نحوه استناد به این مقاله: اهدایی، محمد حسین؛ قلم‌باز، محمد (۱۳۹۵). جریان لغزشی و تاثیر آن روی افت فشار در نانوفیلترهای لیفی نازک. تبدیل انرژی، ۲(۳)، ۳۱-۳۸.

جریان لغزشی و تاثیر آن روی افت فشار در نانوفیلترهای لیفی نازک

محمد حسین اهدایی[۱] و محمد قلم‌باز[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

[۲] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: مهر ۹۵، بازنگری: آذر ۹۵، پذیرش: دی ۹۵

چکیده

هدف از انجام پژوهش حاضر، مدلسازی و آنالیز جذب نانوذرات در جریان لغزشی درون نانوفیلترهای لیفی نازک می‌باشد. جریان لغزشی ایجاد شده به دلیل ابعاد نانومقیاس فیبرها و در نتیجه بزرگ بودن عدد نادسن می‌باشد. در این پژوهش، ابتدا فیلتراسیون نانوذرات معلق در هوا در حضور یک اختلاف فشار و سرعت اولیه سیال در فیلترهای لیفی نازک مدلسازی شده است. در مدلسازی انجام شده، در دیدگاه اویلر، معادلات ناویر-استوکس برای تحلیل یک جریان دوفازی سیال-نانوذره رقیق حل گردید. در مرحله بعد، روش مناسب برای حل عددی معادلات حاکم بر حرکت نانوذرات و شبیه سازی مکانیزم نشست ذرات روی الیاف با توجه به نوع معادلات و نیروهای موثر در ابعاد نانو ارائه شده است. سپس، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده و شبیه‌سازی اعتبار سنجی شده است. همچنین به مقایسه‌ی وجود و عدم وجود شرط لغزش در مرزها روی افت فشار نهایی فیلتر پرداخته شده است. نتایج پژوهش حاضر، برای امکان سنجی طراحی فیلترهایی که با قطر کوچک الیاف در محدوده بین ۲۵ تا ۵۰۰ نانومتر می‌توانند نانوذرات را جذب نمایند، ضروری است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.ghalambaz@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: فیلتراسیون نانوآئروسل‌ها، نانوفیلتر لیفی نازک، جریان لغزشی، پخش براونی، افت فشار

۱- مقدمه

امروزه پیشرفت تکنولوژی و دستیابی انسان به روش‌های نوین برای استفاده از منابع طبیعی، علاوه بر تاثیرات مثبت آن در زندگی بشر، اثرات مخربی را نیز در پی خواهد داشت. به تازگی انسان متمدن به این تفکر رسیده است که شاید بتوان با استفاده از تکنولوژی مدرن و پیشرفته، به کمک منابع طبیعی و محیط زیست شتابد که از جمله می‌توان به فناوری نانو و کاربرد آن در حفظ محیط زیست اشاره کرد. یکی از کاربردهای علم نانو، کنترل انتشار آلاینده‌ها می‌باشد. آئروسل‌ها قطرات بسیار ریز مایع و یا ذرات جامد پراکنده در یک فاز گازی و بالاخص هوا هستند و گروه بسیار مهمی از آلاینده‌های هوا محسوب می‌شوند. از نمونه‌های آئروسل‌ها می‌توان به مه، بخار آتشفشان‌ها و یا چشمه‌های آب گرم، گرد و غبار و دود اشاره کرد. این ذرات معمولا قطری کوچکتر از یک میکرومتر دارند. متاسفانه مواجهه طولانی مدت با انواع خاصی از آئروسل‌ها می‌تواند برای سلامتی انسان بسیار خطرآفرین باشد. ذرات گرد و غبار، دسته‌ای از نانو آئروسل‌ها هستند که در صورت ورود به مجاری تنفسی انسان، در طولانی مدت باعث بیماری‌های خطرناکی چون شش سیاه می‌شوند. همچنین وجود این ذرات گرد و غبار در صنعت هم اثرات مخربی در پی خواهند داشت و موجب خرابی و پایین آمدن کارایی و عمر برخی ماشین‌آلات صنعتی چون توربین‌ها، کمپرسورها و دیگر تجهیزات مکانیکی می‌گردند. وقتی اندازه ذرات معلق در مقیاس میکرومتر باشد به راحتی توسط فیلترهای معمولی قابل حذف هستند، ولی وقتی ابعاد آنها مانند نانوریزگردها زیر میکرومتر باشد، ته نشین نمی‌شوند و فیلتر کردن آنها مشکل می‌گردد. برای غلبه بر این چالش و جلوگیری از ورود نانوریزگردها به بخش‌های حساس و حیاتی، نیاز به ساخت فیلترهایی با الیاف نانومتری است. البته یکی از اصلی ترین مشکلات استفاده از نانوفیلترها، افت فشار محسوس در سیستم فیلترینگ به علت کوچک بودن حفره‌های آن است. به علت کوچک بودن سطح تماس نانوذارت با فیبرهای فیلتر، که مقیاس فیبرهای آن زیر میکرون است، لغزش در سطح وجود دارد و همین امر باعث وجود سرعت لغزشی در سطح فیبرها می‌گردد. این لغزش از طرفی موجب کاهش افت فشار در فرآیند فیلتراسیون نیز می‌شود. به‌دلیل وجود نیروهای غیر خطی و مکانیزم‌های موثر بین مولکولی قوی، شبیه‌سازی مکانیزم‌های فیلتراسیون نانوذرات معلق در هوا امری پیچیده می‌باشد. از طرفی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.4.9]

ساخت و تحلیل تجربی نانوفیلترها به دلیل نیاز به نانو- دستگاه‌ها و تجهیزات پیشرفته نانوتکنولوژی امری بسیار هزینه بر می‌باشد. بنابراین، مدلسازی رایانه‌ای مکانیزم‌های فیلتراسیون نانوریزگردها بمنظور شناخت عوامل موثر بر فیلتراسیون آنها و نیز بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر بازده نانوفیلترهای لیفی امری ضروری است.

از آنجا که فیلترها یکی از المان‌های مهم در صنایع و محیط زیست می‌باشند، طی ۵۰ سال گذشته، دانشمندان بسیاری در سراسر جهان، مشغول به فعالیت برای مدلسازی ریاضی فرآیند فیلتراسیون در فیلترهای لیفی، به منظور پیش بینی کارایی و بهبود بازده جذب آنها بوده‌اند. شروع این کار توسط کوبارا [۱] طی یک مطالعه تحلیلی-عددی، تئوری مدل سلولی را شکل داد که اساس اکثر تئوری‌های فیلتراسیون امروزی می‌باشد. این تئوری، با استفاده از حل معادله جریان ویسکوز دوبعدی اطراف یک دسته استوانه با موقعیت‌های منظم که پوششی استوانه‌ای آنها را احاطه کرده است و تجزیه و تحلیل نیروهای وارد بر استوانه‌های عمود بر جهت جریان، فرمول‌بندی شده بود [۱۲-۲]. تفرشی و حسینی [۱۳] ضمن مدلسازی محیط یک فیلتر لیفی با الیاف تصادفی، مکانیزم‌های موثر بر فیلتراسیون نانوذرات را در محیط دوبعدی فیلتر لیفی، شبیه‌سازی کرده و نتایج را در قالب نمودارهای بازده جذب ارائه داده‌اند. مزیت استفاده از مدل‌های سه بعدی مجازی، عدم نیاز به ضرایب تصحیح تجربی، پیش‌بینی دقیق نتایج و عیب عمده استفاده از آنها طولانی شدن زمان محاسبات می‌باشد[۱۸-۱۴]. زحمتکش [۱۹]، تاثیر مکانیزم‌های پخش براونی، گیر افتادن غیرفعال و ترموفورسیس را در نشست ذرات میکرونی و ریزتر روی فیبر یک فیلتر لیفی سنجیده است. نتایج نشان می‌دهد که مکانیزم غالب در رسوب ذرات با ابعاد μm ۱۰۰ و بالاتر، گیرافتادن غیرفعال است. در رسوب ذرات حدود μm ۱۰، ترموفورسیس و برای ذرات ریزتر (با قطری بین μm ۱۰ تا nm ۱۰) بسته به گرادیان دما، نسبت‌های مختلفی از مکانیزم‌های پخش براونی و ترموفورسیس می‌باشد. پژوهش‌های صورت گرفته توسط قلم‌باز و همکاران و نقره‌آبادی و همکاران [۲۱-۲۰] نشان می‌دهد که نیروهای ترموفروسیس و براونی عوامل تأثیرگذار بر انتقال نانوذرات درون یک سیال مایع می‌باشند.

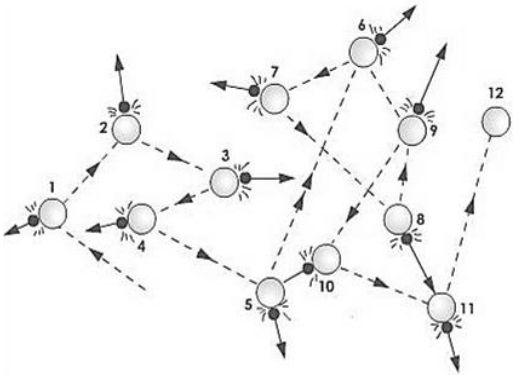
هدف از پژوهش حاضر، مدلسازی یک نانوفیلتر لیفی با الیاف تصادفی و بررسی تاثیر نیروهای براونی در کنار وجود شرط لغزش (که به دلیل کوچک بودن ذرات و قطر فیبرهای فیلتر به وجود می‌آید) بر فیلتراسیون نانوذرات بسیار کوچک (nm ۱۰۰~۲۵) معلق در جریان هوا می‌باشد.

۲- مکانیزم‌های موثر بر انتقال و نشست ذرات

عمدتاً چهار مکانیزم اساسی برای نشست ذرات روی الیاف فیلترهای لیفی وجود دارد که عبارتند از [۲۲]: ۱-پخش (انتشار) براونی، ۲-گیرش، ۳-گیرافتادن غیرفعال و ۴-مکانیزم قیدی.

نتایج آزمایشات تجربی نشان می‌دهد که مکانیزم‌های گیرش، گیرافتادن غیرفعال و قیدی بر نشست ذرات بزرگتر از nm ۱۰۰، موثر هستند [۱۳ و ۲۳].

مکانیزم پخش براونی ناشی از گرادیان غلظت نانوذرات و در نتیجه حرکت براونی (زیگزاگی) نانوذرات بعلت برخورد مداوم با مولکول‌های سیال پایه و نانوذرات دیگر می‌باشد. این مکانیزم، زمانی حاکم است که از گازهای با سرعت کم و ذرات بسیار ریز (کوچکتر از nm ۱۰۰) استفاده شود [۲۳ و ۲۵].

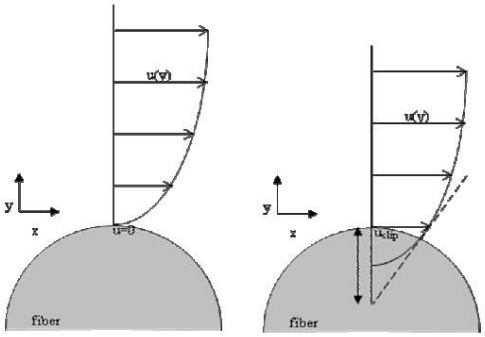


شکل (۱): مسیر حرکت ذرات و برخورد متوالی و تصادفی با یکدیگر که علت اصلی ایجاد حرکت براونی می‌باشد.[۲۵]

ویژگی منحصربفرد نانوالیاف‌ها، نسبت وزن به سطح در دسترس(خالی) بزرگ می‌باشد. نانوالیاف‌ها معمولا قطری کمتر از nm ۵۰۰ دارند. همین نسبت سطح بالا باعث می‌شود که مقاومت زیادی در حرکت سیال بوجود بیاید. دانشمندان بسیاری در این زمینه پژوهش‌هایی انجام داده‌اند، از جمله اسپیلمن و گورن (۱۹۶۸)، جکسون و جیمز (۱۹۸۶)، هایگدون و فورد (۱۹۹۶)، کلاگو و فیلیپس (۱۹۹۷)، دانیالا و لیو (۱۹۹۹)، کلاگو و همکاران (۲۰۰۰)، توماداکیس و رابرتسون (۲۰۰۵)، لیمان و همکاران (۲۰۰۵)، چن و پاپاتاناسیو (۲۰۰۶)، وانگ و همکاران (۲۰۰۶)، زابل و همکاران (۲۰۰۷)، جاگاناتان و همکاران (۲۰۰۸) و تفرشی و همکاران (۲۰۰۹). با این وجود از نتایج بدست آمده از پژوهش‌های بالا مستقیما برای پیش‌بینی جذت ذرات در نانوفیلترها استفاده نشده است. که به دلیل نادیده گرفتن تاثیر شرط لغزش در مرزها می‌باشد. اکنون مشخص شده است که لغزش زمانی بسیار قابل توجه است که جریان گاز در اطراف نانوالیاف‌ها وجود داشته باشد و آن هم به علت این است که نرخ پویش آزاد به قطر الیاف (فیبرها) نزدیک است (در دما و فشار استاندارد نرخ پویش آزاد گاز برابر با nm ۶۵ می‌باشد). در این صورت میدان جریان حول فیبرها دیگر پیوسته نیست و شرط مرزی عدم لغزش در سطح فیبرها دیگر وجود ندارد [۲۷].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.4.9]



شرط عدم لغزش در مرزها　　شرط لغزش در مرزها

شکل (۲): مقایسه پروفیل سرعت لغزشی (سمت راست) و غیرلغزشی (سمت چپ) در مرز فیبرها[۲۶]

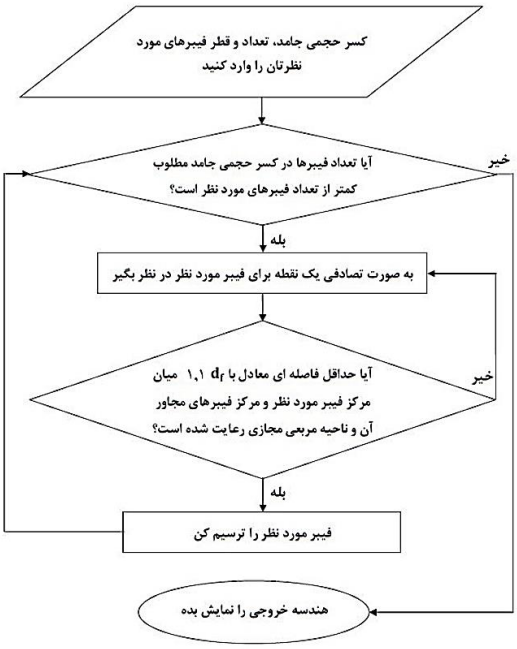
به طور کلی چهار نوع رژیم جریان در اطراف فیبرها وجود دارد که این رژیم‌ها براساس قطر فیبرها و شرایط دمایی گاز قابل تغییر هستند [۲۷]:

۱-رژیم جریان پیوسته ($Kn_f < 10^{-3}$)، ۲-رژیم جریان لغزشی ($10^{-3} < Kn_f < 0/25$)، ۳-رژیم جریان گذرا ($0/25 < Kn_f < 10$)، ۴-رژیم جریان مولکولی آزاد ($Kn_f > 10$).

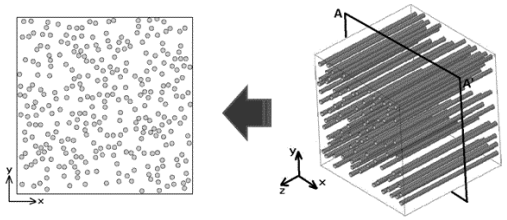
در اینجا $Kn_f = 2\lambda/d_f$ و همان عدد نادسن است و $\lambda = \overline{RT}/\sqrt{2}N_a\pi d_m^2 p$ نرخ پویش آزاد مولکول‌های گاز می‌باشد. رژیم جریان حول نانوالیاف‌ها از نوع لغزشی می‌باشد [۲۷].

۳- مدلسازی محیط فیلتر

به منظور تولید محیط فیلتر که هندسه‌ای دوبعدی با الیاف دایروی تصادفی، ثابت در یک ناحیه مربعی شبیه‌سازی می‌باشد، از کدنویسی کامسول تحت نرم افزار متلب استفاده گردید. تولید محیط به طور مداوم با افزودن الیاف با اندازه داده شده به ناحیه مربعی مورد نظر تا رسیدن به درصد تراکم مطلوب ادامه می‌یابد. منظور از درصد تراکم این است که چه مقدار از حجم فیلتر مورد بررسی را فیبرهای توپر فیلتر تشکیل داده است. به عنوان مثال وقتی که گفته می‌شود درصد تراکم ۱۰ است، یعنی ۱۰ درصد از فضای کل فیلتر را فیبرها اشغال کرده‌اند. برای پرهیز از تماس یا تداخل مرکز الیاف با یکدیگر و نیز ناحیه مربعی شبیه‌سازی، حداقل فاصله‌ای معادل $1,1\,d_f$ میان مرکز آنها با یکدیگر و دیواره‌های ناحیه مربعی، قرار داده شده است .بمنظور جلوگیری از سرعت یا گرادیان فشارهای شدید، شرایط مرزی ورودی و خروجی در فواصلی دور به ترتیب برابر با $20\,d_f$ و $5\,d_f$ از ورودی و خروجی ناحیه مربعی شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۳) مراحل تولید محیط فیلتر به صورت فلوچارت آورده شده است.



شکل (۴)، به ترتیب تصویر قطعه‌ای کوچک از محیط سه بعدی فیلتر و هندسه دوبعدی حاصل از تلاقی یک صفحه برشی با عرض فیلتر را نشان می‌دهد.



شکل (۴): به ترتیب از راست به چپ: تصویر سه بعدی تکه‌ای از محیط فیلتر و هندسه دوبعدی حاصل از تلاقی صفحه برشی با صفحه (عرض فیلتر) [۲۸]

در پژوهش حاضر، فرض شده است که هوا در دمای $^{\circ}K$ ۲۹۸,۱۵ و فشار kpa ۱۰۱,۳۲۵، تحت اثر شرط مرزی سرعت ورودی برابر با $\frac{m}{s}$ ۰,۰۱ وارد محیط فیلتر شده و در اثر شرط مرزی فشار خروجی برابر با atm ۱ آنرا ترک می‌کند. انتخاب این سرعت و فشار برای ارضاء رژیم جریان آرام است [۱۳ و ۲۳]. برای مرزهای بالایی و پایینی از شرایط مرزی تناوبی استفاده شده است. انتخاب شرایط مرزی جانبی تناوبی به این علت است که در اینجا

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.4.9]

قسمتی از فیلتر مدل شده و محیط فیلتر در مرزهای بالا و پایین تکرار خواهد شد.

۴- معادلات حاکم فیلتر

در پژوهش حاضر، مخلوط سیال-نانوذره بعنوان یک مخلوط دو جزئی (سیال پایه هوا+نانوذرات جامد) با فرضیات روبرو رفتار می‌کنند [۱۳، ۲۳ و ۲۵]: (۱) جریان تراکم ناپذیر است، (۲) جریان پایدار می‌باشد، (۳) بدون واکنش شیمیایی می‌باشد، (۴) اثر نیروهای خارجی ناچیز است و از نیروهای حجمی صرف نظر شده است، (۵) مخلوط سیال-نانوذره رقیق می‌باشد، (۶) اثر اتلاف لزجی ناچیز است، (۷) هیچ منبع گرمایی در محیط وجود ندارد، (۸) انتقال حرارت تشعشعی قابل صرف نظر است، (۹) نانوذرات در تعادل گرمایی با سیال پایه قرار دارند و (۱۰) حرکت نانوذرات ناشی از حرکت سیال پایه می‌باشد (دیدگاه اتصال یک‌طرفه).

این نکته حائز اهمیت است که برای نانوفیلترهای لیفی چنانچه قطر الیاف کوچکتر از $۵۰۰\ nm$ باشد، عدد نادسن الیاف بزرگتر از ۰،۰۰۱ می‌شود و در محدوده رژیم لغزشی و یا گذرا قرار می‌گیرد. در محدوده این رژیم، می‌توان از معادلات ناویر-استوکس با رعایت بعضی شروط و فرضیات خاص برای تحلیل رفتار جریان سیال پایه کمک گرفت. همچنین، عدد نادسن برای نانوذرات، $۰,۱ < Kn_p < ۱۰$ می‌باشد که در محدوده رژیم جریان گذرا قرار دارد. در این حالت، جریان حول نانوذرات ناپیوسته خواهد بود.

در دیدگاه اویلر، معادله پیوستگی، معادلات ناویر-استوکس و معادله انرژی برای تحلیل رفتار سیال پایه بصورت زیر معرفی می‌گردند [۱۳، ۲۵ و ۲۷]:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}=\mu\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right] \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y}=\mu\left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right] \qquad (۳)$$

در این دیدگاه، معادله پیوستگی برای نانوذرات (انتقال جرم) بصورت زیر تعریف شده است [۱۳، ۲۵ و ۲۷]:

$$u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=D_B\left\{\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right\} \qquad (۴)$$

که $D_B=\frac{k_b C_C T}{3\pi\mu d_p}$ ضریب پخش براونی [۱۳] است.

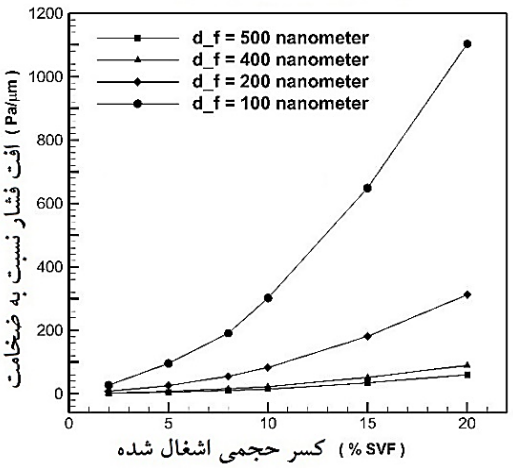
همانطور که قبلا اشاره شد، هنگامی که عدد نادسن بین ۰،۲۵ و ۰،۰۰۱ قرار می‌گیرد، رژیم جریان لغزشی قرار خواهد شد. در این صورت سرعت در مرز فیبرهای فیلتر صفر نبوده و دارای سرعتی می‌باشند که به آن سرعت لغزشی می‌گویند. برای محاسبه سرعت لغزشی در مرزها از رابطه‌ی زیر که معروف به رابطه ماکسول است، استفاده می‌گردد [۲۷]:

$$u_w=\frac{2-\sigma_v}{\sigma_v}\lambda\frac{\partial u}{\partial n} \qquad (۵)$$

که در اینجا u_w سرعت لغزشی در دیواره‌ها، σ_v ضریب شتاب مماسی اسکان، λ نرخ پویش آزاد و $\frac{\partial u}{\partial n}$ تغییرات سرعت در راستای افقی و عمودی می‌باشند.

۵- بحث و نتایج

در پژوهش حاضر، بعلت هندسه پیچیده از روش المان محدود استفاده شده است. حل عددی معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت برای سیال پایه‌ی در شرایط استاندارد، میدان سرعت و فشار را درون محیط فیلتر نتیجه خواهد داد. داده‌های حاصل شده برای تعیین پارامترهای کلیدی فیلتر و حل عددی معادله انتقال جرم نانوذرات بکار برده می‌شوند. پارامترهای کلیدی یک فیلتر لیفی، قطر الیاف، درصد تراکم، تعداد الیاف و ضخامت فیلتر می‌باشند[۲۵]. در این راستا، تاثیر اختلاف فشار در طول فیلتر نسبت به درصد تراکم-قطر الیاف در شکل (۵) سنجیده شده است.



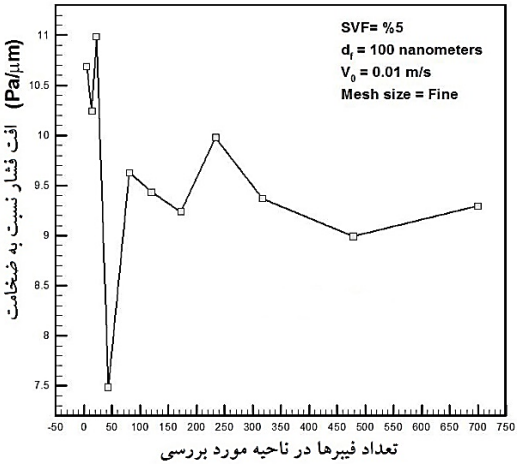
شکل (۵): تاثیر درصد تراکم-قطر الیاف بر اختلاف فشار در طول فیلتر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.4.9]

مطابق شکل (۵)، اختلاف فشار در طول فیلتر برای الیاف به قطر ۵۰۰ *nm*، بیشتر از حالات دیگر است. از طرفی، راندمان جذب یک فیلتر لیفی با کاهش قطر الیاف یا افزایش درصد تراکم آن، افزایش می‌یابد.

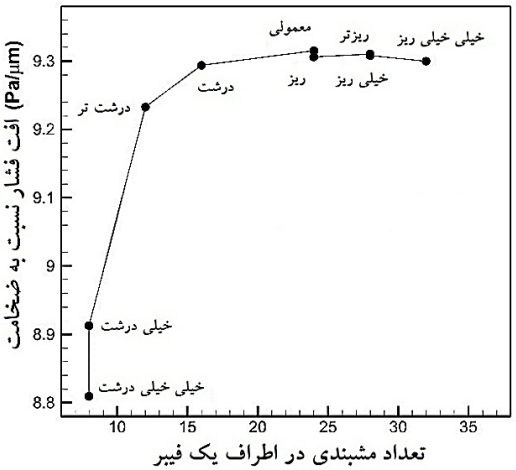
همچنین مطابق شکل (۶)، اختلاف فشار در طول فیلتر چنانچه تعداد الیاف درون ناحیه مربعی شبیه‌سازی، ۳۰۰ عدد یا بیشتر باشد، تغییرات چندانی ندارد.



شکل (۶): تاثیر تعداد الیاف فیلتر بر اختلاف فشار در طول فیلتر

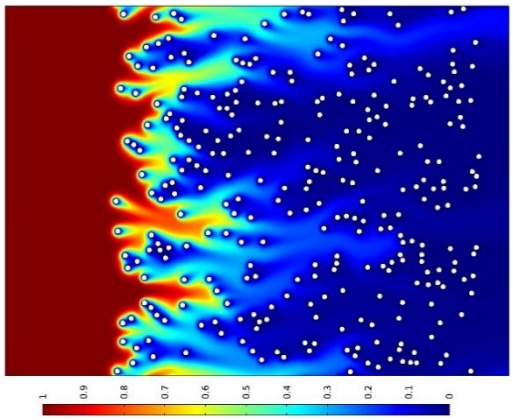
بنابراین، در این پژوهش از یک فیلتر لیفی با ۳۰۰ فیبر به قطر ۱۰۰ *nm* و درصد تراکم ۵٪ در قسمت‌های بعدی استفاده شده است.

شکل (۷)، استقلال نتایج این قسمت را نسبت به شبکه محاسباتی برای حالتی که شبکه محاسباتی از نوع ریز به پایین باشد، نشان می‌دهد.



شکل (۷): تاثیر شبکه محاسباتی بر اختلاف فشار در طول فیلتر. نتایج برای محیط یک فیلتر لیفی با ۳۰۰ فیبر به قطر *nm* ۱۰۰ و درصد تراکم ۵٪ و سرعت ورودی *m/s* ۰,۰۱ بدست آمده‌اند.

در حل عددی معادله انتقال جرم نانوذرات که در این حالت، معادله پخش-جابجایی نام دارد، شکل تغییر غلظت نانوذرات معلق در سیال پایه را درون محیط فیلتر نتیجه می‌دهد. در تحلیل معادله فوق، از حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال پایه، استفاده شده است. در این قسمت مطابق دیدگاه اویلر، فرض شده است که غلظت نانوذرات در ورودی فیلتر، واحد و تغییر غلظت نانوذرات در جهت جریان و در خروجی فیلتر، صفر می‌باشد. همچنین، غلظت نانوذرات روی سطح الیاف، صفر در نظر گرفته شده است. عبارت فوق بدین معناست که نانوذرات چنانچه به سطح الیاف برخورد کنند، نشست کرده و از جریان ذرات، حذف خواهند شد. شکل (۸)، نمونه‌ای از شکل تغییر غلظت نانوذرات ۲۰۰ *nm* معلق در سیال پایه که با سرعت ۰,۰۱ متر بر ثانیه وارد محیط فیلتر لیفی می‌شوند، به تصویر می‌کشد.

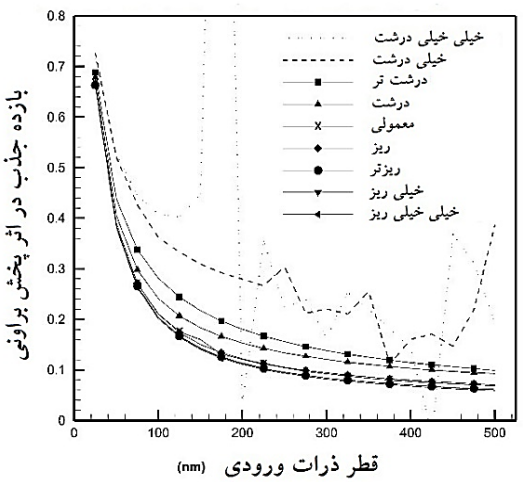


شکل (۸): نمونه‌ای از شکل تغییر غلظت نانوذرات ۲۰۰ *nm* معلق درون سیال پایه در محیط فیلتر لیفی با قطر فیبر ۱۰۰ *nm* و درصد تراکم ۵٪

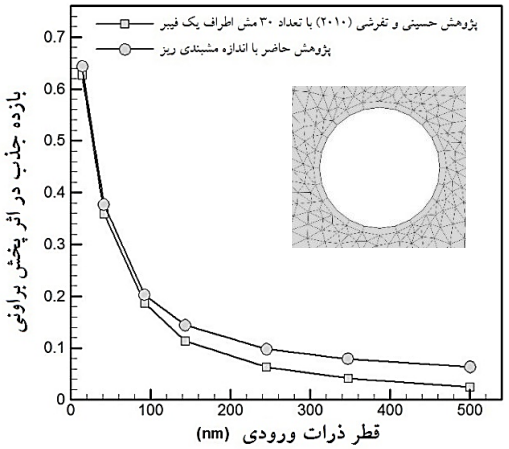
در شکل (۸) به صورت قرار دادی رنگ قرمز دارای بیشترین غلظت یعنی دارای مقدار یک است و کمترین غلظت رنگ آبی می‌باشد با مقدار صفر. شکل (۹)، استقلال نتایج بازده جذب در اثر مکانیزم پخش براونی را نسبت به شبکه محاسباتی برای حالتی که شبکه محاسباتی از نوع ریز به پایین باشد، نشان می‌دهد. در شکل (۱۰)، نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی در این قسمت با پژوهش تفرشی و حسینی [۱۳] در شرایط مرزی یکسان، مقایسه و اعتبارسنجی شده است. نتایج تطابق خوبی را با هم نشان می‌دهند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.4.9]



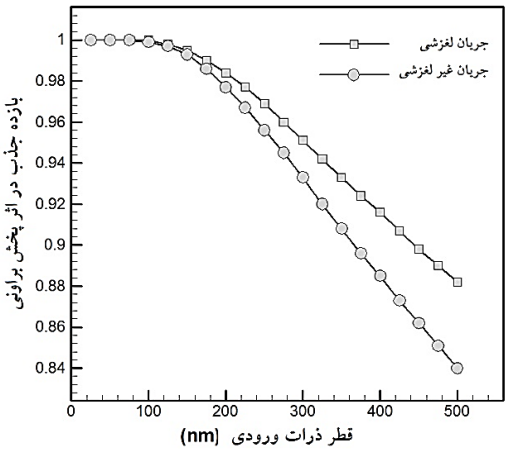
شکل (۹): تاثیر شبکه محاسباتی بر نتایج بازده جذب ذرات در اثر مکانیزم پخش براونی برای تعداد ۳۰۰ فیبر با قطر ۱۰ میکرومتر و درصد تراکم ۵٪



شکل (۱۰): مقایسه نتایج حاصل شده پیرامون بازده جذب در اثر مکانیزم پخش براونی با پژوهش تفرشی و حسینی [۱۳].

اســـتفاده از نانوالیاف در فیلترهای لیفی مزایا و معایبی دارد. از جمله معایب این نوع فیلترها، افت فشـــار بیشـــتر نســـبت به میکروالیاف‌ها می‌باشـــد. در حالت واقعی زمانی که از نانوالیاف‌ها اســتفاده می‌شـود، به علت افزایش عدد نادســن، در سطح فیبرها جریان به صـورت لغزشی می‌باشد و دیگر در مرزها سرعت ذرات صفر نیست. در نظر گرفتن این مسئله در طراحی فیلترها موجب کاهش افت فشـار نسبت به زمانی می‌شود که شرط مرزی لغزش حضور ندارد.

شکل (۱۱)، مقایسه افت فشار در یک فیلتر را نشان می‌دهد که در یکی شرط لغزش و در دیگری عدم لغزش حاکم می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، بازده جذب بر اثر پخش براونی در حضور شرط مرزی لغزش، افزایش پیدا می‌کند. هرچه قطر ذرات بیشتر باشد، بازده جذب نیز کاهش پیدا خواهد کرد و این امر به علت سرعت بیشتر ذرات درشت‌تر می‌باشد.



شکل (۱۱): تاثیر جریان لغزشی در یک فیلتر، بر بازده جذب، برای اندازه ذرات مختلف، برای یک فیلتر با ۳۰۰ فیبر به قطر ۱۰۰ نانومتر و کسر حجمی اشغال شده ۵ درصد

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، مدلسازی دوبعدی هندسه یک فیلتر لیفی با الیاف تصادفی انجام شده و تاثیر وجود نیروهای براونی و شرط لغزش در مرزهای الیاف بر فیلتراسیون نانوذرات درون محیط این فیلتر بررسی شده است.

مهم‌ترین نتایج این پژوهش را می‌توان بصورت زیر گزارش داد:

۱- بازده جذب ذرات در اثر مکانیزم پخش براونی برای ذرات $۱۲۵ \sim ۲۵\ nm$ بیشترین مقدار را دارد و بین ۹۹ ~ ۹۴ درصد متغیر است و هرچه قطر ذرات افزایش می‌یابد، به نسبت بازدهی فیلتر نیز کاهش پیدا می‌کند. دلیل این تفاوت، افزایش ضریب پخش براونی برای ذرات کوچکتر در معادله انتقال جرم نانوذرات می‌باشد.

۲- با حل معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس متوجه خواهید شد که تاثیر شرط لغزش در حل معادلات باعث کاهش افت فشار خروجی از فیلتر نسبت به حالتی است که از شرط لغزش چشم پوشی شده است.

۳-هرچه قطر فیبرهای فیلتر مورد بررسی بزرگتر باشند بازده جذب پخش براونی نیز کاهش پیدا می‌کند. در واقع به علت این که ذرات کوچکتر مسیر عبور نسبتا بهتری نیز خواهند داشت و با توجه به نسبت کسر حجمی اشغال شده ثابت، تعداد فیبرها کمتر و سطوح برخورد کمتر خواهد شد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.4.9]

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی

C	غلظت نانوذرات
d_f	قطر الیاف، m
d_p	قطر نانوذرات، m
k	ضریب رسانش گرمایی، $W/m.^{\circ}K$
Kn	عدد نادسن
P	فشار با بعد، pa
SVF	کسر حجمی جامد (درصد تراکم)
T	دمای با بعد، ^{o}K
u	مولفه سرعت در جهت جریان، m/s
u_w	مولفه سرعت روی دیواره‌ها (مرزها)
v	مولفه سرعت عمود بر جریان، m/s

علائم یونانی

λ	فاصله پویش آزاد متوسط مولکول‌های سیال پایه
μ	ویسکوزیته دینامیکی، $kg/m.s$
ρ	چگالی، kg/m^3
σ_v	جهت جریان حرکت ثابت (شتاب مماسی در حالت سکون)

زیرنویس

a	سیال پایه
p	ذرات

مراجع

[1] S. Kuwabara, The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders of spheres in a viscous flow at small reynolds number, J. Phys. Soc. Jpn., 14 (1959) 527–532.

[2] K.W. Lee, J.A. Gieseke, Note on the approximation of interceptional collection efficiencies, J. Aerosol Sci., 11 (1980) 335–341.

[3] J. Pich, The filtration theory of highly dispersed aerosols, Staub Reinhalt. Luft., 5, (1965) 16–23.

[4] I.B. Stechkina, A.A. Kirsch, N.A. Fuchs, Studies on fibrous aerosol filters−IV Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration, Ann. Occup. Hyg., 12, (1969) 1.

[5] I.B. Stechkina, Diffusion precipitation of aerosols in fiber filters, Dokl. Acad. Nauk., 167 (1966) 1327.

[6] B.Y.H. Liu, K.L. Rubow, Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media, Proceedings of the 5th World Filtration Congress, Paris, France, June (1990).

[7] S. Payet, Filtrationstationnaire et dynamique des aerosols liquids submicroniques, de l'universite parisXII4, Paris. (1991).

[8] W.C. Hinds, Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd, Wiley, New York. (1999).

[9] N. Rao, M. Faghri, Computer modeling of aerosol filtration by fibrous filters, Aerosol Sci. Technol., 8 (1988) 133–156.

[10] B.V. Ramarao, T. Chi, S. Mohan, Calculation of single fiber efficiencies for interception and impaction with superposed Brownian motion, J. Aerosol Sci., 25 (1994) 295–313.

[11] R.C. Brown, Many-fiber model of airflow through a fibrous filter, J. Aerosol Sci., 15 (1984) 583–593.

[12] V.A. Kirsh, A. Shabatin, Deposition of Nanoparticles in Model Multilayer Fibrous Filters with a Two_Dimensional Flow Field, Colloid Journal, 77 (2015) 25-31.

[13] S.A. Hosseini, H.V. Tafreshi, Modeling particle filtration in disordered 2-D domains: A comparison with cell model, Separation and Purification Technology, 74 (2010) 160-169.

[14] D. Y.H. Pui, J. Wang, Filteration of aerosol particles by alliptical fibers: A numerical study, Nanoparticles and Occupational health, 11 (2009) 185-196.

[15] D. Y.H. Pui, T. Yan Ling, J. Wang, Numerical modeling of nanoparticle penetration through personal protective garments, Separation and Purification Technology, 98 (2009) 230-239.

[16] S. Fotovati, H.V. Tafreshi, A. Ashari, S.A. Hosseini, B. Pourdeyhimi, Analytical expressions for predicting capture efficiency of bimodal fibrous filters, J. Aerosol Sci., 41 (2010) 295.

[17] S.A. Hosseini, H.V. Tafreshi, 3-D simulation of particle filtration in electrospun nanofibrous filters, Powder Technol., 201(2) (2010) 153–160.

[18] Q. Wang, B. Maze, H.V. Tafreshi, B. Pourdeyhimi, Simulating through-plane permeability of fibrous materials having different fiber lengths, Model. Simul. Mater. Sci., 15 (2011) 855–868.

[19] I. Zahmatkesh, On the importance of thermophoresis and Brownian diffusion for the deposition of micro- and nanoparticles, International Communications in Heat and Mass Transfer, 35 (2008) 369–375.

[20] M. Ghalambaz, A.R. Noghrehabadi, M. Ghanbarzadeh, Natural convection of nanofluids over a convectively heated vertical plate embedded in a porous medium, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 31(2) (2014) 413-427.

[21] A.R. Noghrehabadi, E. Izadpanahi, M. Ghalambaz, Analysis of fluid flow and heat transfer of nanofluids over a stretching sheet near the extrusion slit, Computers & Fluids, 100 (2014) 227-236.

[22] R. Kohli, K.L. Mittal, Developments in surface sontamination and cleaning: particle deposition, control and removal, Chapter one: Particle deposition onto enclosure surfaces, D.L Liu., ELSEVIER, Amsterdam, (2010).

[23] S.A. Hosseini, Modeling particle filteration and cacking fibrous filters media, Virginia, Virginia Commonwealth University, (2011).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.4.9]

[24] J. Buongiorno, Convective Transport in Nanofluids, Journal of Heat Transfer, 128 (2006) 240-250.

[25] http://physics.tutorvista.com/thermodynamics/brownian-motion.html (2016)

[26] A. Wiegmann, L. Cheng, S. Rief, Filtration simulation on the nano scale-the influence of slip flow, Department Flow and Material Simulation Fraunhofer ITWM, Fraunhofer Platz1, 67663 Kaiserslautern, Germany (2010).

[27] S.A. Hosseini, H. Vahedi Tafreshi, Modeling permeability of 3-D nanofiber media in slip flow regime, Chemical Engineering Science 65 (2010) 2249-2254.

[۲۸] یزدانی، ع.، ۱۳۹۴، مدلسازی فیلتراسیون نانوریزگردها در میکروفیلترهای لیفی نازک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.4.9]