

## مطالعه عددی و اندازه‌گیری تجربی ضریب نفوذپذیری در محیط متخلخل فیبری با احتساب جزئیات هندسی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی

جزئیات هندسی متخلخل، بر پدیده‌های انتقال تأثیرگذار می‌باشد. اما شبیه‌سازی کل مسأله با احتساب این جزئیات امکان‌پذیر نیست. بنابراین، می‌توان بخشی از هندسه را به منظور مطالعه پارامترهای عملکردی، با در نظر گرفتن جزئیات شبیه‌سازی نمود. در مطالعه‌ی حاضر، با تصویربرداری میکروسکوپی، پارامترهای ساختاری تعیین و الگوریتم تولید آرایش فیبرها، ارائه شد. با حل عددی معادلات ناویر-استوکس و فرض پیوستگی جریان، تأثیر پارامترهای هندسی بررسی گردید. برای اعتبارسنجی، نفوذپذیری محیط اندازه‌گیری شد. با افزایش کسر حجمی جامد و زاویه‌ی بین راستای جریان و محور فیبرها از میزان نفوذپذیری کاسته شد. همچنین با افزایش قطر فیبرها نفوذپذیری محیط افزایش یافت.

سیدمصطفی حسینعلی پور<sup>۱</sup>  
استاد

محمد مهدی نمازی<sup>۲</sup>  
دانشجوی دکترا

علی مدرسی<sup>۳</sup>  
کارشناسی ارشد

ایمان قاسمی مرزبالی<sup>۴</sup>  
کارشناسی ارشد

واژه‌های راهنما: محیط متخلخل فیبری، تولید هندسه متخلخل، نفوذپذیری، شبیه‌سازی عددی، اندازه‌گیری تجربی.

### ۱- مقدمه

جزئیات موجود در هندسه محیط متخلخل شامل نوع و نحوه توزیع خلل و فرج، تأثیر قابل توجهی بر جریان سیال، انتقال حرارت و انتقال جرم خواهد داشت. بنابراین در نظر گرفتن جزئیات هندسی ضمن شبیه‌سازی عددی پدیده‌های انتقال، ضروری می‌نماید. اما با وجود پیشرفت رایانه‌ها، همچنان امکان در نظر گرفتن تمام جزئیات در کل دامنه حل وجود ندارد و هزینه محاسباتی بالایی به دنبال خواهد داشت. یک روش مناسب برای غلبه بر این محدودیت، شبیه‌سازی بخش کوچکی از هندسه با در نظر گرفتن جزئیات و استخراج پارامترهای عملکردی معادل در این مقیاس می‌باشد. در این صورت ضمن کاهش هزینه‌های محاسباتی، اثر جزئیات هندسی نیز دخیل می‌شود. از جمله پارامترهای عملکردی جهت بررسی رفتار محیط متخلخل به روش فوق، می‌توان به ضرایب نفوذپذیری و انتقال حرارت معادل اشاره نمود.

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران Alipour@iust.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران mm\_namazi@mecheng.iust.ac.ir

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران alimodarre30@yahoo.com

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران i.ghassemi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۰۹، تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۵

در محیط متخلخل فیبری، خلل و فرج از روی هم انباشته شدن فیبرها با قطری از مرتبه میکرومتر یا کمتر، تشکیل می‌شود. نحوه توزیع فیبرها به روند تولید و نیز نوع کاربرد بستگی دارد. از این نوع محیط متخلخل در عایق‌های حرارتی استفاده می‌شود. همچنین برخی از انواع خاص آن که دارای سطح ویژه<sup>۱</sup> بالایی هستند، به عنوان پایه کاتالیست کاربرد دارند [۱]، [۲] و [۳].

مطالعه روی این سیستم‌ها از سال (۱۳۸۸) در آزمایشگاه انرژی آب و محیط زیست دانشگاه علم و صنعت ایران آغاز شده است [۴-۱۱]. یکی از مهم‌ترین بخش‌های شبیه‌سازی هندسه محیط متخلخل فیبری، نحوه تولید منحنی هادی فیبرها می‌باشد. علاوه بر این، مشخصه‌های ساختاری دیگری از قبیل توزیع زاویه‌ای فیبرها، میزان اعوجاج و قطر آن‌ها نیز بر خواص عملکردی شبکه‌های فیبری تأثیر گذار خواهد بود. در این راستا کلاگ و فیلیپس<sup>۲</sup> به تولید هندسه متشکل از دو قطر غالب فیبرها به منظور محاسبه‌ی نفوذپذیری در محیط‌های فیبری تصادفی پرداختند [۱۲]. فائسل و همکاران<sup>۳</sup> با استفاده از پرتونگاری اشعه‌ی ایکس، محیط متخلخل فیبری یک تخته چوبی با چگالی کم را بازسازی نمودند. در مدل ایشان، فیبرها امکان نفوذ در هم را داشتند [۱۳]. وانگ و همکاران<sup>۴</sup> با فرض فیبرها به صورت استوانه‌هایی مستقیم، اثر طول آن‌ها را در یک هندسه سه بعدی بررسی کردند [۱۴].

هوآنگ و همکاران<sup>۵</sup> نیز به منظور یافتن اطلاعات آماری خواصی چون تخلخل، سطح مخصوص، پیچش و قطر حفره محیط متخلخل فیبری، از پرتونگاری مقطعی اشعه‌ی ایکس با رزولوشن بالا استفاده کردند [۱۵]. ارمبکم و همکاران<sup>۶</sup> بر اساس الگوریتم تصادفی  $\mu$  روندی برای تولید شبکه فیبری ارائه کردند [۱۶]. ضریب نفوذپذیری یکی از خاصیت‌های اساسی محیط‌های متخلخل به شمار می‌آید. این ضریب در جریان آرام از رابطه (۱) تحت عنوان قانون داریسی<sup>۸</sup> به دست می‌آید.

$$k = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (1)$$

با افزایش سرعت، اختلاف بین نتایج حاصل از این قانون و داده‌های اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد. فورچیمر این اختلاف را به اثرات اینرسی در سرعت‌های بالا مرتبط دانست و با افزودن ترم انرژی جنبشی به رابطه (۱)، رابطه‌ی داریسی- فورچیمر را ارائه نمود [۱۷]. مطالعات انجام شده در زمینه نفوذپذیری در محیط متخلخل فیبری منجر به ارائه روابط متعددی در این زمینه گردیده است. این روابط بسته به نوع چینش فیبرها (منظم یا نامنظم)، جهت حرکت جریان سیال (عمود بر فیبرها یا موازی با آن‌ها) و ابعاد محیط متخلخل (دوبعدی یا سه بعدی) طبقه‌بندی می‌شوند. اکثر روابط موجود، حاصل نتایج آزمایش‌های تجربی‌اند و یا بر مبنای مدل‌های دو بعدی<sup>۹</sup> به دست آمده‌اند.

<sup>1</sup> Specific surface area

<sup>2</sup> Clague and philips

<sup>3</sup> Faesel Et al.

<sup>4</sup> Wang et al.

<sup>5</sup> Huang et al.

<sup>6</sup> Arambakam et al.

<sup>7</sup>  $\mu$ -randomness

<sup>8</sup> Darcy's law

<sup>9</sup> 2D cell model

ویگینز<sup>۱</sup> و همکاران پیرامون نفوذپذیری محیط‌های فیبری با سیال‌های متفاوت مطالعاتی را انجام دادند [۱۸]. برون<sup>۲</sup> مقاومت پشم شیشه و فیبرهای کاغذ را در برابر نفوذ جریان هوای خشک اندازه‌گیری کرد [۱۹]. استنزل<sup>۳</sup> و همکاران اندازه‌گیری‌های مربوط به نفوذپذیری کولاژن را گزارش کردند [۲۰]؛ ویسواندهم و همکاران<sup>۴</sup> نیز با استفاده از پرتو ایکس برای تخمین شعاع فیبرهای کولاژن، به اندازه‌گیری نفوذپذیری آن پرداختند [۲۱]. دیویس<sup>۵</sup> نتایج آزمایش‌های تجربی برای محاسبه‌ی نفوذپذیری ساختارهای فیبری لایه‌ای را در قالب یک رابطه ارائه کرد [۲۲]. کوابارا<sup>۶</sup> به مطالعه‌ی تحلیلی و دو بعدی فیلتراسیون هوا پرداخت.

مشکل مدل کوابارا همانند سایر مدل‌های دو بعدی آن است که تخمین کمی از نفوذپذیری محیط‌های فیبری سه بعدی واقعی می‌دهد [۲۳]. اسپیلمن<sup>۷</sup> و گورن<sup>۸</sup> مجموعه‌ای از روابط برای نفوذپذیری در ساختارهای سه‌بعدی و لایه‌ای ارائه دادند [۲۴]. اوگورودنیکوف<sup>۹</sup> رابطه‌ای تجربی برای پیش‌بینی نفوذپذیری محیط‌های متخلخل نانوفیبری ارائه داد [۲۵]. سنگانی و آکریووس<sup>۱۰</sup> رابطه‌ای برای نفوذپذیری در جریان‌های عمود بر فیبرهای موازی با هم ارائه کردند. از این رابطه برای محیط‌های فیبری تا کسر حجمی جامد ۰/۳ نتایج قابل قبولی به دست آمد [۲۶]. دروموند و طاهر<sup>۱۱</sup> نیز رابطه‌ای برای محاسبه‌ی نفوذپذیری در جریان‌های موازی با فیبرها پیشنهاد دادند. رابطه ایشان برای هندسه‌هایی تا کسر حجمی جامد ۰/۷ معتبر بود [۲۷].

جکسون و جیمز<sup>۱۲</sup> برای محاسبه‌ی میزان نفوذپذیری، اثر کسر حجمی جامد محیط متخلخل را نیز وارد رابطه کردند [۲۸]. برون<sup>۱۳</sup> مدل دو بعدی کوابارا برای محاسبه افت فشار سیال هنگامی که شرط لغزش روی دیواره اعمال شود را اصلاح نمود [۲۹]. حسینی و تفرشی<sup>۱۴</sup> با شبیه‌سازی محیط نانوفیبری و در نظر گرفتن شرط لغزش روی دیواره‌ی فیبرها، با تعریف یک ضریب تصحیح و وارد کردن آن در روابط موجود برای نفوذپذیری محیط متخلخل فیبری با عدد نادسن صفر، روابط را برای استفاده در اعداد نادسن بزرگ‌تر، تصحیح نمودند [۳۰]. جاگاناتان و همکاران<sup>۱۵</sup>، ضمن بازسازی تصاویر سه بعدی از تصاویر دو بعدی محیط فیبری حقیقی، مشاهده نمودند که مدل‌های دو بعدی میزان نفوذپذیری ساختارهای سه بعدی را مخصوصاً در کسرهای حجمی جامد بالا، کمتر از میزان شبیه‌سازی پیش‌بینی می‌کنند [۳۱].

<sup>1</sup> Wiggins

<sup>2</sup> Brown

<sup>3</sup> Stenzel

<sup>4</sup> Viswanadham et al.

<sup>5</sup> Davies

<sup>6</sup> Kuwabara

<sup>7</sup> Spielman

<sup>8</sup> Goren

<sup>9</sup> Ogorodnikov

<sup>10</sup> Sangani and Acrivos

<sup>11</sup> Drummond and Tahir

<sup>12</sup> Jackson and James

<sup>13</sup> Brown

<sup>14</sup> Hosseini and Tafreshi

<sup>15</sup> Jaganathan et al.

توماداکیس و رابرتسون<sup>۱</sup> با استفاده از روش برگرفته از قوانین هدایت الکتریکی، نفوذپذیری یک ساختار تصادفی از فیبرها را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان بیان نمودند که این روش، تخمین‌های بسیار خوبی از نفوذپذیری را در بسیاری از موارد حاصل می‌کند [۳۲]. ونگ و همکاران عنوان کردند که دست کم برای بازه‌ی طول فیبر بین ۱۰۰ تا ۷۵۰ میکرومتر، اندازه‌ی فیبر تأثیری بر میزان نفوذپذیری ندارد و برای جریان با رینولدز کمتر از واحد اثرات اینرسی در محاسبه نفوذپذیری، قابل صرف‌نظر کردن است [۱۴].

استیلیانوپولوس و همکاران<sup>۲</sup> شبکه‌های فیبری با درجات جهت‌گیری مختلف و ایزوتروپیک با کسر حجمی جامد بین ۰/۳٪ تا ۱۵٪ را با استفاده از روش المان محدود، مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از متوسط‌گیری حجمی، نتایج مربوط به جریان‌های موازی و متعامد بر یک فیبر را ترکیب کردند. این مدل با حل‌های تحلیلی موجود تا کسر حجمی جامد ۴۶٪ برای جریان موازی، و ۳۳٪ برای جریان جانبی مطابقت داشت [۳۳]. بران و همکاران<sup>۳</sup> در مورد تأثیر اندازه‌ی جزء حجمی نماینده<sup>۴</sup> بر خواص فیزیکی و هندسی بحث کردند [۳۴]. در مطالعه‌ی هوآنگ و همکاران نیز روندی مشابه صورت گرفت و تأثیر اندازه‌ی سلول بررسی شد [۱۵]. کلاگ و همکاران<sup>۵</sup>، برای از بین بردن اثرات ناهمگونی هندسی، دامنه‌ی شبیه‌سازی با اندازه‌ای بزرگ‌تر از طول برینکمن برینکمن (برابر با  $\sqrt{k}$  که  $k$  ضریب نفوذپذیری محیط می‌باشد) را به اندازه‌ی کافی بزرگ و مناسب عنوان کردند. طبق نتایج ایشان، افزایش دامنه شبیه‌سازی از ۱۰ برابر طول برینکمن به ۱۴ برابر این طول، تفاوتی کمتر از ۱۰٪ در محاسبات ایجاد می‌کند [۳۵].

در مطالعه حاضر به منظور ارائه یک روند ساده برای بررسی رفتار جریانی محیط متخلخل فیبری مورد استفاده در کاربرد پایه کاتالیست‌های احتراقی، کد ارائه شده توسط استیلیانوپولوس و همکاران [۳۳] توسعه داده می‌شود و اعتبارسنجی جهت استفاده از این هندسه در بررسی رفتار جریانی محیط مورد نظر انجام می‌شود. در گام نخست، برای شناخت دقیق محیط متخلخل فیبری مورد بررسی، پارامترهای ساختاری محیط از قبیل قطر فیبرها، میزان تخلخل محیط و نحوه‌ی توزیع و جهت‌گیری فیبرها در فضا با استفاده از تکنیک تصویر برداری معین می‌شود.

ضمن ارائه الگوریتم ساخت فیبرها و تشکیل هندسه متخلخل، جریان سیال در محیط متخلخل فیبری در مقیاس کوچک شبیه‌سازی شده، ضریب نفوذپذیری استخراج می‌گردد. ابعاد دامنه محاسباتی به صورتی انتخاب می‌گردد که امکان استفاده از آن به عنوان نماینده کل دامنه فیزیکی باشد. در واقع با این رویکرد، رفتار ماکروسکوپی سیستم از مکانیزم‌های موجود در مقیاس میکرو، به دست خواهد آمد. در ادامه ضمن اندازه‌گیری تجربی نفوذپذیری محیط مورد بررسی، به مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده و همچنین نتایج موجود در ادبیات فن پرداخته می‌شود تا صحت و دقت هندسه‌ی تولید شده بررسی گردد. سپس به بررسی اثر پارامترهای هندسی بر نفوذپذیری پرداخته می‌شود.

<sup>1</sup> Tomadakis and Robertson

<sup>2</sup> Stylianopoulos et al.

<sup>3</sup> Brun et al.

<sup>4</sup> Representative Volume Element (RVE)

<sup>5</sup> Clague et al.

## ۲- مجموعه تجربی و روند اندازه‌گیری

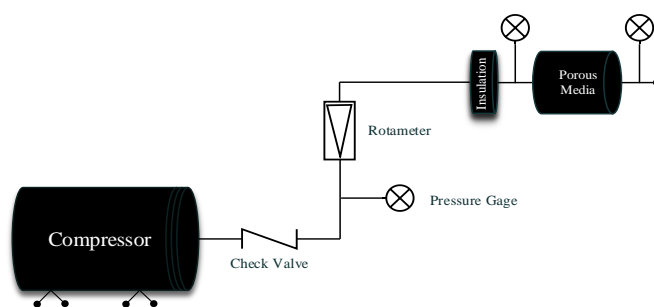
به منظور محاسبه نفوذپذیری محیط، مجموعه‌ای جهت اندازه‌گیری افت فشار و دبی سیال عبوری از محیط متخلخل فیبری طراحی گردید که شماتیک آن در شکل (۱) مشاهده می‌گردد.

اندازه‌گیری‌ها در رینولدزهای بسیار پائین (از ۰/۱۷ تا ۱ برای سرعت‌های ۰/۵m/s تا ۳m/s) صورت در دستور کار قرار گرفت. از طرفی همان‌طور که در شماتیک نیز نشان داده شده است، از یک لایه عایق فیبری قبل از ورود جریان به محیط اندازه‌گیری استفاده شد. هدف از این موضوع میرایی ناآرامی‌های جریان پیش از ورود به محیط بود. بنابر این جریان ورودی به محیط یک جریان آرام است. به همین دلیل می‌توان از رابطه دارسی (رابطه (۱)) برای یافتن ضریب نفوذپذیری بهره‌برد. در این صورت با مشخص بودن ویسکوزیته جریان عبوری و افت فشار در طول مشخصی از محیط مورد نظر، ضریب نفوذپذیری محاسبه می‌شود. در این جا از هوا به عنوان سیال عبوری از محیط متخلخل استفاده شد.

## ۳- تولید هندسه‌ی دامنه محاسباتی

به منظور تعیین ساختار محیط متخلخل مورد بررسی از عکس‌برداری الکترونی روبشی<sup>۱</sup> بهره برده شد. برای این منظور سه نمونه از سه بخش محیط متخلخل فیبری آلومینا تهیه و از نماهای قائم و جانبی هر کدام تصویر برداری شد که در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

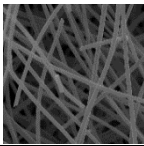
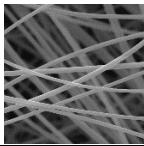
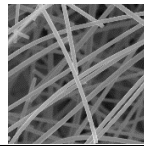
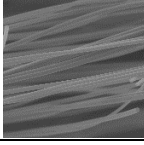
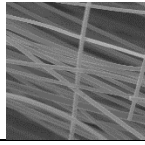
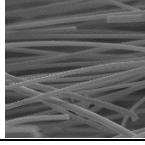
تصاویر نمای قائم بیان‌گر این موضوع است که توزیع زاویه‌ای فیبرها در صفحات قائم با تقریب خوبی یکنواخت بوده و فیبرها در راستای جریان و شار حرارتی به صورت تصادفی توزیع شده‌اند. همچنین از تصاویر نمای جانبی ساختار محیط تقریباً لایه‌ای گزارش شد. با بزرگ‌نمایی بیشتر تصاویر مشخص شد که فیبرها هیچ‌گونه نفوذی در یکدیگر نداشته و در نزدیک‌ترین حالت به هم، بر یکدیگر مماس هستند. علاوه بر این مشاهده شد که قطر فیبرها یکسان نیستند. مقادیر قطر از ۳ تا ۷ میکرون ثبت گردید. با توجه به این که اغلب فیبرها دارای قطری نزدیک به ۵ میکرون بودند، در محاسبات و شبیه‌سازی‌ها قطر یکسان ۵ میکرون در نظر گرفته شد. همچنین میزان تخلخل محیط ۰/۹۸۷ اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- شماتیک مجموعه طراحی شده به منظور اندازه‌گیری نفوذپذیری محیط.

<sup>۱</sup> SEM

جدول ۱- تصاویر SEM از نمونه‌ها در جهات مختلف (بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر نمونه واقعی).

شماره نمونه نما	۱	۲	۳
قائم			
جانبی			

با استخراج پارامترهای هندسی از تصاویر میکروسکوپ الکترونی، به منظور تولید هندسه متخلخل فیبری، الگوریتمی نوشته شد. هدف از این الگوریتم که در نرم افزار MATLAB تهیه گردید، تولید هندسه هر فیبر به صورت یک استوانه تو پر در محیط به همراه توزیع و جایابی فضایی آن در دامنه محاسباتی بود که پارامترهای زیر به عنوان ورودی این الگوریتم در نظر گرفته شد:

۱- قطر فیبرها

۲- نحوه توزیع فضایی فیبرها

۳- کسر حجمی جامد محیط

۴- ابعاد دامنه محاسباتی

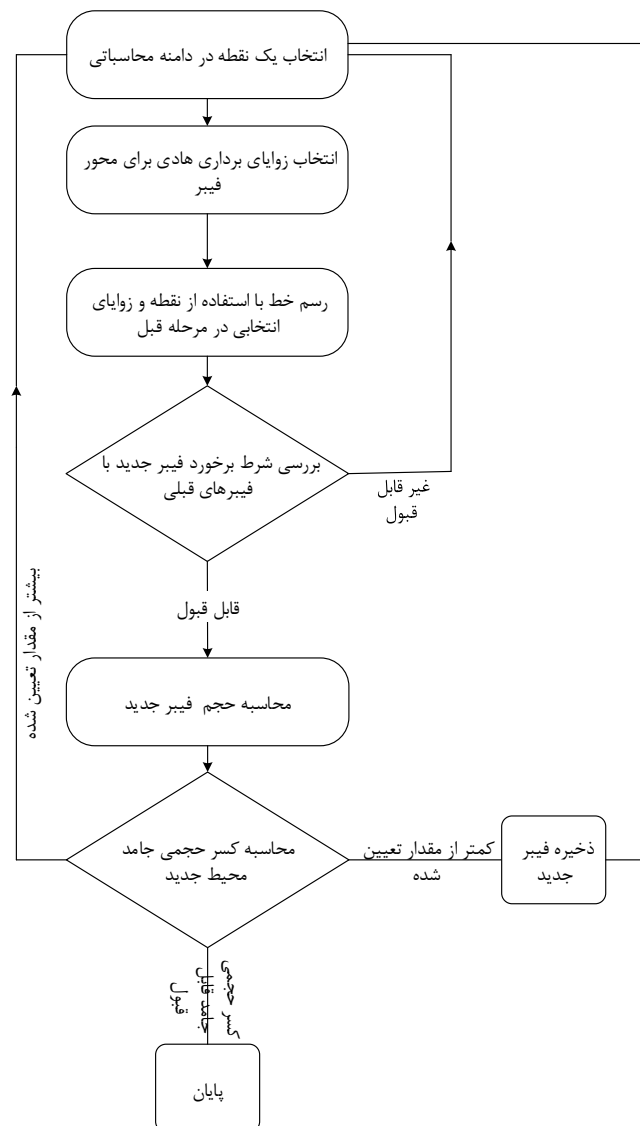
ابعاد سلول شبیه‌سازی باید به گونه‌ای تعیین گردد که نمونه به اندازه‌ی کافی بزرگ و نماینده‌ی ساختار و خواص هندسه‌ی کلی محیط باشد. با انتخاب ابعاد هندسه و رسم مکعب دامنه‌ی حل، یک نقطه در این فضا به صورت تصادفی با تابع توزیع یکنواخت انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از تابع توزیع بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی<sup>۱</sup>، دو زاویه‌ی  $\Phi$  و  $\theta$  انتخاب می‌شوند. این زوایا به ترتیب بیان‌گر جهت‌گیری فیبر در راستای افقی با محور X و در جهت قائم با محور Z هستند و راستای بردار هادی فیبر در فضا را معین می‌کنند. با مشخص بودن یک نقطه و راستای بردار هادی، خط محور فیبر رسم می‌گردد و نقاط برخورد با وجوه دامنه محاسباتی تعیین می‌شود. در ادامه وضعیت تداخل این فیبر با فیبرهایی که پیش‌تر تولید شده‌اند بررسی می‌گردد. در این جا می‌توان درصد فرو رفتگی فیبرها در هم را مشخص نمود.

در مطالعه حاضر با توجه به تصاویر محیط، فیبرها نهایتاً امکان مماس شدن با هم را دارند. بنابراین فاصله محور فیبر جدید با محور فیبرهای قبلی، نباید کم تر از  $d_f$  (قطر فیبر) باشد. در صورت ارضای این شرط، با دانستن نقاط ابتدایی و انتهایی فیبر (طول فیبر)، حجم فیبر تولیدی محاسبه و به مجموع حجم فیبرهای قبلی اضافه می‌گردد. در این صورت کسر حجمی جامد به دست می‌آید.

<sup>۱</sup> SEM

اگر این عدد از مقدار تعیین شده، بیش تر نبود، مشخصات مربوط به آن ذخیره می گردد. این روند آن قدر ادامه می یابد تا میزان کسر حجمی جامد به مقدار از پیش تعیین شده برسد. در شکل (۲) فلوچارت کد تولید هندسه ملاحظه می گردد. با مشخص شدن محور فیبرها در دامنه محاسباتی، امکان ایجاد استوانه با قطر مشخص (در این جا ۵ میکرون)، در دامنه محاسباتی وجود خواهد داشت.

برای این منظور در پایان الگوریتم یک فایل ژورنال حاوی دستورات تولید هندسه از روی محور هر فیبر برای نرم افزار گمبیت<sup>۱</sup> تهیه شد. با توجه به پیچیدگی و توزیع تصادفی فیبرها، به منظور شبکه بندی دامنه محاسباتی از نرم افزار آی سی ام<sup>۲</sup> استفاده شد.



شکل ۲- الگوریتم تولید محور فیبرها در دامنه محاسباتی.

<sup>1</sup> Gambit

<sup>2</sup> ICEM

## ۴- معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای انتخاب معادلات حاکم و همچنین شرایط مرزی روی سطح فیبرها، تعیین نوع جریان سیال (پیوسته یا آماری) ضروری است. برای این منظور عدد نادسن معیاری بی‌بعد برای تعیین نوع جریان حاکم می‌باشد (رابطه‌ی (۲)):

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (2)$$

که  $L$  طول مشخصه محیط و  $\lambda$  متوسط مسیر آزاد<sup>۱</sup> مولکول‌های سیال است. با در نظر گرفتن هوا به عنوان سیال عبوری، فشار اتمسفر و دمای اتاق، متوسط مسیر آزاد مولکولی برای مولکول‌های هوا برابر با  $m \times 10^{-7} \times 0.6679$  خواهد شد [۳۶].

با در نظر گرفتن طول برخورد متوسط<sup>۲</sup> به عنوان طول مشخصه [۱۴]، عدد نادسن برابر با  $17/5 \times 10^{-5}$  خواهد شد که بیان‌گر یک محیط پیوسته می‌باشد. برای طول مشخصه در محیط متخلخل، می‌توان از مجذور نفوذپذیری نیز استفاده نمود [۳۷]. برای این منظور مجذور نفوذپذیری با قطر فیبر  $5 \mu m$  از رابطه جکسون و جیمز، برابر با  $m \times 10^{-5} \times 1/57$  محاسبه می‌شود که منجر به عدد نادسن  $0/0 \cdot 85$  شده و مجدداً فرض پیوستگی محیط را تایید می‌نماید. اما با در نظر گرفتن شعاع فیبرها به عنوان طول مشخصه [۳۸]، عدد نادسن  $0/0 \cdot 267$  خواهد شد. با توجه به عدد نادسن به دست آمده، رژیم جریان حاکم لغزشی بوده و شرط مرزی لغزش روی سطوح فیبر حاکم خواهد بود. به منظور بررسی اثر لغزش روی دیواره‌ها، طبق مرجع [۳۰]، ضریب تصحیح نفوذپذیری با فرض پیوستگی برای محیط با قطر فیبر  $5 \mu m$  برابر با  $1/0 \cdot 17$  محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر نتایج به دست آمده از فرض عدم لغزش با نتایج حاصل از در نظر گرفتن لغزش روی دیواره‌ها برای مطالعه‌ی حاضر تنها  $1/7\%$  تفاوت خواهد داشت.

بنابراین با تقریب خوبی، فرضیه پیوستگی جریان معتبر بوده و می‌توان جریان را توسط معادلات ناویر-استوکس همراه با شرایط مرزی عدم لغزش روی دیواره‌ها توصیف نمود. جاگاناتان<sup>۳</sup> و تفرشی<sup>۴</sup> نیز در شرایطی مشابه، از شرط مرزی عدم لغزش در شبیه‌سازی‌ها بهره بردند. اگر اندازه‌ی نمونه به میزان کافی بزرگ باشد، انتخاب شرایط مرزی تقارن برای سطوح جانبی سلول شبیه‌سازی، بر نتایج تاثیری نخواهد داشت. چرا که جریان اساساً در جهت عمق صفحه است و جریان‌های جانبی ناچیز هستند [۳۱]. شرایط مرزی ورودی-سرعت و خروجی-فشار باید از نواحی که در آن‌جا گرادین فشار یا سرعت زیادی انتظار می‌رود، دور و از بالادست جریان بیشتر از ده برابر قطر فیبر باشد  $(L > 10 \times d_f)$  [۱۴]. جاگاناتان و همکاران این فاصله را به اندازه‌ی نصف ضخامت محیط فیبری عنوان کردند [۳۱].

اصل بقای جرم منجر به معادله پیوستگی جرم به صورت رابطه‌ی (۳) می‌شود:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

<sup>1</sup> Mean Free Path

<sup>2</sup> Mean intercept length

<sup>3</sup> Jaganathan

<sup>4</sup> Tafreshi



اصل بقای ممنتوم، منجر به سه معادله اسکالر برای مؤلفه‌های  $\rho u_i$  خواهد شد:

$$\frac{\partial(\rho g u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho g u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g g_i \quad (۴)$$

که در آن  $P$  فشار استاتیک،  $\tau_{ij}$  تانسور تنش و  $g_i$  مؤلفه‌های شتاب جاذبه می‌باشند. جاذبه تنها نیروی حجمی در نظر گرفته شده می‌باشد که در اینجا از آن صرف‌نظر می‌شود [۳۹]. برای توصیف میدان جریان، کوپل معادلات پیوستگی و ممنتوم پایا (مستقل از زمان)، با فرض چگالی ثابت برای هوا و صرف نظر از نیروی گرانش، از نرم افزار تجاری فلوئنت<sup>۱</sup> استفاده شد. شایان ذکر است که علاوه بر بررسی مقادیر باقی مانده‌ها<sup>۲</sup> در حل عددی معادلات در نرم افزار، شرط تساوی دبی جرمی ورودی و خروجی هوا از مرزهای ورودی و خروجی دامنه محاسباتی به عنوان شرط همگرایی حل در نظر گرفته شد.

## ۵- نتایج

### ۵-۱- آماده سازی دامنه محاسباتی

با توجه به ماهیت تولید هندسه که بر مبنای توزیع تصادفی می‌باشد، بررسی تکرارپذیر بودن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای این منظور پارامتر  $\Omega_{zz}$  بیان گر میزان جهت گیری متوسط فیبرها در امتداد محور  $Z$ ، به عنوان معیار تکرارپذیری در نظر گرفته شد [۳۳]. با ۱۵ بار تکرار الگوریتم تولید هندسه، حداکثر میزان انحراف این پارامتر از مقدار متوسط، کم تر از ۱۲٪ به دست آمد. همچنین با حل عددی معادلات در هندسه‌های تولیدی مذکور، ۱۰٪ انحراف در نتایج مشاهده گردید که با توجه به ماهیت تولید هندسه، قابل قبول می‌باشد. یک معیار برای انتخاب اندازه‌ی مناسب دامنه شبیه‌سازی به عنوان نماینده کل، معیار طول برینکمن<sup>۳</sup> برابر با  $\sqrt{k}$  می‌باشد.  $k$  نفوذپذیری محیط است و از روابط پیشنهاد شده دیویس<sup>۴</sup> و جکسون و جیمز<sup>۵</sup> محاسبه می‌گردد. اگر اندازه‌ی دامنه محاسبات بزرگ تر از ۱۴ برابر طول برینکمن باشد، به اندازه‌ی کافی برای حذف ناهمگونی‌های محلی بزرگ است [۱۴].

با در نظر گرفتن طول برینکمن، حداقل اندازه‌ی سلول محاسباتی در اینجا باید بزرگ تر از  $227\mu\text{m}$  باشد [۱۲]، [۳۱]. اما به منظور بررسی دقیق تر، محیط فیبری با مشخصات (قطر فیبر، تخلخل و جهت گیری یکسان) ثابت، در چهار اندازه  $250\mu\text{m}$ ،  $300\mu\text{m}$ ،  $350\mu\text{m}$  و  $400\mu\text{m}$  نیز بازسازی گردید. نفوذپذیری به دست آمده از اندازه‌ی  $300\mu\text{m}$  به بعد (ابعاد بزرگتر) تحت شرایط مرزی یکسان، کمتر از ۳٪ تغییر داشت. بنابراین این اندازه به عنوان ابعاد مناسب جهت انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. به منظور بررسی استقلال نتایج از مش، شبیه‌سازی با در نظر گرفتن ۶، ۷، ۱۰ و ۱۶ نقطه پیرامون هر فیبر، تکرار شد. نفوذپذیری بی‌بعد شده با مجذور شعاع فیبر ( $k/r^2$ ) به عنوان پارامتر مقایسه در نظر گرفته شد که نتایج در جدول (۲) مشاهده می‌شوند.

<sup>1</sup> Fluent

<sup>2</sup> Residuals

<sup>3</sup> Brinkman screening length

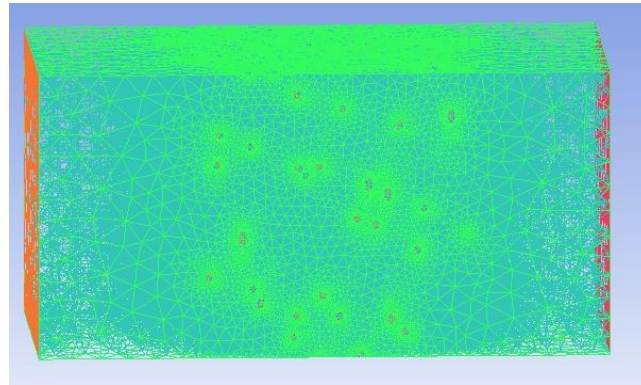
<sup>4</sup> Davies

<sup>5</sup> Jackson & James

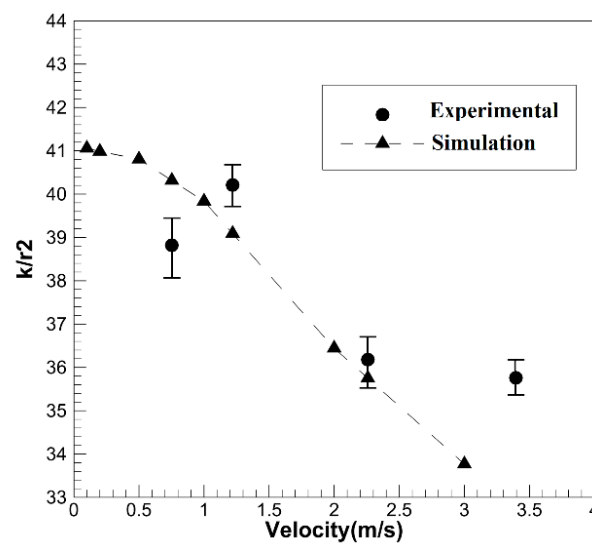
انتخاب ۱۰ نقطه پیرامون هر فیبر برای شبکه‌بندی دامنه محاسباتی منجر به تولید ۸۱۷۹۴۹۸ سلول در دامنه حل شد. با افزایش تعداد این نقاط (کاهش اندازه و افزایش تعداد سلول‌ها)، در حدود ۳٪ اختلاف در نتایج مشاهده شد. بنابراین با توجه به زمان انجام محاسبات و اختلاف کم در نتایج، تعداد ۱۰ نقطه پیرامون هر فیبر برای انجام شبیه‌سازی جریانی در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، ابعاد سلول محاسباتی در نواحی اطراف فیبرها ریزتر در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات مش‌های تولیدی برای بررسی نتایج نفوذپذیری

تعداد مش	تعداد شبکه پیرامون هر فیبر	نفوذپذیری بی‌بعد ( $k/r^2$ )
۴۱۲۳۹۴۸	۶	۴۲/۰۶
۵۶۱۰۳۷۱	۷	۴۱/۵۵
۸۱۷۹۴۹۸	۱۰	۴۱/۰۶
۱۵۲۰۲۷۲۵	۱۶	۴۰/۵۱



شکل ۳- شبکه بندی دامنه محاسباتی با در نظر گرفتن ۱۰ نقطه حول هر فیبر در نرم افزار ICEM



شکل ۴- مقایسه تغییرات نفوذپذیری بی‌بعد بر حسب سرعت ورودی سیال حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی.

## ۵-۲- اعتبارسنجی شبیه‌سازی

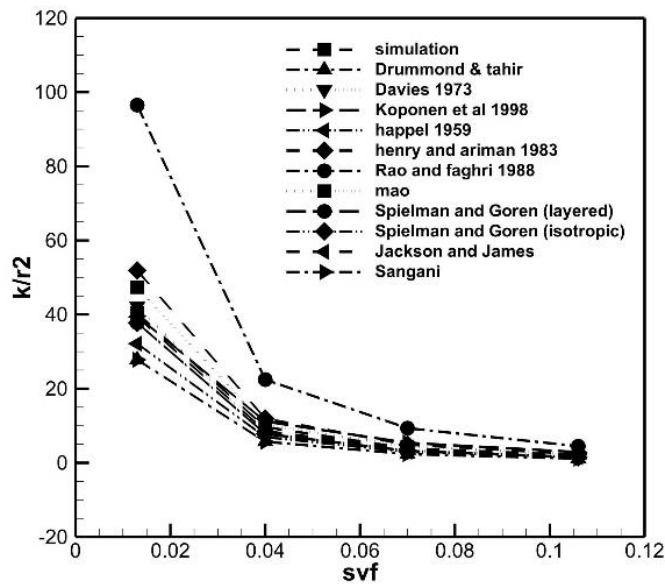
به منظور اعتبارسنجی به مدل، نفوذپذیری به ازای سرعت‌های ورودی مختلف از شبیه‌سازی استخراج گردید و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید (شکل (۴)). اندازه‌گیری‌ها در چهار سرعت مختلف و سه بار برای هر سرعت تکرار شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل تطابق نسبتاً خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده برای محیط مورد بررسی دارند. علاوه بر این، نفوذپذیری تا رینولدز واحد (سرعت ۰/۹۲ متر بر ثانیه) تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. شایان ذکر است با توجه به عدم حساسیت دبی سنج موجود، اندازه‌گیری در سرعت‌های بسیار پایین ممکن نبود. با افزایش سرعت و با وارد شدن اثرات اینرسی، از آن‌جا که اینرسی نیز بر افت فشار اثر گذار خواهد بود، نفوذپذیری کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که شبیه‌سازی در اینجا با فرض جریان آرام انجام شده است. با این حال با افزایش سرعت ورودی و به تبع آن افزایش اثرات اینرسی، دیگر این فرض صحیح نبوده و حل عددی باید با فرض جریان آشفتنه انجام پذیرد که این امر سبب ایجاد اختلاف نتایج اندازه‌گیری شده با نتایج شبیه‌سازی می‌باشد.

## ۵-۳- بررسی اثر کسر حجمی جامد

برای این منظور چهار هندسه با کسرهای حجمی جامد ۱/۳٪، ۰/۴٪، ۰/۷٪ و ۱۰/۶٪، اما با الگوریتم، ابعاد دامنه و قطر فیبر یکسان تولید شد. به منظور تسهیل در تولید هندسه با کسر حجمی بالاتر، قطر فیبر در تمامی نمونه‌ها ۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شد. انتظار می‌رود با افزایش کسر حجمی جامد، میزان نفوذپذیری کاهش پیدا کند چرا که با افزایش حجم جسم جامد در محیط، افت فشار به دست آمده در طول محیط بیشتر شده و به تبع آن از میزان نفوذپذیری کاسته خواهد شد. نحوه‌ی تغییرات نفوذپذیری بی‌بعد بر حسب کسر حجمی جامد در شکل (۵) با روابط موجود در ادبیات فن مقایسه گردیده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل‌های لایه‌ای مانند مدل سنگانی و مدل دراموند و تاهیر که با فرض جهت‌گیری فیبرها به صورت لایه لایه استوارند و توزیع جهت‌گیری فیبرها تنها در صفحه عمود بر راستای جریان می‌باشد، میزان نفوذپذیری را بسیار کمتر و به طور میانگین برای چهار کسر حجمی جامد، در حدود ۴۰ درصد کمتر از میزان به دست آمده از شبیه‌سازی گزارش می‌کنند. همچنین مدل‌های سه‌بعدی ایزوتروپیک مانند مدل هنری و آریمان، نفوذپذیری را در حدود ۲۳٪ بیش‌تر از نتایج به دست آمده پیش‌بینی می‌کنند. دلیل این موضوع این است که هندسه‌ی تولید شده نه لایه‌ای کامل و نه ایزوتروپیک است بلکه با میانگین زاویه‌ی ۳ درجه نسبت به راستای جریان، جایی بین این دو پیدا می‌کند.

به طور کلی می‌توان بیان داشت که با تغییر نوع توزیع فیبرها از حالت لایه‌ای عمود بر جریان به سمت توزیع ایزوتروپیک، با کاهش زاویه محور فیبرها با راستای جریان، مقاومت در برابر جریان کاهش یافته و به تبع آن نفوذپذیری افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی با روابط دیویس و کوپون و همکاران تطبیق خوبی را نشان می‌دهد. همچنین با بررسی مدل اسپیلمن و گورن لایه‌ای و ایزوتروپیک، عدد به‌دست آمده در شبیه‌سازی بین این دو قرار می‌گیرد که تایید کننده این موضوع می‌باشد که هندسه‌ی تولید شده ساختاری ما بین لایه‌ای و ایزوتروپیک دارد.



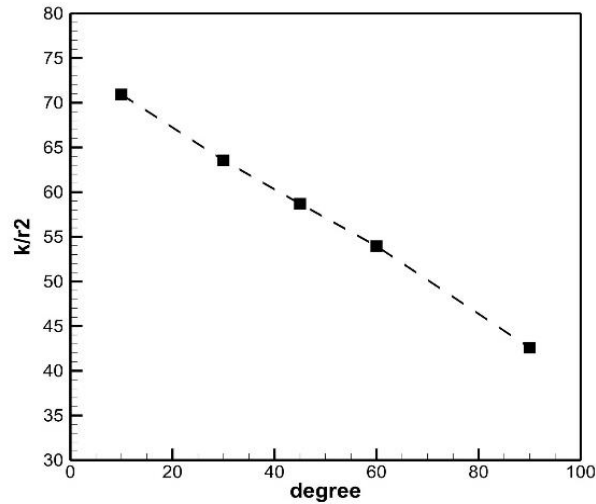
شکل ۵- مقایسه تغییرات نفوذپذیری بی بعد بر حسب کسر حجمی جامد با روابط موجود در ادبیات فن در سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه.

#### ۵-۴- بررسی اثر جهت‌گیری فیبرها

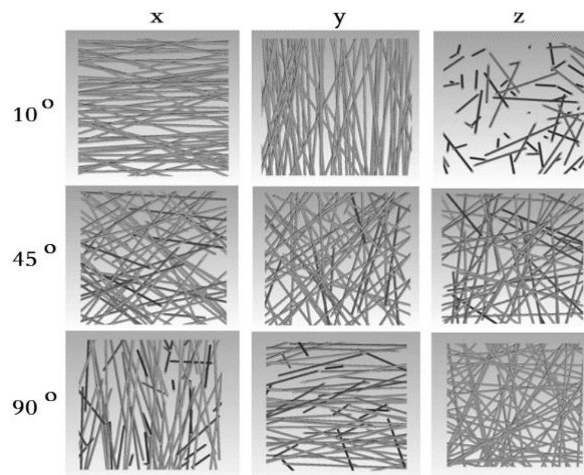
همان‌طور که در تصاویر محیط مورد بررسی مشاهده شد (جدول (۱))، فیبرها در صفحه‌ی عمود بر جهت جریان (در اینجا صفحه‌ی  $xy$ ) توزیع تقریباً یکنواختی داشتند. بنابراین در این قسمت در تمامی نمونه‌ها توزیع فیبرها در صفحه‌ی  $xy$  یکنواخت در نظر گرفته شد. آن‌چه که تغییر می‌کند، تنها زاویه‌ی جهت‌گیری فیبرها در امتداد جریان است که با یک تابع توزیع معین می‌شود. این تابع توزیع به صورت یک تابع توزیع نرمال است که با در نظر گرفتن ۱۰ درجه به عنوان انحراف از معیار برای تمامی نمونه‌ها، مقدار میانگین به ترتیب برابر با ۱۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه انتخاب گردید. هرچه تعداد فیبرهای بیشتری با محورهای در امتداد جریان وجود داشته باشد، افت فشار کمتر شده و در نتیجه نفوذپذیری محیط افزایش خواهد یافت.

هنگامی که زاویه‌ی محور فیبرها نسبت به امتداد جریان افزایش می‌یابد به این معنی است که فیبرها بیشتر متمایل به قرار گرفتن در صفحه‌ی عمود بر جریان می‌شوند و مقاومت بیشتری در برابر عبور جریان سیال از خود نشان می‌دهند (شکل (۶)).

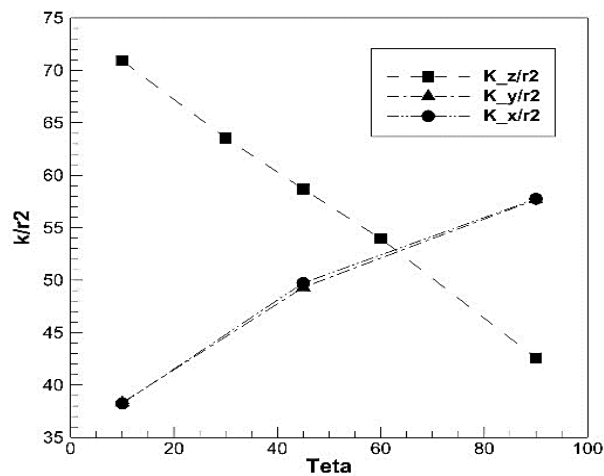
نفوذپذیری و در دو راستای دیگر (عمود بر راستای جریان) نیز با تغییر زاویه جهت‌گیری فیبرها در دامنه محاسباتی بررسی شد. به این ترتیب با حفظ شرایط هندسه‌های قبلی، تنها محل ورود و خروج سیال تغییر یافت. اگرچه با افزایش زاویه‌ی فیبرها با امتداد جریان (از  $۱۰^\circ$  به  $۹۰^\circ$ )، نفوذپذیری در همان راستا ( $Z$ ) کاهش می‌یابد، اما این تغییر به معنی افزایش تعداد فیبرهایی است که زاویه کمتری با راستاهای  $X$  و  $Y$  می‌سازند (شکل (۷)) و بنابراین نفوذپذیری در این جهات افزایش می‌یابد (شکل (۸)).



شکل ۶- تغییرات نفوذپذیری بی بعد محیط متخلخل فیبری با افزایش زاویه فیبرها نسبت به راستای جریان سیال.



شکل ۷- نحوه جهت گیری فیبرها در امتداد سه محور X، Y و Z برای محیط های با زاویه میانگین ۱۰، ۴۵ و ۹۰ نسبت به محور Z (امتداد جریان سیال).



شکل ۸- تغییر نفوذپذیری بی بعد در راستاهای مختلف با تغییر زوایای فیبرها با راستای جریان سیال (Z).

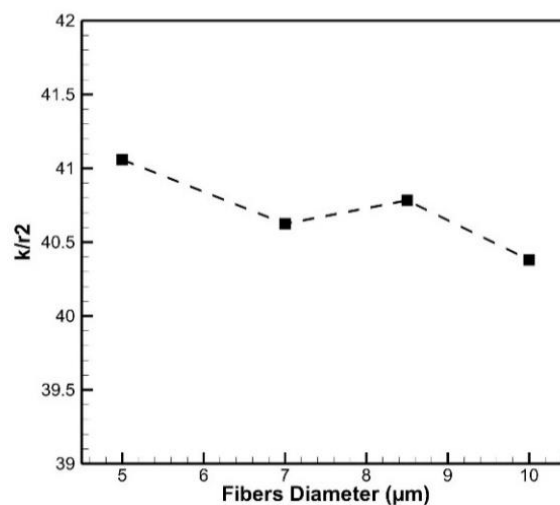
همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده شد، مقادیر نفوذپذیری در جهات X و Y بسیار نزدیک به هم هستند. این به علت توزیع یکنواخت فیبرها در صفحه‌ی XY می‌باشد و پیش‌تر به آن اشاره شد. همچنین روند کاهش نفوذپذیری در جهت Z با افزایش میانگین زاویه نسبت به امتداد جریان و افزایش در دو جهت دیگر کاملاً مشهود است به گونه‌ای که میزان نفوذپذیری برای نمونه با میانگین زاویه  $45^\circ$  در هر سه جهت تقریباً برابر می‌شود.

### ۵-۵- بررسی اثر قطر فیبرها

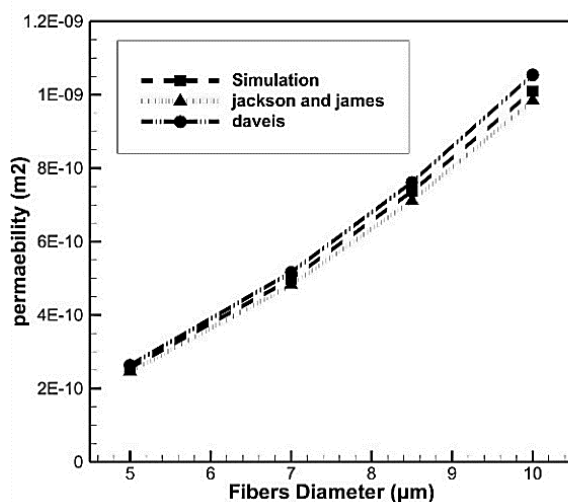
برای این منظور، بررسی اثر قطر فیبرها بر خواص محیط در کسر حجمی جامد ثابت (۱/۳٪) صورت پذیرفت و هندسه با قطرهای ۵، ۷، ۸/۵ و ۱۰ میکرومتر تولید شدند. همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، نفوذپذیری بدون بعد محیط (که طبق رابطه مستقل از قطر فیبر است)، با تغییر قطر فیبرها و احتساب ۲٪ انحراف نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بدون تغییر باقی مانده است.

اما نفوذپذیری محیط با افزایش قطر فیبرها روندی افزایشی دارد. این موضوع طبق روابط موجود در ادبیات فن نیز گزارش شده است که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود. برای توصیف این موضوع، فرض کنیم یک استوانه با شعاع مشخص R و طول L داشته باشیم. در صورت تقسیم این استوانه به n استوانه با طول مشابه L، به طوری که مجموع حجم استوانه‌های جدید، برابر با استوانه اولیه باشد، سطح در معرض جریان در حالت دوم،  $\sqrt{n}$  برابر حالت اول خواهد شد. از آنجا که  $n > 1$ ، بنابراین سطح جلویی در حالت دوم، بزرگ‌تر از حالت اول خواهد بود. اما مقاومت در برابر جریان با این سطح رابطه مستقیم دارد.

بنابراین با افزایش تعداد فیبرها در کسر حجمی ثابت (کاهش قطر فیبرها)، ضمن افزایش سطح جلویی، مقاومت در برابر جریان افزایش یافته و به بیان دیگر، نفوذپذیری کاهش خواهد یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در کسر حجمی جامد ثابت، هرچه قطر فیبرها افزایش یابد، از مقاومت در برابر جریان سیال کاسته شده و نفوذپذیری افزایش می‌یابد (شکل (۱۰)).



شکل ۹- نفوذپذیری بی‌بعد بر حسب قطر فیبرها در کسر حجمی جامد ۱/۳٪.



شکل ۱۰- نفوذپذیری محیط متخلخل فیبری بر حسب قطر فیبرها در کسر حجمی جامد ۱/۳٪.

## ۶- جمع بندی

در مطالعه حاضر به منظور بررسی اثر جزئیات هندسی بر رفتار جریان‌های محیط متخلخل فیبری، از تکنیک شبیه‌سازی در هندسه با ابعاد کوچک ولی احتساب جزئیات هندسی، استفاده شد. برای این منظور از ضریب نفوذپذیری بهره‌برده شد. با این رویکرد، از تحلیل مکانیزم‌های موجود در مقیاس میکرو، رفتار ماکروسکوپی سیستم بررسی می‌شود. به کمک تصویربرداری از محیط فیبری توسط میکروسکوپ الکترونی، پارامترهای ساختاری از قبیل قطر غالب و نحوه توزیع فیبرها در فضا تعیین گردید. محیط مورد نظر ساختاری تقریباً لایه‌ای داشت و قطر فیبرها از  $3\mu\text{m}$  تا  $7\mu\text{m}$  متغیر بود که در شبیه‌سازی با قطر متوسط  $5\mu\text{m}$  در نظر گرفته شد. برای تولید هندسه، با استفاده از یک الگوریتم، محل و نحوه قرارگیری محور فیبرها در یک فضای سه‌بعدی نمونه معین شد. با استفاده از معیار عدد نادسن و طول‌های مشخصه متفاوت، جریان داخل محیط پیوسته فرض شد. با حل معادلات جریان، ضریب نفوذپذیری استخراج گردید. نفوذپذیری با نتایج اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر و نیز نتایج موجود در ادبیات فن تطابق خوبی داشت.

با افزایش کسر حجمی جامد محیط متخلخل، حجم اشغال شده توسط جامد افزایش می‌یابد و نتایج نشان داد که در این صورت نفوذپذیری محیط در برابر جریان سیال کاهش می‌یابد. با بررسی اثر جهت‌گیری فیبرها بر نفوذپذیری، مشاهده شد که هر چه متوسط زاویه‌ی جهت‌گیری فیبرها نسبت به امتداد جریان کم‌تر باشد، محیط متخلخل فیبری از نفوذپذیری بزرگ‌تری برخوردار خواهد بود. با افزایش این زاویه، سطح مؤثر جامد مقابل جریان سیال بیشتر شده و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. همچنین اثر افزایش قطر فیبر بر خواص محیط نیز بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش قطر فیبرها و کم شدن تعداد فیبرها در کسر حجمی جامد ثابت، از سطح تماس فیبرها با سیال کاسته شده و به همین دلیل نفوذپذیری افزایش می‌یابد.

از نتایج این پژوهش می‌توان به عنوان ابزاری جهت بررسی اثر جزئیات هندسی محیط متخلخل فیبری به منظور مطالعه اثر این پارامترها بر رفتار جریان‌های در شرایط مختلف، بهره برد تا ضمن اصلاح پروسه‌های ساخت، محصولی با خواص بهینه با توجه به کاربرد تولید گردد.

## مراجع

- [1] Shahamiri, S. A., and Wierzba, I., "Modeling the Reactive Processes within a Catalytic Porous Medium", Applied Mathematical Modelling, Vol. 35, pp. 1915–1925, (2011).
- [2] Jodeiri, N., Wu, L., Mmbaga, J., Hayes, R.E., and Wanke, S.E., "Catalytic Combustion of VOC in a Counter-diffusive Reactor", Catalysis Today, Vol. 155, pp. 147–153, (2010).
- [3] Jodeiri, N., Mmbaga, J.P., Wu, L., Wanke, S.E., and Hayes, R.E., "Modelling a Counter-Diffusive Reactor for Methane Combustion", Computers and Chemical Engineering, Vol. 39, pp. 47–56, (2012).
- [4] Hosseinalipour, S.M., Madadelahi, M., Behravan, A., Namazi, M.M., and Ghadiri, Kh., "Computer Simulation of Performance of Flameless Catalytic Burners", Jokull Journal, Vol. 63, No. 10, (2013).
- [5] Hosseinalipour, S.M., Namazi, M.M., Behravan, A., Ghadiri, Kh., and Madadelahi, M., "Preparation and Performance Testing of the Radiative Catalytic Pad for Flameless Combustion of Natural Gas in Different Climate Conditions", Modarres Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 9, pp. 57-64, (2014).
- [6] Hosseinalipour, S.M., Behravan, A., Namazi, M.M., Madaelahi, M., and Baghsheikhi, M., "Experimental and Numerical Analysis of Heating the Fluid Passing Through the Tube using Radiative Catalytic Heaters", 15<sup>th</sup> International Conference on Fluid Dynamics, Bandar Abbas, Iran, (2013).
- [7] Hosseinalipour, S.M., Behravan, A., Namazi, M.M., Madaelahi, M., and Parvari, M., "2D Numerical Analysis of Radiative Catalytic Panel by using Finite Element Method", 15<sup>th</sup> International Conference on Fluid Dynamics, Bandar Abbas, Iran, (2013).
- [8] Hosseinalipour, S.M., Behravan, A., Namazi, M.M., Ghadiri, Kh., Madaelahi, M., and Parvari, M., "Identify Components and Experimental Study of the Radiative Catalytic Panels", 1<sup>st</sup> National Conference and Exhibition on Environment, Energy & Clean Industry, Tehran, Iran, (2013).
- [9] Hosseinalipour, S.M., Namazi, M.M., Behravan, A., Ghadiri, Kh., and Madadelahi, M., "An Introduction to the Structure and Experimental Study of Commercial Radiative Catalytic Panels", 5<sup>th</sup> National Conference on CFD Applications in Chemical & Petroleum Industries, Tehran, Iran, (2014).
- [10] Hosseinalipour, S.M., Madaelahi, M., Behravan, A., and Namazi, M.M., "3D Simulation of Radiative Catalytic Panel Assuming Equal Sherwood and Nusselt Numbers on Panel Surface", 5<sup>th</sup> National Conference on Fuel and Combustion, Tehran, Iran, (2013).
- [11] Hosseinalipour, S.M., Behravan, A., Namazi, M.M., and Ghadiri, Kh., "Experimental Study of Radiative Catalytic Panel in Different Climate Conditions", 22<sup>th</sup> International Conference ISME, Ahvaz, Iran, (2014).



- [12] Clague, D.S., and Phillips, R.J., "A Numerical Calculation of the Hydraulic Permeability of Three-dimensional Disordered Fibrous Media", *Physics of Fluids*, Vol. 9, Issue. 6, pp. 1562-1572, (1997).
- [13] Faessel, M., Delisee, C., Bos, F., and Castera, P., "3D Modelling of Random Cellulosic Fibrous Networks Based on X-Ray Tomography and Image Analysis", *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 131-140, (2005).
- [14] Wang, Q., Maze, B., Vahedi Tafreshi, H., and Pourdeyhimi, B., "Simulating Through-plane Permeability of Fibrous Materials with Different Fiber Lengths", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 15, pp. 855–868, (2007).
- [15] Huang, X., Wang, Q., Zhou, W., Deng, D., Zhao, Y., Wen, D., and Li, J., "Morphology and Transport Properties of Fibrous Porous Media", *Powder Technology*, Vol. 283, pp. 618–626, (2015).
- [16] Arambakam, R., Vahedi Tafreshi, H., and Pourdeyhimi, B., "Modeling Performance of Multi-component Fibrous Insulations Against Conductive and Radiative Heat Transfer", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, pp. 341–348, (2014).
- [17] Bejan, A., "*Convection Heat Transfer*", 4th Edition, Wiley, New Jersey, (2013).
- [18] Wiggins, E.J., Campbell, W.B., and Maass, O., "Determination of the Specific Surface of Fibrous Materials", *Can. J. Res.*, No. 17B, pp. 318–324, (1939).
- [19] Brown Jr., J.C., "Determination of the Exposed Specific Surface of Pulp Fibers from Air Permeability Measurements", *TAPPI*, No. 33, pp. 130–137, (1950).
- [20] Stenzel, K.H., Rubin, A.L., Yamayoshi, W., Miyata, T., Suzucki, T., Sohde, T., and Nishizawa, M., "Optimization of Collagen Dialysis Membranes", *Trans. Amer. Soc. Artif. Int. Organs*, No. 17, pp. 293–299, (1971).
- [21] Viswanadham, R., Agrawal, D.C., and Kramer, E.J., "Water Transport through Reconstructed Collagen Hollow-fiber Membranes", *J. Appl. Polym. Sci.*, No. 22, pp. 1655–1663, (1978).
- [22] Davies, C.N., "The Separation of Airborne Dust and Particles", *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers B1*, London, pp. 185–213, (1952).
- [23] Kuwabara, S., "The Forces Experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders of Spheres in a Viscous Flow at Small Reynolds Number", *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 14, No. 4, pp. 527–532, (1959).
- [24] Spielman, L., Goren, S.L., "Model for Predicting Pressure Drop and Filtration Efficiency in Fibrous Media", *Environmental Science and Technology*, Vol. 2, pp. 279–287, (1968).
- [25] Ogorodnikov, B.I., "Pressure-drop Across FP Fiber Filters under Gas Slip-flow and in Transition Regime", *Colloid Journal of the USSR*, Vol. 38, No. 1, pp. 168–172, (1976).
- [26] Sangani, A. S., and Acrivos, A., "Slow Flow Past Periodic Arrays of Cylinders with Application to Heat Transfer", *Int. J. Multiphase Flow*, No. 8, pp. 193-206, (1982).

- [27] Drummond, J. E., and Tahir, M. I., "Laminar Viscous Flow through Regular Arrays of Parallel Solid Cylinders", *Int. J. Multiphase Flow*, No. 10, pp. 515-540, (1983).
- [28] Jackson, G. W., and James, D. F., "The Permeability of Fibrous Media", *Can. J. Chem. Eng.*, No. 64, pp. 364-374, (1986).
- [29] Brown, R.C., "*Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*", Pergamon Press, Oxford, (1993).
- [30] Hosseini, S.A., and Vahedi Tafreshi, H., "Modeling Permeability of 3-D Nanofiber Media in Slip Flow Regime", *Chemical Engineering Science*, Vol. 65, pp. 2249–2254, (2010).
- [31] Jaganathan, S., Vahedi Tafreshi, H., and Pourdeyhimi, B., "A Realistic Approach for Modeling Permeability of Fibrous Media: 3-D Imaging Coupled with CFD Simulation", *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, pp. 244 – 252, (2008).
- [32] Tomadakis, M., and Robertson, J., "Viscous Permeability of Random Fiber Structures: Comparison of Electrical and Diffusional Estimates with Experimental and Analytical Results", *Journal of Composite Materials*, Vol. 39, Issue. 2, pp. 139-163, (2005).
- [33] Stylianopoulos, T., Yeckel, A., Derby, J., Luo, X., Shephard, M., Sander, E., and Barocas, V., "Permeability Calculations in Three-dimensional Isotropic and Oriented Fiber Networks", *Physics of Fluids*, Vol. 20, 123601, (2008).
- [34] Brun, E., Vicente, J., Topin, F., and Occelli, R., "Microstructure and Transport Properties of Cellular Materials: Representative Volume Element", *Adv. Eng. Mater.* No. 11, pp. 805–810, (2009).
- [35] Clague, D.S., and Phillips, R.J., "A Numerical Calculation of the Hydraulic Permeability of Three Dimensional Disordered Fibrous Media", *Physics of Fluids*, No. 9, pp. 1562-1572, (1997).
- [36] Maze, B., Vahedi Tafreshi, H., Wang, Q., and Pourdeyhimi, B., "A Simulation of Unsteady-state Filtration via Nanofiber Media at Reduced Operating Pressures", *Aerosol Science*, Vol. 38, pp. 550–571, (2007).
- [37] Beavers, G. S., and Sparrow, E. M., "Non-Darcy Flow through Fibrous Porous Media", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 36, Issue. 4, pp. 711-714, (1969).
- [38] Daryabeigi, K., Cunnington, G., Miller, S., and Knutson, J., "Combined Heat Transfer in High-porosity High Temperature Fibrous Insulations: Theory and Experimental Validation", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, (2010).
- [39] Deutschmann, O., "Computational Fluid Dynamics Simulation of Catalytic Reactors", Chapter 6 of *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, Wiley, Weinheim, Germany, (2008).

## فهرست نمادهای انگلیسی

تانسور مرتبه دوم جهت گیری فیبر	-	$\Omega_{zz}$
زاویه افقی و عمودی	°	$\phi, \theta$
ویسکوزیته	Pa.s	$\mu$
دبی جریان	$m^3/s$	$Q$
سطح مقطع	$m^2$	$A$
ضریب نفوذپذیری	$m^2$	$k$
شعاع فیبر	$m$	$r$
کسر حجمی جامد	-	$\varphi$
عدد نادسن	-	$kn$
قطر فیبر	$m$	$d_f$
طول مشخصه	$m$	$L$
مسیر آزاد متوسط	$m$	$\lambda$
طول متوسط نوسانی	$m$	$\bar{d}$
مؤلفه‌های سرعت	$m/s$	$u_i, u_j$
فشار استاتیک	Pa	$P$
تانسور تنش	$Pa/m^2$	$\tau_{ij}$

**Abstract**

Geometric details are very influential on transfer phenomena such as fluid flow and heat transfer in porous media. But in practice, the simulation of the whole problem is not possible by taking into account these details. To overcome this limitation, one can simulate a part of the media taking into account the geometric details to study the functional parameters. In the present study, structural parameters are determined using an electron microscopy (SEM), and the suitable algorithm for determining the fibers orientation in computational domain is developed. Navier-Stokes equations with continuity assumption in a small scale is solved numerically. Here permeability coefficient considered as functional parameter.

For validation, the permeability of the media is experimentally determined. Then the effect of geometric parameters was investigated. By increasing (solid volume fraction (SVF) and angles between the flow direction and the fiber axis ( $\theta$ ), the permeability decreased. Also, by increasing fiber diameter, the permeability increased.