه به مرجع [۲۹]، ۰/۹۳ در نظر گرفته شده است.

### ۲-۱- روش حل مسئله

برای حل معادلات بیان شده از یک کد سه‌بعدی استفاده شده است. در این کد ابتدا معادلات به صورت دوبعدی با روش پواسون و به صورت تفاضل مرکزی حل شده و سپس جواب‌های این حل در راستای جریان برازش داده می‌شود. فرم عمومی معادلات برای حل به روش مزبور در ابتدا به صورت رابطه (۷) در نظر گرفته می‌شود [۳۰]. معادله (۷) به روش ضمنی با جهت متغیر<sup>۱</sup> و با استفاده از روش ماتریس سه‌قطری<sup>۲</sup> حل می‌شود. در این روش حل جریان یک بار در جهت x و بار دیگر در جهت y به صورت ضمنی انجام می‌شود. مطابق با [۲۶] اگر نفوذ جرم وجود داشته باشد، معادله چشمه به صورت رابطه (۸) و در غیر این صورت با رابطه (۹) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = -s_\phi \quad (7)$$

$$S = \left[ \frac{1}{\rho} \left( -\frac{dp}{dz} \right) - w \frac{\partial w}{\partial z} \right] \quad (8)$$

$$S = \left( -\frac{dp}{dz} \right) \quad (9)$$

با در نظر گرفتن تعریف چشمه از رابطه (۸)، معادله مومنوم در حالت کلی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = - \left[ \left( -\frac{dp}{dz} \right) - \rho w \left( \frac{w}{w_b} \right) Re_m \frac{v a}{D_h A} \right] \quad (10)$$

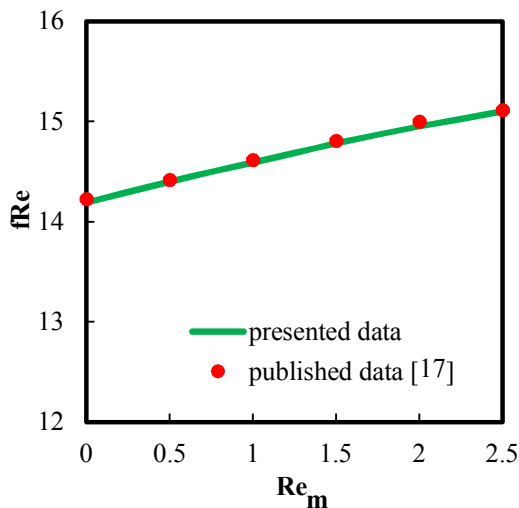
اگر در معادله بالا  $Re_m$  برابر با صفر در نظر گرفته شود، معادله، تبدیل به حالت بدون نفوذ جرم خواهد شد. در رابطه بالا  $w_b$  سرعت متوسط سیال در مقطع محفظه بوده که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶ و ۳۱]:

$$w_b = \frac{1}{A} \int_0^b \int_0^a w dx dy \quad (11)$$

<sup>1</sup> ADI  
<sup>2</sup> TDMA

۳-۱- اعتبار سنجی

برای اعتبارسنجی کد توسعه داده شده در پژوهش حاضر نتایج با سه مرجع [۱۷، ۱۹ و ۲۶] مقایسه شده است. یادآور می‌شود که در اعتبارسنجی کد توسعه داده شده با هر مرجع شرایط آن مرجع در کد توسعه داده شده وارد می‌شود. در مرجع [۱۷] نسبت منظری محفظه یک، مساحت ورودی محفظه  $10^{-6}$  مترمربع و اختلاف فشار اولیه  $10$  کیلوپاسکال در نظر گرفته شده که این مرجع معادلات را به صورت پیوسته مدل‌سازی کرده است. مقایسه نتایج کد توسعه داده شده حاضر و نتایج گزارش شده [۱۷] در شکل ۳ و جدول ۳ گزارش شده است. این مقایسه نشان دهنده تطابق قابل قبول با داده‌های عددی با حداکثر خطای  $0.33\%$  بوده که درستی کد توسعه داده شده حاضر را تأیید می‌کند.



شکل ۳- مقایسه نتایج تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب نفوذپذیری سطح متخلخل برای مدل‌سازی حاضر با نتایج چاپ شده در [۱۷] (طبق شرایط موجود در [۱۷])

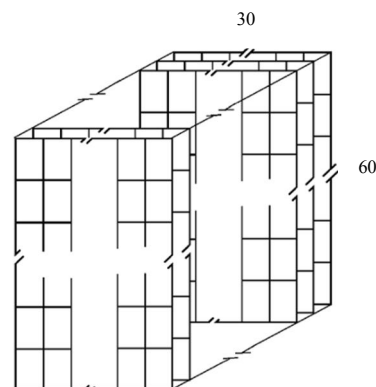
مقایسه نتایج کد توسعه داده شده حاضر و نتایج گزارش شده [۲۶]، در شکل ۴ نشان داده شده است. در مرجع [۲۶] نیز مساحت ورودی محفظه  $10^{-6}$  مترمربع و اختلاف فشار اولیه  $10$  کیلوپاسکال در نظر گرفته شده، اما نتایج برای نسبت‌های منظری محفظه  $0.2, 0.5, 1, 2$  و  $5$  است. مقایسه نتایج کد توسعه داده شده حاضر با نتایج [۲۶]، انطباق قابل قبول با خطای حداکثر  $0.3\%$  درصدی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- شبکه‌بندی مناسب جریان در نسبت منظری دو

شبکه‌بندی	$fRe$
$10 * 20$	۱۴/۹۶
$15 * 30$	۱۵/۲۲
$20 * 40$	۱۵/۳۱
$25 * 50$	۱۵/۴۵
$30 * 60$	۱۵/۴۸
$35 * 70$	۱۵/۴۸
$40 * 80$	۱۵/۴۹
$45 * 90$	۱۵/۵۰
$50 * 100$	۱۵/۵۰

جدول ۲- شبکه‌بندی مناسب در نسبت‌های منظری مختلف

نسبت منظری (a/b)	شبکه‌بندی
۵:۱	$100 * 20$
۲:۱	$60 * 30$
۱:۱	$60 * 60$
۱:۲	$30 * 60$
۱:۵	$20 * 100$



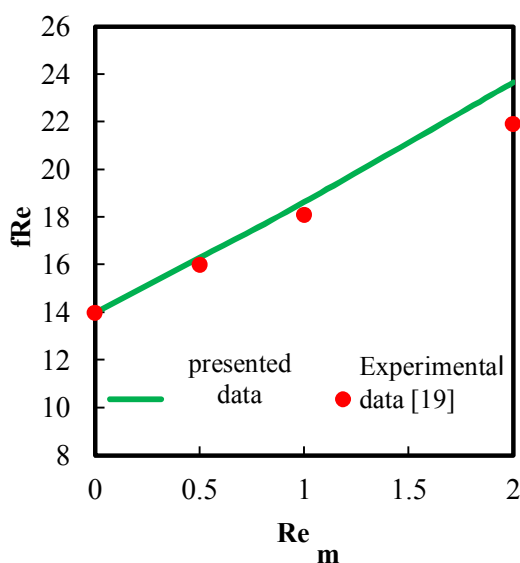
شکل ۲- نمایی از شبکه‌بندی هندسه

جدول ۴- اختلاف نتایج تجربی [۱۹] با کد توسعه داده شده (طبق شرایط موجود در [۱۹])

اختلاف نسبی (%)	نتایج کد توسعه داده شده	نتایج تجربی [۱۹]	Re <sub>m</sub>
۰	۱۳/۹۹	۱۳/۹۹	۰
۲	۱۶/۳۱	۱۵/۹۹	۵
۳	۱۸/۶۴	۱۸/۱۰	۱۰
--	۲۰/۹۹	گزارش نشده	۱۵
۸	۲۳/۶۵	۲۱/۹۰	۲۰

جدول ۳- اختلاف بین کد توسعه داده شده و نتایج مرجع [۱۷] (طبق شرایط موجود در [۱۷])

درصد اختلاف نسبی	اختلاف دو نتیجه	Re <sub>m</sub> مرجع [۱۷]	fRe کد توسعه داده شده	Re <sub>m</sub>
۰/۲۸	۰/۰۴	۱۴/۲۳	۱۴/۱۹	۰
۰/۱۳	۰/۰۲	۱۴/۴۲	۱۴/۴	۰/۵
۰/۲۰	۰/۰۳	۱۴/۶۲	۱۴/۵۹	۱
۰/۲۰	۰/۰۳	۱۴/۸۱	۱۴/۷۸	۱/۵
۰/۳۳	۰/۰۵	۱۵	۱۴/۹۵	۲
۰/۱۳	۰/۰۲	۱۵/۱۲	۱۵/۱	۲/۵

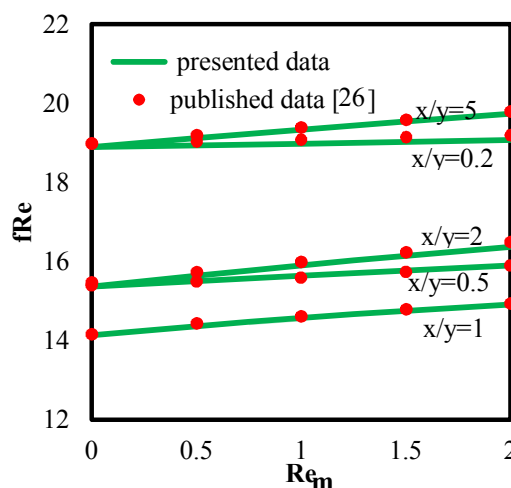


شکل ۵- مقایسه نتایج تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد نفوذپذیری سطح متخلخل برای مدل‌سازی حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۱۹] (برای چهار رینولدز دیواره مختلف، طول بی‌بعد ۰/۰۸ کانال و طبق شرایط موجود در [۱۹])

است. هدف اصلی این مقاله، بررسی اختلاف دو رژیم پیوسته و لغزشی است که در ادامه مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

### ۳-۲- نتایج رژیم پیوسته

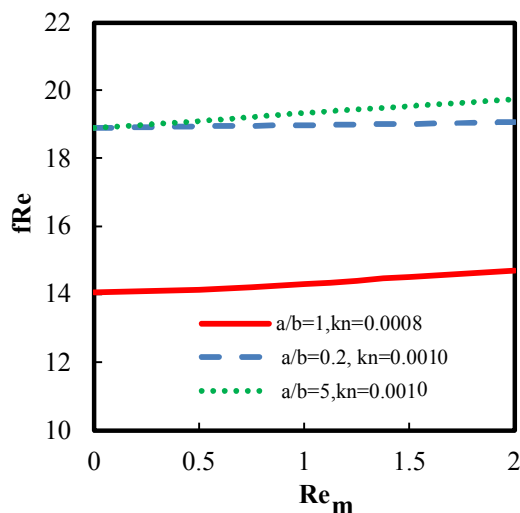
اشکال ۶ الی ۸ نتایج مدل‌سازی در رژیم پیوسته را به ترتیب برای ضریب اصطکاک، اختلاف فشار و سرعت متوسط، نشان می‌دهند. در این حالت با در نظر گرفتن مساحت ورودی



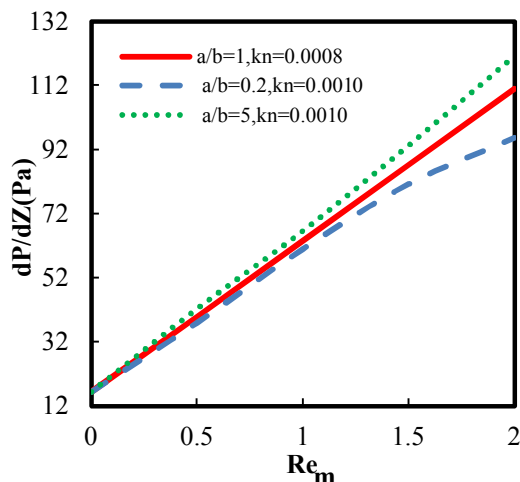
شکل ۴- مقایسه نتایج تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد نفوذپذیری سطح متخلخل برای مدل‌سازی حاضر با نتایج چاپ شده در [۲۶] (طبق شرایط موجود در [۲۶])

در شکل ۵ مقایسه نتایج تجربی [۱۹] با کد توسعه داده شده، آورده شده است. در حالت غیر متخلخل، یعنی وقتی که Re<sub>m</sub> برابر با صفر باشد، انطباق کاملی بین نتیجه حاضر و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد؛ اما با افزایش مقدار تخلخل این دو مقدار دارای اختلاف خواهند بود. مطابق با جدول ۴، حداکثر اختلاف بین نتایج حاضر با مقادیر تجربی برابر با ۸ درصد است. این امر نشانگر این است که رژیم پیوسته معتبر نبوده و نیازمند استفاده از رژیم‌های دیگر برای مدل‌سازی

متوسط برای نسبت‌های منظری ۰/۲ و ۵ به ترتیب ۳/۴۸ و ۴ برابر می‌شود. واضح است که با افزایش نفوذ سیال، باید سرعت متوسط هوا افزایش یابد تا هوا به صورت یکنواخت از ورودی محفظه به خروجی محفظه برسد. برای مقایسه سه نسبت منظری ارائه شده باید تغییر در مساحت دیواره متخلخل بررسی شود. وقتی که نسبت منظری ۰/۲ است، باید هوای وارد شده به ریزمحفظه زمان بیشتری را درون محفظه باشد و در نتیجه باید سرعت متوسط کاهش یابد.



شکل ۶- نتایج  $fRe$  رژیم پیوسته، برای مساحت سطح مقطع ورودی ثابت یک میکرومتر مربع

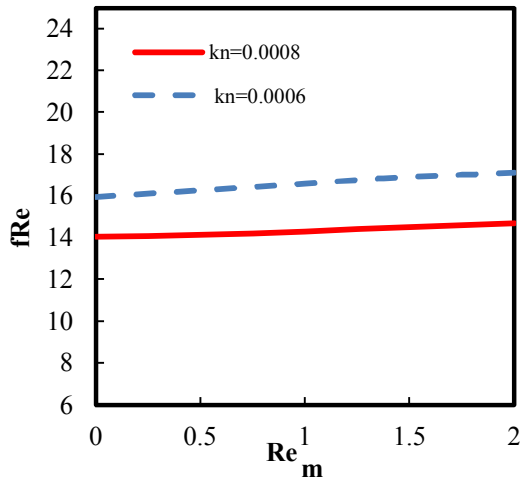


شکل ۷- نتایج اختلاف فشار رژیم پیوسته، برای مساحت سطح مقطع ورودی ثابت یک میکرومتر مربع

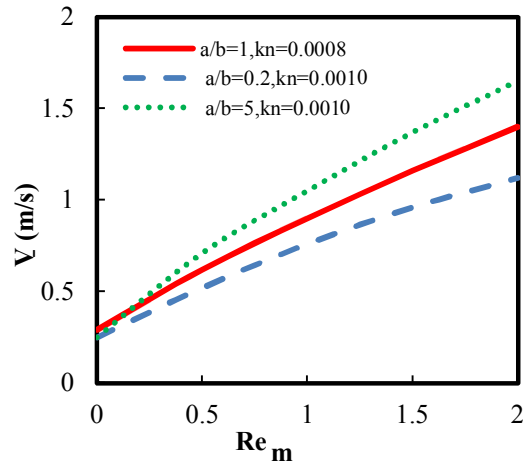
محفظه برابر با یک میکرومتر مربع و نسبت‌های منظری یک، ۰/۲ و ۵، مقادیر عدد نادسن به ترتیب ۰/۰۰۰۸، ۰/۰۰۱۰ و ۰/۰۰۱۰ بدست می‌آیند که در محدوده رژیم پیوسته می‌باشند. مطابق با شکل ۶ با افزایش مقدار نفوذپذیری سطح متخلخل، ضریب اصطکاک افزایش یافته که این مقدار به اختلاف فشار در طول محفظه و سرعت متوسط هوا بستگی دارد. هر چه مقدار  $Re_m$  بیشتر شود، به دلیل افزایش نفوذ جریان به سمت دیواره تخلخلی، ضریب اصطکاک به میزان ۴/۵ درصد (در نسبت منظری یک) افزایش خواهد یافت که این میزان در نسبت منظری ۵، برابر با ۴/۴۴ درصد است؛ همچنین در این شکل برای نسبت منظری ۰/۲، مقدار ضریب اصطکاک از ۱۸/۹۰ به ۱۹/۰۷ افزایش یافته که افزایش حدود یک درصدی را نشان می‌دهد. با تغییر نسبت منظری به ۵ و ۰/۲، ضریب اصطکاک، نسبت به حالت با نسبت منظری یک افزایش می‌یابد؛ همچنین در حالت با دیواره متخلخل ضریب اصطکاک در محفظه با نسبت منظری ۵ بیشتر از نسبت منظری برابر با ۰/۲ است که این امر به دلیل تغییر سطح مقطع است. در حالت کلی با تغییر نسبت منظری از ۰/۲ به ۱ و از ۱ به ۵ به دلیل تغییر مساحت دیواره متخلخل، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.

در شکل ۷ تأثیر نفوذ بر اختلاف فشار محفظه بررسی شده است. مطابق با این شکل، مقدار اختلاف فشار به دلیل افزایش نفوذ هوا افزایش یافته، بطوری که با افزایش دو واحد نفوذپذیری (از ۰ تا ۲ در نسبت منظری یک)، اختلاف فشار در طول محفظه از ۱۶/۳۸ به ۱۱۱ پاسکال افزایش می‌یابد؛ همچنین اختلاف فشار در نسبت‌های منظری ۰/۲ و ۵ به ازای افزایش دو واحد نفوذ هوا، به ترتیب ۴/۸۳ و ۶ برابر شده است. با توجه به افزایش مساحت دیواره متخلخل در نسبت منظری ۵، با توجه به اینکه باید مقدار نفوذ ثابت بماند، طبق رابطه (۷) باید اختلاف فشار بیشتر شود.

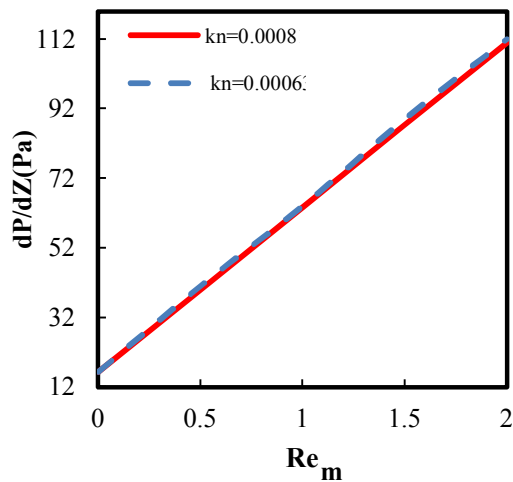
در شکل ۸ تأثیر نفوذ سیال از دیواره متخلخل روی سرعت متوسط نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش نفوذ هوا، به دلیل ایجاد یک جریان پایا، سرعت متوسط افزایش خواهد یافت. این افزایش برای نسبت منظری یک، برای ایجاد یک جریان پایا با قابلیت عبور از این محفظه از مقدار اولیه ۰/۲۹ تا ۱/۴۰ متر بر ثانیه است؛ همچنین با افزایش نفوذپذیری دیواره از ۰ تا ۲، سرعت



شکل ۹- نتایج  $fRe$  رژیم پیوسته، برای نسبت منبری ثابت یک



شکل ۸- نتایج سرعت متوسط رژیم پیوسته، برای مساحت سطح مقطع ورودی ثابت یک میکرومتر مربع



شکل ۱۰- نتایج اختلاف فشار رژیم پیوسته، برای نسبت منبری ثابت یک

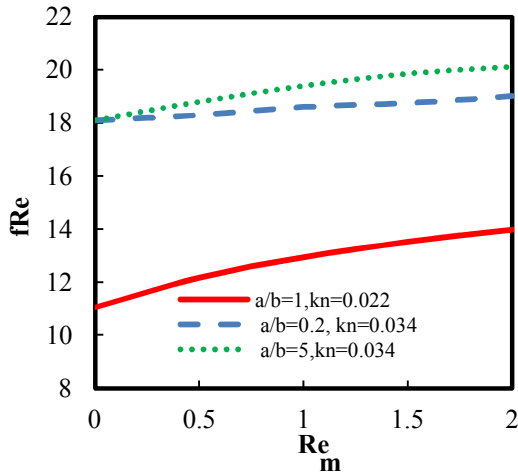
است. همان‌طور که ذکر شد با افزایش مساحت دیواره متخلخل، برای اینکه مقدار نفوذ ثابت باشد، سیال باید زودتر از محفظه عبور کند؛ بنابراین طبق رابطه (۷)، ضریب اصطکاک باید بیشتر شود و به تبع آن با افزایش اختلاف فشار، سرعت متوسط هم بیشتر می‌شوند (شکل ۱۱).

افزایش مساحت محفظه باعث می‌شود که در مقدار  $Re_m$  یکسان در مقایسه با حالت عدد ناسن بزرگ‌تر، سیال به دلیل افزایش مساحت دیواره متخلخل زودتر از محفظه عبور کند؛ بنابراین مقدار سرعت متوسط و اختلاف فشار با توجه به

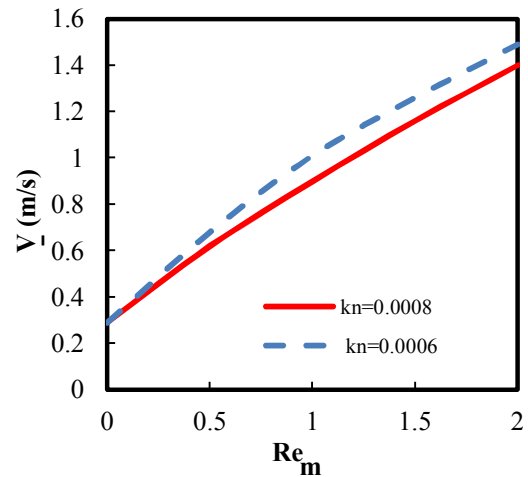
به طور کلی، در مساحت سطح مقطع ورودی ثابت و در نسبت منبری کوچک‌تر از یک مقدار ضریب اصطکاک افزایش و مقادیر سرعت متوسط و اختلاف فشار در مقایسه با نسبت منبری برابر با یک کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که در این حالت مقدار مساحت دیواره متخلخل کاهش پیدا کرده و مقدار نفوذ ثابت می‌ماند؛ بنابراین هوای وارد شده به ریزمحفظه زمان بیشتری را درون محفظه خواهد بود و باید سرعت متوسط آن کاهش یابد؛ بنابراین به تبعیت از سرعت، اختلاف فشار درون محفظه هم کاهش خواهد یافت.

برای مقایسه ضریب اصطکاک، اختلاف فشار و سرعت متوسط در دو عدد ناسن متفاوت در رژیم پیوسته، مساحت سطح مقطع به ترتیب ۵ و ۶/۷ میکرومترمربع در نظر گرفته شد. مقادیر عدد ناسن مربوط به این مساحت سطح مقطع ورودی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۶ و ۰/۰۰۰۸ به دست می‌آیند که از این مقادیر برای مقایسه جواب‌ها در دو عدد ناسن در رژیم پیوسته استفاده می‌شود. نتایج مقایسه بین این دو حالت در نسبت منبری برابر با یک، در شکل‌های ۹ تا ۱۱ که به ترتیب تاثیر نفوذ هوا را بر ضریب اصطکاک، اختلاف فشار و سرعت متوسط را نشان می‌دهد، آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش مساحت محفظه، ضریب اصطکاک به دلیل افزایش مساحت دیواره متخلخل، افزایش می‌یابد که این امر متأثر از رابطه (۱۲) است که به سرعت متوسط و اختلاف فشار مربوط می‌شود. در شکل ۱۰ تأثیر میزان نفوذ بر اختلاف فشار نشان داده شده

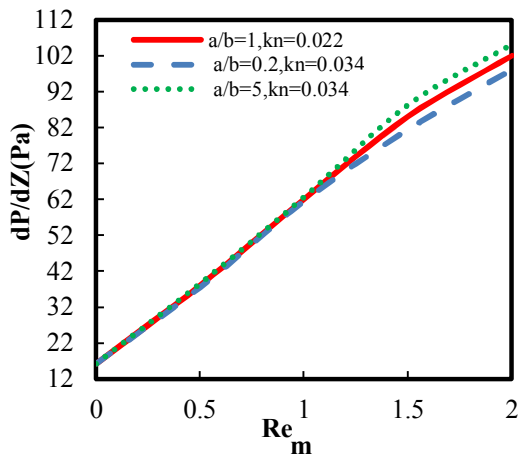




شکل ۱۲- نتایج  $fRe$  رژیم لغزش، برای مساحت سطح مقطع ورودی ثابت یک نانومتر مربع



شکل ۱۱- نتایج سرعت متوسط رژیم پیوسته، برای نسبت نسبت منظری ثابت یک



شکل ۱۳- نتایج اختلاف فشار رژیم لغزش، برای مساحت سطح مقطع ورودی ثابت یک نانومتر مربع

روابط (۸) و (۱۰) افزایش می‌یابند؛ همچنین با توجه به رابطه (۱۲)، ضریب اصطکاک با در نظر گرفتن افزایش سرعت متوسط و اختلاف فشار افزایش یافته است. در جدول ۵ نتایج عددی برای هر دو عدد نادسن گزارش شده است.

### ۳-۳- نتایج رژیم لغزش

در این حالت کمیت‌های هندسی طوری تعیین می‌شوند که محدوده عدد نادسن در رژیم لغزش قرار گرفته و سپس با به‌کارگیری شرایط مرزی مربوطه به حل مسئله پرداخته می‌شود. اشکال ۱۲ تا ۱۴ نتایج مدل‌سازی در رژیم لغزش را به ترتیب برای ضریب اصطکاک، اختلاف فشار و سرعت متوسط نشان می‌دهند.

جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی برای اعداد نادسن ۰/۰۰۰۸ و ۰/۰۰۰۶

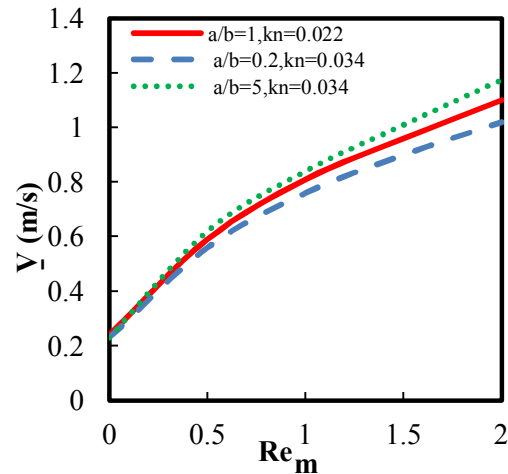
fRe	kn=۰/۰۰۰۸		kn=۰/۰۰۰۶		Re <sub>m</sub>
	$\frac{dP}{dZ}$ (Pa)	$\bar{V}$ (m/s)	fRe	$\frac{dP}{dZ}$ (Pa)	
۱۴/۰۶	۱۶/۳۸	۰/۲۹	۱۵/۹۴	۱۶/۳۸	۰
۱۴/۱۴	۳۹/۹۳	۰/۶۲	۱۶/۲۸	۴۱/۰۲	۰/۵
۱۴/۳۰	۶۳/۵۷	۰/۹۰	۱۶/۶۰	۶۴/۰۵	۱
۱۴/۵۰	۸۷/۳۰	۱/۱۶	۱۶/۹۱	۸۹/۰۵	۱/۵
۱۴/۷۰	۱۱۱	۱/۴۰	۱۷/۱۰	۱۱۲	۲

با در نظر گرفتن مساحت ورودی محفظه برابر با یک نانومتر مربع باشد، در نسبت منظری برابر با یک، عدد نادسن ۰/۰۲۲ می‌شود. در دو حالت دیگر نسبت منظری به ۰/۲ و ۵ تغییر داده شده، اما مساحت ورودی ثابت است که مقدار عدد نادسن در این حالات به دلیل ثابت بودن طول مشخصه برای هر دو برابر با ۰/۰۳۴ است.

در شکل ۱۲ با افزایش مقدار نفوذ سیال، ضریب اصطکاک افزایش پیدا می‌کند که این افزایش به دلیل وجود جریان یکنواخت شتاب‌دار است که با توجه به رابطه (۱۲) به سرعت متوسط و اختلاف فشار وابسته است. مقدار افزایش

تأثیرات تغییر عدد نادسن در رژیم لغزشی در نسبت منظری ثابت در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ برای ضریب اصطکاک، اختلاف فشار و سرعت متوسط نشان داده شده‌است. نسبت منظری ثابت و برابر با یک در نظر گرفته شده و مقادیر سطح مقطع محفظه به ترتیب چهار نانومتر مربع و یک نانومتر مربع در نظر گرفته شده که این مقادیر به ترتیب معادل با اعداد نادسن ۰/۱۱ و ۰/۲۲ می‌باشند.

طبق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که با افزایش مساحت محفظه، ضریب اصطکاک به دلیل افزایش مساحت دیواره متخلخل، افزایش می‌یابد که این امر مطابق با رابطه (۱۲) به



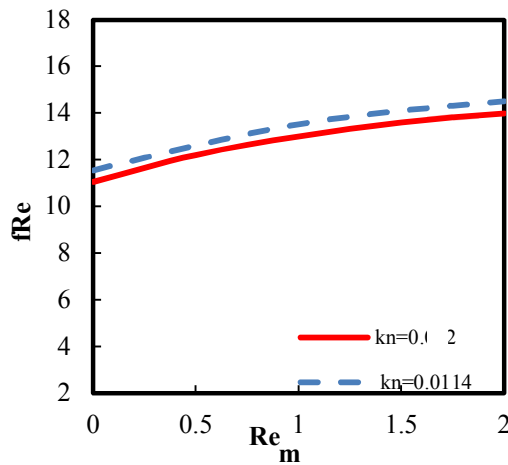
شکل ۱۴- نتایج سرعت متوسط رژیم لغزشی، برای مساحت سطح مقطع ورودی ثابت یک نانومتر مربع

ضریب اصطکاک در نسبت‌های منظری ۱، ۰/۲ و ۵، به ترتیب برابر با ۲۶/۶، ۵/۰۲، و ۹ درصد است.

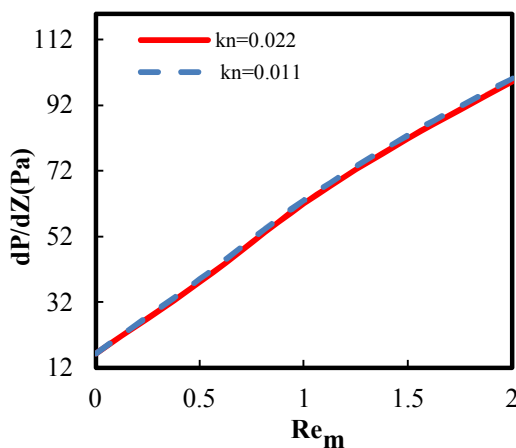
در شکل ۱۳ تأثیر نفوذ سیال بر اختلاف فشار نشان داده شده است. در نسبت منظری یک، مقدار افزایش اختلاف فشار ۸۲/۸۸ پاسکال بوده و درصد افزایش این پارامتر در نسبت‌های منظری ۰/۲ و ۵ به ترتیب ۵۰۴ و ۵۰۷ درصد است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش مقدار نفوذ سیال، اختلاف فشار افزایش می‌یابد. اختلاف فشار و سرعت متوسط به دلیل وجود جریان یکنواخت شتاب‌دار به صورت غیرخطی افزایش پیدا می‌کند.

در شکل ۱۴ تأثیر افزایش نفوذ جرم بر سرعت متوسط در رژیم جریان لغزشی نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش نفوذپذیری سطح بر اثر میزان تخلخل، میزان سرعت متوسط افزایش می‌یابد که این افزایش برای نسبت‌های منظری یک، ۰/۲ و ۵ به ترتیب ۴/۸، ۳/۴ و ۴/۱ برابر است. همان‌طور که ذکر شد با توجه به رابطه (۸) و (۱۰) با تغییر اختلاف فشار، سرعت متوسط نیز تغییر خواهد کرد که متأثر از تغییر زمان ماند سیال درون محفظه است.

همچنین همان‌طور که در اشکال ۱۲ تا ۱۴ دیده می‌شود، در اعداد نادسن برابر و در نسبت‌های منظری متفاوت، با افزایش مقدار نفوذ سیال ضریب اصطکاک، سرعت متوسط و اختلاف فشار افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵- نتایج fRe رژیم لغزشی، برای نسبت نسبت منظری ثابت یک

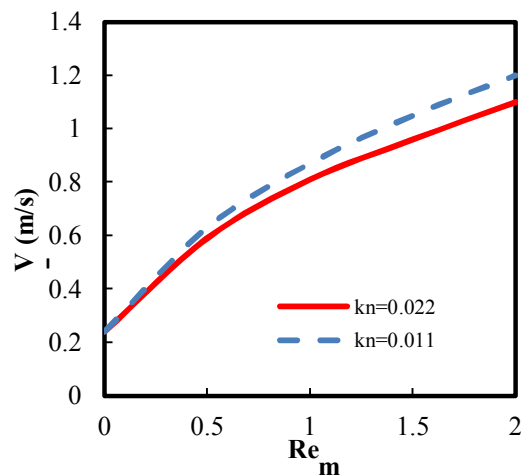


شکل ۱۶- نتایج اختلاف فشار رژیم لغزشی، برای نسبت نسبت منظری ثابت یک

پیوسته و لغزشی برای سه کمیت ضریب اصطکاک، افت فشار و سرعت متوسط به ترتیب در اشکال ۱۸، ۱۹ و ۲۰ رسم شده است.

در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که با افزایش نفوذپذیری، ضریب اصطکاک برای رژیم پیوسته، بیشتر از رژیم لغزشی پیش‌بینی می‌شود که این افزایش به دلیل تأثیر شرایط مرزی دیواره بر جریان است.

همچنین با توجه به شکل ۱۹، اختلاف فشار بصورت نامحسوس در رژیم جریان لغزش بیشتر از رژیم جریان پیوسته است؛ به طوری که اختلاف فشار و سرعت متوسط در رژیم لغزش به ترتیب ۱ و ۵ درصد بیشتر از رژیم پیوسته است. مطابق با شکل ۲۰، رژیم جریان لغزشی سرعت متوسط



شکل ۱۷- نتایج سرعت متوسط رژیم لغزش، برای نسبت نسبت منظری ثابت یک

جدول ۶- نتایج شبیه‌سازی برای اعداد نادسن ۰/۰۲۲ و ۰/۰۱۱

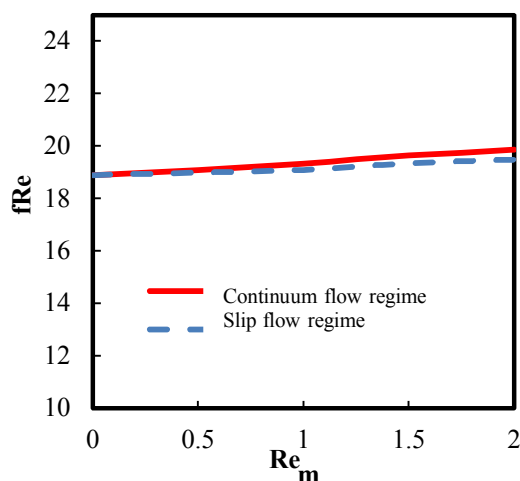
kn=۰/۰۱۱			kn=۰/۰۲۲			Re <sub>m</sub>
fRe	$\frac{dP}{dZ}$ (Pa)	$\bar{V}$ (m/s)	fRe	$\frac{dP}{dZ}$ (Pa)	$\bar{V}$ (m/s)	
۱۱/۵۵	۱۶/۳۸	۰/۲۴	۱۱/۰۵	۱۶/۳۸	۰/۲۴	۰
۱۲/۶۱	۳۹/۱۲	۰/۶۳	۱۲/۲۱	۳/۱۲	۰/۵۹	۰/۵
۱۳/۵۳	۶۳/۱۲	۰/۸۷	۱۳	۶۲/۱۴	۰/۸۱	۱
۱۴/۱	۸۳	۱/۰۵	۱۳/۶	۸۲	۰/۹۶	۱/۵
۱۴/۵۱	۱۰۰/۲	۱/۲	۱۴	۹۹/۳	۱/۱	۲

سرعت متوسط و اختلاف فشار مربوط می‌شود. در شکل ۱۶، تأثیر میزان نفوذ بر اختلاف فشار نشان داده شده است. همان‌طور که ذکر شد، با افزایش مساحت دیواره متخلخل، برای اینکه مقدار نفوذ ثابت باشد، سیال باید زودتر از محفظه عبور کند؛ بنابراین طبق رابطه (۷)، اختلاف فشار و سرعت متوسط باید بیشتر شود که این امر در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ دیده می‌شوند.

به طور کلی در مقدار  $Re_m$  یکسان، افزایش مساحت محفظه باعث می‌شود که در مقایسه با مساحت کوچکتر و عدد نادسن بزرگتر، سیال به دلیل افزایش مساحت دیواره متخلخل زودتر از محفظه عبور کند، پس با توجه به روابط (۸) و (۱۰)، مقدار سرعت متوسط و اختلاف فشار افزایش می‌یابند؛ همچنین با توجه به رابطه (۱۲)، ضریب اصطکاک با در نظر گرفتن افزایش سرعت متوسط و اختلاف فشار افزایش یافته است. در جدول ۶، نتایج شبیه‌سازی برای هر دو عدد نادسن گزارش شده است.

### ۳-۴- مقایسه بین دو رژیم پیوسته و لغزشی

برای مقایسه بین دو رژیم پیوسته و لغزشی از مقادیر مربوط به نسبت منظری ۵ و مساحت یک نانومتر مربع استفاده می‌شود که معادل با عدد نادسن برابر با ۰/۰۰۱ بوده که دقیقاً منطبق بر مرز دو رژیم پیوسته و لغزشی در جریان عبوری از ریزمحفظه است. نمایش مربوط به نتایج شرایط

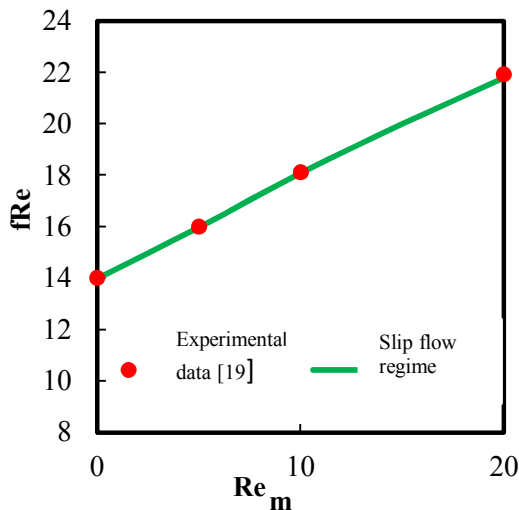


شکل ۱۸- مقایسه نتایج fRe برای دو رژیم پیوسته و لغزشی

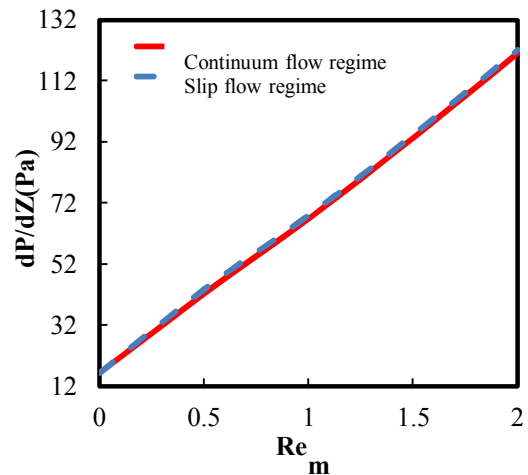
جدول ۷- نتایج شبیه‌سازی برای دو رژیم پیوسته و لغزشی

لغزشی			پیوسته			Re <sub>m</sub>
fRe	$\frac{dP}{dZ}$ (Pa)	$\bar{V}$ (m/s)	fRe	$\frac{dP}{dZ}$ (Pa)	$\bar{V}$ (m/s)	
۱۸/۹	۱۶/۳۸	۰/۲۵	۱۸/۹	۱۶/۳۸	۰/۲۵	۰
۱۸/۹۹	۴۲/۷۶	۰/۷۲	۱۹/۱	۴۲/۳۶	۰/۶۸	۰/۵
۱۹/۱۰	۶۸	۱/۱	۱۹/۳۴	۶۷	۱/۰۵	۱
۱۹/۳۵	۹۴/۲۹	۱/۴۵	۱۹/۶۴	۹۳/۳	۱/۳۸	۱/۵
۱۹/۴۹	۱۲۲/۲	۱/۸۱	۱۹/۸۶	۱۲۱/۲	۱/۷۲	۲

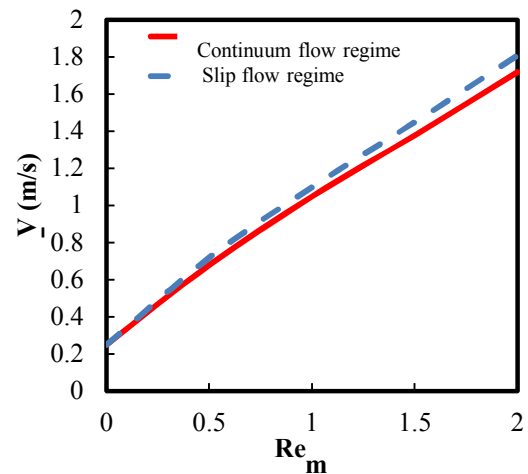
در شکل ۲۱، نتایج جریان رژیم لغزشی با نتایج تجربی [۱۹] مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، نتایج جریان لغزشی با نتایج تجربی مطابقت دارند که این امر تأیید کننده مدل‌سازی حاضر است. همچنین مقایسه شکل‌های ۵ و ۲۲ نشان می‌دهد، برای مدل‌سازی سیالات در محدوده عدد نادسن ۰/۰۱ و ۰/۱، استفاده از مدل‌سازی رژیم لغزشی دقیق‌تر است.



شکل ۲۱- مقایسه ضریب اصطکاک برای کد سه‌بعدی توسعه داده شده برای رژیم لغزشی و نتیجه تجربی [۱۹] (برای چهار رینولدز دیواره مختلف، طول بی‌بعد ۰/۰۸ کانال و طبق شرایط موجود در مرجع [۱۹])



شکل ۱۹- مقایسه نتایج اختلاف فشار برای دو رژیم پیوسته و لغزشی



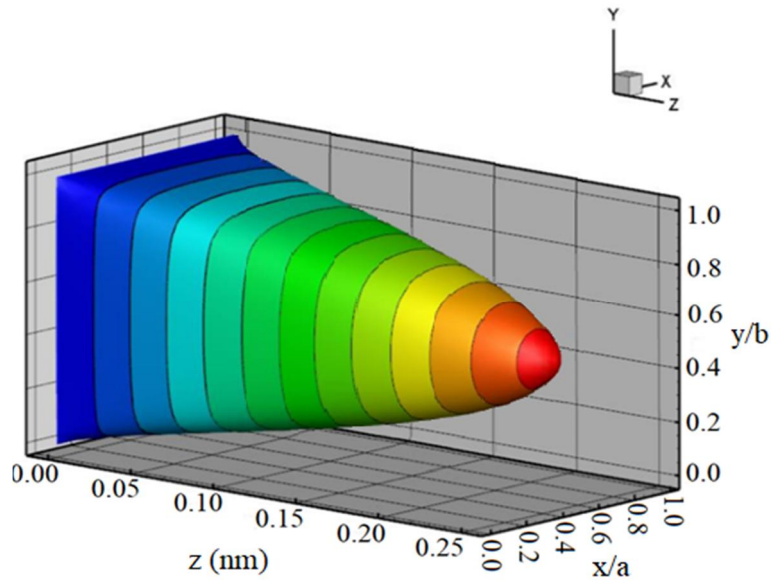
شکل ۲۰- مقایسه نتایج سرعت متوسط برای دو رژیم پیوسته و لغزشی

سیال را بیشتر از رژیم پیوسته پیش‌بینی می‌کند که دلیل آن شرایط مرزی به‌کار رفته و تطابق آن با ناپیوستگی در دیواره است.

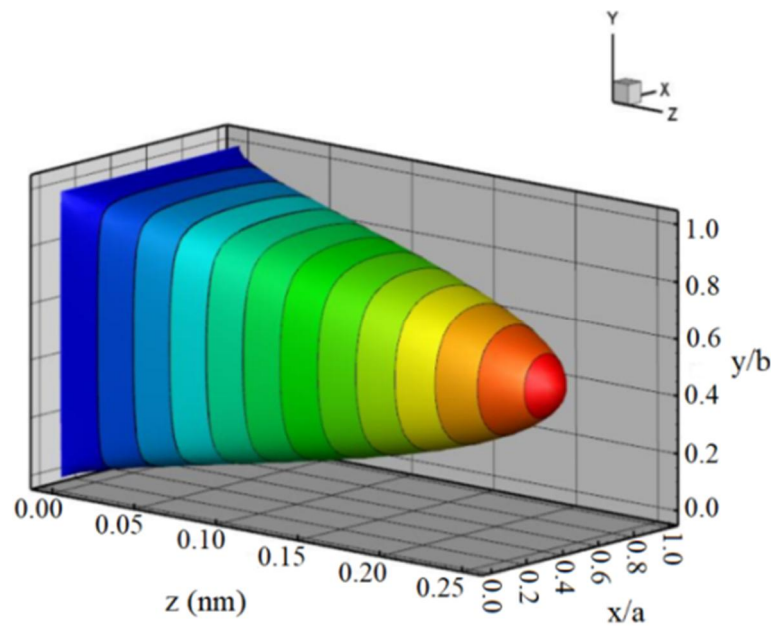
برای بررسی دقیق‌تر نتایج مقادیر عددی مربوط به کمیت‌ها در جدول ۷ آورده شده است. ضریب اصطکاک در رژیم لغزش ۰/۴۷ کمتر از رژیم پیوسته است و به این معناست که سیال در حالت لغزش اتلافات کمتری را در دیواره داشته است؛ بنابراین بطور کلی رژیم لغزش، نتایج نزدیک‌تری به حالت واقعی در یک محفظه با دیواره متخلخل درون پیل سوختی پلیمری را نشان می‌دهد.

همچنین با مقایسه دو کانتور رژیم لغزش و پیوسته، در یک لحظه خاص جریان لغزش در موقعیت  $z = 0.1910$  بوده و در همان لحظه جریان پیوسته در موقعیت  $z = 0.1814$  قرار دارد.

در شکل‌های ۲۲ و ۲۳، کانتور جریان برای دیواره غیرمتخلخل در رژیم پیوسته و لغزشی نشان داده شده است. این توصیف سه‌بعدی در رژیم جریان پیوسته نیز مشابه بوده با این تفاوت که سرعت متوسط جریان کمتر است؛



شکل ۲۲- کانتور جریان برای رژیم پیوسته با دیواره غیرمتخلخل



شکل ۲۳- کانتور جریان برای رژیم لغزش با دیواره غیرمتخلخل

		۴- جمع‌بندی
<p>لزجت سینماتیکی، <math>m^2/s</math></p> <p>چگالی، <math>kg/m^3</math></p> <p>دبی جرمی سیال نفوذ یافته، <math>kg/s</math></p> <p>ارتفاع و عرض محفظه، <math>m</math></p> <p>ضریب همسازی مومنوم</p> <p>مسیر آزاد مولکولی، <math>m</math></p> <p>لزجت دینامیکی، <math>Pa \cdot s</math></p> <p>دم، <math>K</math></p> <p>جهت اصلی</p> <p>ضریب پخش</p> <p>معرف متغیر وابسته اسکالر</p> <p>جمله چشمه</p> <p>مربوط به چشمه</p> <p>قطر هیدرولیکی، <math>m</math></p> <p>مساحت، <math>m^2</math></p> <p>مربوط به سیال نفوذ یافته</p> <p>مربوط به سیال اصلی</p> <p>شرایط مرجع</p>	<p><math>\nu</math></p> <p><math>\rho</math></p> <p><math>\dot{m}</math></p> <p><math>a, b</math></p> <p><math>\sigma</math></p> <p><math>\lambda</math></p> <p><math>\mu</math></p> <p><math>T</math></p> <p><math>n</math></p> <p><math>\Gamma</math></p> <p><math>\phi</math></p> <p><math>S_\phi</math></p> <p><math>S</math></p> <p><math>D_h</math></p> <p><math>A</math></p> <p>زیرنویس</p> <p><math>m</math></p> <p><math>s</math></p> <p><math>0</math></p>	<p>در این پژوهش شرایط مرزی لغزشی و پیوسته در ابعاد مختلف محفظه و میزان تخلخل مختلف مورد بررسی قرار گرفته که مهمترین نتایج بدست آمده از حل سه‌بعدی عددی آن به شرح زیر است.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• مقایسه نتایج کار حاضر با داده‌های آزمایشگاهی نشان دهنده، تطابق قابل قبولی است که درستی حل حاضر را تأیید می‌کند.</li> <li>• با در نظر گرفتن نسبت منظری یک با کاهش عدد نادسن، ضریب اصطکاک، سرعت متوسط و اختلاف فشار هم افزایش می‌یابد.</li> <li>• در رژیم لغزش برای سطح مقطع ثابت، با افزایش عدد نادسن مقدار ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد که این مقدار برای مستطیل با ارتفاع کم، بیشتر است.</li> <li>• در رژیم لغزش با افزایش عدد نادسن برای سطح مقطع ثابت، وقتی که نسبت منظری از ۵ به ۰/۰۱ کاهش پیدا می‌کند، سرعت متوسط و ضریب فشار، کاهش می‌یابد.</li> <li>• با در نظر گرفتن رژیم لغزشی درون محفظه، با کاهش عدد نادسن مقدار ضریب اصطکاک و اختلاف فشار حدوداً ۵ درصد دقیق‌تر محاسبه می‌شوند.</li> <li>• موقعی که عدد نادسن و نسبت منظری به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱ و ۵ باشند، تغییر رژیم جریان از رژیم پیوسته به لغزشی سبب افزایش اختلاف فشار و سرعت متوسط پیش‌بینی شده می‌شود.</li> <li>• کانتور جریان برای دیواره غیرمتخلخل درون رژیم پیوسته و لغزشی نشان می‌دهد، رژیم جریان پیوسته با رژیم لغزشی مشابه بوده با این تفاوت که سرعت متوسط جریان کمتر است.</li> </ul>
		۵- علائم و نشانه‌ها
		<p><math>x, y, z</math> مختصات دکارتی، <math>m</math></p> <p><math>u, v, w</math> سرعت سیال در جهت <math>x, y, z</math>، <math>m/s</math></p>

#### ۶- مراجع

- [1] Hassanzadeh H, Mansouri SH (2005) Efficiency of ideal fuel cell and carnot cycle from a fundamental perspective. J Energ Power Eng 219: 245-254.

- suction at one channel wall. *Int J Energ Res* 35: 670-689.
- [۱۵] احمدی ن، دادوند ع، میرزایی ا، رضازاده س (۱۳۹۷) بررسی عددی عملکرد پیل سوختی پلیمری دو محفظه با جریان گاز ناهمسو. مدل سازی در مهندسی ۴: ۱۶(۵۳).
- [16] Kinney RB (1968) Fully developed frictional and heat transfer characteristics of laminar flow in porous. *Int J Heat Mass Tran* 11: 1393-1401.
- [17] Hwang G, Cheng Y, Ng M (1993) Developing laminar flow and heat transfer in square duct with one walled injection and suction. *Int J Heat Mass Tran* 36: 2429-2440.
- [18] Yuan J, Rokni M, Sunden B (2001) Simulation of fully developed laminar heat and mass transfer in fuel cell ducts with different cross section. *Int J Heat Mass Tran* 44: 4047-4058.
- [19] Cheng Y, Hwang G (1995) Experimental studies of laminar flow and heat transfer in a one porous wall square duct with wall injection. *Int J Heat Mass Tran* 38: 3475-3484.
- [20] Kalteh M, Abbassi A, Bahrami, M (2012) An approximate model for slug flow heat transfer in channels of arbitrary cross section. *JSFM* 2(3): 1-7.
- [21] Larminie J, Dicks A (2003) Fuel cell system explained. 2nd edn. John Wiley & sons, USA.
- [۲۲] امینی ر، مقصودی ر، باصفت ن، توکلی م (۱۳۹۴) مدل سازی جریان در کانال با استفاده از تحلیل ایزوژئومتریک. مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۶-۱۵: ۴(۵).
- [23] Gordon H, III D (2003) Investigation of a combined heat and power fuel cell system for small scale residential applications. mechanical engineering, North Carolina State University.
- [24] With F (2010) Fluid mechanics. 7th edn. McGraw-Hill Higher Education, USA.
- [25] Zafariyan S, Fanaee S (2013) MHD mixed convective flow past a vertical plate embedded in a porous medium with radiation effects and convective boundary condition considering chemical reaction. *CUJSE* 1: 123-136.
- [26] DoostiAbukheyli A, Hassanzadeh H, Mirbozorgi S (2017) Pseudo 3D modeling of suction and injection effects on fully developed laminar flow and heat transfer in rectangular fuel cell channels. *J Power Energ Eng* 0: 1-16.
- [27] Jennings G (1988) The mean free path in air. *J Aerosol Sc* 2: 159-166.
- [۲۸] اسفه م، سعدالدین س، کاظمی ش، علیرضایی ع (۱۳۹۶) مطالعه آزمایشگاهی و ارائه مدلی جدید به منظور پیش‌بینی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال آب -اکسید آلومینیوم. مدل سازی در مهندسی ۹۰-۸۲: ۱۵(۴۸).
- [2] Hsieh S, Huang Y (2008) Measurements of current and water distribution for a micro-PEM fuel cell with different flow fields. *J Power Sourc* 183:193-204.
- [۳] شریعتی ز، افشاری ا (۱۳۹۳) بررسی عملکرد میدان‌های مختلف جریان خنک‌کاری با کانال‌های موازی در پیل سوختی غشا پلیمری. مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۲۱-۱۰۹: ۴(۳).
- [4] Kundu A, Jang J, Gil J, Jung C, Lee H, Kim S, Ku B, Oh Y (2007) Micro-fuel cells-Current development and applications. *J Power Sourc* 170: 67-78.
- [۵] شاهی ع، حاجیلری ن، کاظمی م (۱۳۹۸) شبیه‌سازی CFD پیل سوختی اکسید جامد پایه آندی. مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۳۵-۲۱۷: ۹(۱).
- [۶] فرزاد م، حسن‌زاده ح، صفوی نژاد ع، ابراهیمی م (۱۳۹۴) تحلیل انرژی، انرژی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید همزمان بر پایه پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای جهت کاربرد مسکونی. مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۲۸-۲۱۳: ۵(۴).
- [۷] پیرکندی ج، منفرد ر (۱۳۹۷) شبیه سازی ترمودینامیکی یک سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی با کاربرد در یک سیستم مستقل از شبکه. مدل سازی در مهندسی ۳: ۱۶(۵۳).
- [8] Scotti G, Kanninen P, Kalli T, Franssila S (2014) Simple Stacking Methods for Silicon Micro Fuel Cells. *Micromachines* 5:558-569.
- [9] Kandlikar G, Garimella S, Li D, Colin S, King R (2006) Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. 2nd edn. Elsevier, Netherlands.
- [10] Hassanzadeh H, Mansouri SH, Mehr-Abian M (2008) A two dimensional simulation of developing laminar heat and mass transfer in fuel cell channels with uniform suction of O2 and H2. *J Energ Power Eng* 222: 47-59.
- [۱۱] کاوه ر، سفید م، شمسی م (۱۳۹۸) بررسی عددی اختلاط دو سیال با لزجت متفاوت در یک میکروکانال در نسبت‌های منظری مختلف پره به روش شبکه بولتزمن. مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۰۲-۱۸۷: ۹(۱).
- [12] Bernardi DM, Verbrugge MW (2007) A mathematical model of a solid polymer electroiyte fuel cell. *J Electrochem Soc* 139: 2477-2491.
- [13] Hum B, Li X (2004) Two dimensional analysis of PEM fuel cells. *J Appl Electrochem* 34: 205-215.
- [14] Hassanzadeh H, Li X, Baschuk JJ (2011) Numerical simulation of laminar flow development with heat and mass transfer in PEM fuel cell flow channels having oxygen and hydrogen

- model in a porous coil for solar energy. MME 19(4): 855-863.
- [32] Fanaee S, Rezapour M (2020) The modeling of constant/ variable solar heat flux into a porous coil with concentrator. J Sol Energy Eng 142: 1-9.
- [33] <https://www.fortran.com/products-page/compilers/fortrantools-for-windows/>
- [29] Colin S, Lalone P, Caen R (2004) Validation of a Second-Order Slip Flow Model in Rectangular Microchannels. Heat Tran Eng 25:25-30.
- [30] Hoffmann A, Chiang T (Azimian A) (2000) Computational fluid dynamics for engineers. 2th edn. EESBook, USA.
- [31] Fanaee S, Rezapour M (2019) Analysis of the fluid-thermal regime with the developed brinkman