نحوه استناد به این مقاله: یزدانی، علی؛ قلم باز، محمد (۱۳۹۵). مدلسازی فیلتراسیون نانوریزگردها در میکروفیلترهای لیفی نازک. تبدیل انرژی، ۲ (۱)، .....

مدلسازی فیلتراسیون نانوریزگردها در میکروفیلترهای لیفی نازک

علی یزدانی [۱]، محمد قلم باز [۲و*]

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

دریافت: دی ۹۴، بازنگری: بهمن ماه ۹۴، پذیرش: فروردین ۹۴

چکیده

هدف از انجام پژوهش حاضر، مدلسازی یک فیلتر لیفی با الیاف تصادفی و نیز شبیه‌سازی و آنالیز تاثیر وجود نیروهای براونی و ترموفورسیس بر جذب نانوذرات در میکروفیلترهای لیفی نازک می باشد. در پژوهش حاضر، حرکت نانوذرات تابعی از حرکت سیال و یک لغزش نسبی بوده و لیکن حرکت هوا تابعی از حرکت نانوذرات نمی باشد. بر این اساس و در دیدگاه اویلر، معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت سیال پایه و نیز معادله انتقال جرم نانوذرات و در دیدگاه لاگرانژ، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر دینامیک هر ذره (فاز گسسته) بدست آمده و به صورت عددی حل شده‌اند. در دیدگاه لاگرانژ، حرکت نانوذرات و نشست آنها روی فیبرها، با استفاده از روش ردیابی ذرات و با درنظر گرفتن نیروهای براونی و ترموفروسیس شبیه‌سازی شده است. تحلیل معادلات فوق، در دیدگاه‌های اویلر و لاگرانژ، با درنظر گرفتن اثرات ابعاد کوچک، به روش المان محدود انجام شده است. در مرحله بعد، روش مناسب برای حل عددی معادلات حاکم بر حرکت نانوذرات و شبیه‌سازی مکانیزم نشست ذرات روی الیاف، با توجه به نوع معادلات و نیروهای موثر در ابعاد نانو ارائه گردیده و سپس، نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج پژوهش‌های پیشین، مقایسه و اعتبار سنجی شده است. در پایان، نتایج برای گرادیان‌های مختلف دما، ابعاد مختلف قطر الیاف و نانوذرات، تراکم الیاف و تعداد لایه‌های فیلتراسیون در قالب نمودارهای طراحی و بازده ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مکانیزم غالب در نشست ذرات زیر $۱۰۰nm$، مکانیزم پخش براونی است. در این گستره ذرات، پدیده ترموفورسیس، تاثیر چندانی بر جذب نانوذرات توسط الیاف فیلتر ندارد. همچنین، در نشست ذرات بزرگتر از $۱۰۰nm$، مکانیزم گیرش موثرتر از دو مکانیزم پخش براونی و ترموفورسیس عمل می‌کند.

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

کلمات کلیدی: فیلتراسیون نانوآئروسل‌ها، میکروفیلتر لیفی، روش ردیابی ذرات، پخش براونی، ترموفورسیس.

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی نانو، تولید نانوذرات با ابعاد nm10یا کوچکتر امری امکانپذیر شده است. نانوذرات با داشتن نسبت سطح به حجم بسیار بالا کاربردهای متعددی در زمینه های مختلف نانوتکنولوژی از جمله نانوداروها و مواد ضدعفونی کننده، افزایش انتقال حرارت و ... پیدا کرده‌اند. در بسیاری از کاربردها، نانوذرات پس از انجام وظیفه خود، در محیط زیست و هوا رها می شوند. نانوذرات در حالت طبیعی نیز با درصدهای نسبتاً کم، همراه ذرات گرد و غبار در هوا وجود دارند. ذرات بسیار ریز گرد و غبار (نانوریزگردها) در هوا که در حالت عادی ضرر چندانی ندارند، در مجاورت گازهای آلاینده واکنش داده و ذرات بسیار مضری تشکیل می‌دهند. بنابراین، یافتن تمهیداتی برای فیلتراسیون این نانوذرات در کاربردهای نانوتکنولوژی بسیار حایز اهمیت می‌باشد. برای طراحی یک فیلتر مناسب به منظور فیلتراسیون نانوذرات، ابتدا باید نیروهای موثر بر آنها را شناخت. فیلترهای متداول هوا برای فیلتراسیون میکروذرات معلق معمولاً بر پایه نیروهای موثر بر میکروذرات عمل می‌نمایند. میکروذرات غالباً تحت اثر نیروهای وزن، لختگی (اثر اینرسی و اینترسپشن)، گریز از مرکز و نیروهای الکترواستاتیکی می‌باشند. برخلاف میکروذرات، نانوذرات تحت تاثیر این نیروها قرار ندارند. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که نانوذرات معلق در هوا تحت تاثیر معنادار نیروهای براونی و ترموفروسیس قرار دارند. بنابراین، طراحی فیلترهای جدید به منظور فیلتراسیون نانوذرات می‌بایست براساس این نیروها صورت گیرد.

از آنجا که فیلترها یکی از المان¬های مهم در صنایع و محیط زیست می¬باشند، طی ۵۰ سال گذشته، دانشمندان

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]

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 تئوری های فیلتراسیون امروزی می باشد. این تئوری، با استفاده از حل معادله جریان ویسکوز دوبعدی اطراف یک دسته استوانه با موقعیت های منظم که پوششی استوانه ای آنها را احاطه کرده است و تجزیه و تحلیل نیروهای وارد بر استوانه های عمود بر جهت جریان، فرمول بندی شده بود [۱۲-۲]. تفرشی و حسینی [۱۳] ضمن مدلسازی محیط یک فیلتر لیفی با الیاف تصادفی، مکانیزم های موثر بر فیلتراسیون نانوذرات را در محیط دوبعدی فیلتر لیفی، شبیه سازی کرده و نتایج را در قالب نمودارهای بازده جذب ارائه داده اند. مزیت استفاده از مدل های سه بعدی مجازی، عدم نیاز به ضرایب تصحیح تجربی، پیش بینی دقیق نتایج و عیب عمده استفاده از آنها طولانی شدن زمان محاسبات می باشد[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 µm100 و بالاتر، گیرافتادن غیرفعال است؛ در رسوب ذرات حدود µm10، ترموفورسیس و برای ذرات ریزتر (با قطری بین µm10 تا nm10) بسته به گرادیان دما، نسبت‌های مختلفی از مکانیزم‌های پخش براونی و ترموفورسیس می‌باشد. پژوهش¬های 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.

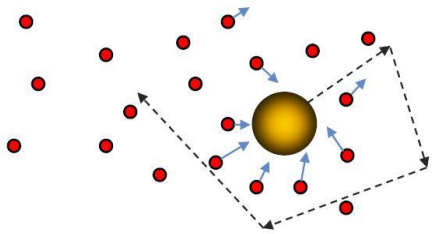
هدف از پژوهش حاضر، مدلسازی یک میکروفیلتر لیفی با الیاف تصادفی و بررسی تاثیر نیروهای براونی و ترموفورسیس بر فیلتراسیون نانوذرات بسیار کوچک (nm100~25) معلق در جریان هوا می‌باشد.

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 می دهد که مکانیزم‌های گیرش، گیر افتادن غیرفعال و قیدی بر نشست ذرات بزرگتر از $100nm$، 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 $100nm$) استفاده شود [۲۳ و ۲۵].

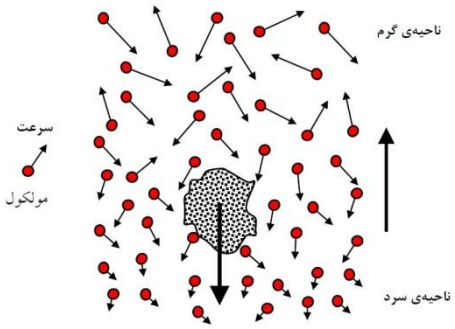


شکل (۱): مسیر حرکت یک ذره پس از برخورد متوالی و تصادفی با ذرات دیگر [۲۴].

بونجیورنو [۲۵]، هفت مکانیزم‌های فیزیکی اساسی برای انتقال ذرات در نانوسیالات بصورت روبرو تعریف می‌کند: ۱-تخلیه سیال، ۲-اثر مگنسف ۳-دیفیوزوفورسیس، ۴-نشست گرانشی، ۵-اینرسی، ۶-پخش (انتشار) براونی و ۷-ترموفورسیس.

در انتقال میکروذرات، مکانیزمهای ۱ تا ۵ بسیار اهمیت دارند در حالیکه در مقیاس نانو، مکانیزم‌های پخش براونی و ترموفورسیس از اهمیت بیشتری نسبت به سایر مکانیزم‌ها برخوردار می باشند [۲۵].

مکانیزم ترموفورسیس ناشی از گرادیان دما و در نتیجه فعل و انعالات نامتقارن یک ذره با مولکول های سیال پایه می باشد که بر اثر آن، نانوذرات از نواحی با دمای بالا به نواحی با دمای پایین حرکت می کنند [۲۷ و ۲۸].



شکل (۲): جابجایی ذره شناور در سیال پایه تحت اثر گرادیان دما [۲۴].

۳- مدلسازی محیط فیلتر

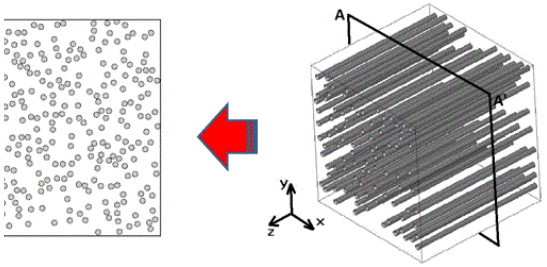
به منظور تولید محیط فیلتر که هندسه‌ای دوبعدی با الیاف دایروی تصادفی، ثابت در یک ناحیه مربعی شبیه‌سازی می‌باشد، از کدنویسی کامسول تحت نرم افزار متلب استفاده گردید. تولید محیط به طور مداوم با افزودن الیاف با اندازه داده شده به ناحیه مربعی مورد نظر تا رسیدن به درصد تراکم مطلوب ادامه می یابد. برای پرهیز از تماس یا تداخل مرکز الیاف با یکدیگر و نیز

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]

ناحیه مربعی شبیه‌سازی، حداقل فاصله‌ای معادل $1,1\,d_f$ میان مرکز آنها با یکدیگر و دیواره‌های ناحیه مربعی، قرار داده شده است (d_f قطر الیاف می‌باشد). 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.

شکل (۳)، 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.

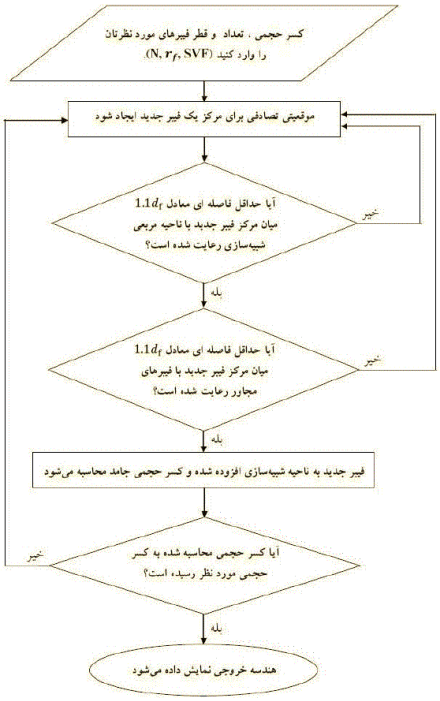


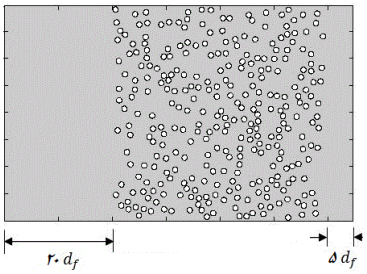
شکل (۳): به ترتیب از راست به چپ: تصویر سه بعدی تکه‌ای از محیط فیلتر و هندسه دوبعدی حاصل از تلاقی صفحه برشی $A-A'$ با صفحه $x-y$ (عرض فیلتر)

در پژوهش حاضر، فرض شده است که هوا در دمای $K°$ ۲۹۸,۱۵ و فشار kpa ۱۰۱,۳۲۵، تحت اثر شرط مرزی سرعت ورودی برابر با $\frac{m}{s}$ ۰,۱ وارد محیط فیلتر شده و در اثر شرط مرزی فشار خروجی برابر با atm ۱ آنرا ترک می‌کند. انتخاب این سرعت و فشار برای ارضای 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 قسمتی از فیلتر مدل شده و محیط فیلتر در مرزهای بالا و پایین تکرار خواهد شد. در شکل (۴) به ترتیب فلوچارت تولید هندسه دوبعدی موردنظر و محیط فیلتر بهمراه الیاف میکرونی و شرایط مرزی حاکم بر میدان جریان به تصویر کشیده شده است.

۴- معادلات حاکم بر مسئله فیلتراسیون

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).





شکل (۴): به ترتیب از چپ به راست: فلوچارت تولید هندسه دوبعدی موردنظر، شماتیک محیط فیلتر همراه با الیاف و شرایط مرزی حاکم بر میدان جریان

این نکته حائز اهمیت است که برای میکروفیلترهای لیفی چنانچه قطر الیاف بزرگتر از $10\mu m$ باشد، عدد نادسن الیاف کوچکتر از ۰,۰۰۱ می‌شود. در این حالت، رژیم جریان حول الیاف پیوسته می‌باشد و در محدوده این رژیم، می‌توان از معادلات ناویر استوکس برای تحلیل رفتار جریان سیال پایه کمک گرفت. همچنین، عدد نادسن برای نانوذرات، $0,1 < Kn_p <$ 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]:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]

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

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

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

$$\rho c\left[\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{V}.\nabla T\right]=\nabla.(k\nabla T)+\rho_p C_p\left[D_B\nabla C.\nabla T+D_T\frac{\nabla T.\nabla T}{T}\right] \quad (۴)$$

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

$$u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=D_B\left\{\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right\}+\frac{D_T}{T}\left\{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right\} \quad (۵)$$

ضریب پخش براونی [۱۳] و $D_B=\frac{k_b C_C T}{3\pi\mu d_p}$ که ضریب ترموفورسیس [۲۵] است. $D_T=-0.26\frac{\mu k C}{\rho\left(2k+k_p\right)}$

همچنین در دیدگاه لاگرانژ، معادلات دیفرانسیل حاکم بر دینامیک هر ذره برای ردیابی آنها در زمان بدست آمده است. نیروهای غالب روی ذرات، نیروی دراگ سیال پایه و نیروهای براونی و ترموفورسیس هستند. برای ذرات هنگامیکه عدد رینولدز کوچکتر از واحد باشد، داریم:

$$\frac{du_p}{dt}=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c}\left(u-u_p\right)-\frac{3\pi\mu^2 d_p H}{\rho_a T}\nabla T+G_i\sqrt{\frac{\pi 216 v k_B T}{\pi\rho_p d_p^5 S^2 C_C\Delta t}} \quad (۶)$$

$$\frac{dv_p}{dt}=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c}\left(v-v_p\right)-\frac{3\pi\mu^2 d_p H}{\rho_a T}\nabla T+Gj\sqrt{\frac{\pi 216 v k_B T}{\pi\rho_p d_p^5 S^2 C_C\Delta t}} \quad (۷)$$

$$H\cong\left(\frac{2.34}{1+6.84\frac{\lambda}{d_p}}\right)\left(\frac{\frac{k}{k_p}+4.36\frac{\lambda}{d_p}}{1+2\frac{k}{k_p}+8.72\frac{\lambda}{d_p}}\right) \quad (۸)$$

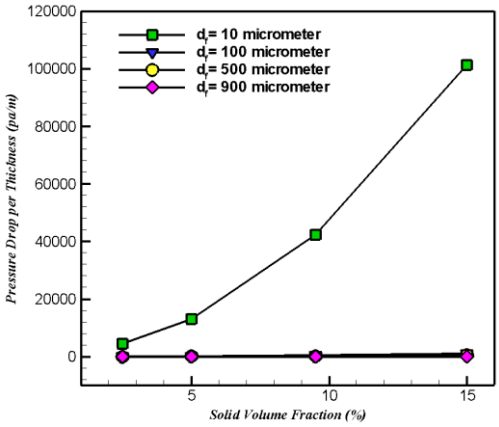
در روابط فوق، u، v، p، T و C به ترتیب مولفه های سرعت با بعد در جهت و عمود بر جریان، فشار با بعد، دمای با بعد، غلظت نانوذرات و μ، ρ، k، λ و k_b به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی، ضریب رسانش گرمایی، چگالی، طول متوسط پویش آزاد مولکول‌های سیال پایه و ثابت بولتزمن هستند.همچنین، $C_C=1+\frac{\lambda}{d_p}\left\{1.257+0.4\exp(-1.1d_p/\lambda)\right\}$

ضریب‌تصحیح کانینگهام برای روابط لغزشی روی سطح نانوذرات می باشد [۱۳].

۵- نتایج

در پژوهش حاظر، 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، حل عددی معادله انتقال جرم نانوذرات و استحصال نتایج در دیدگاه لاگرانژ بکار برده می‌شوند. پارامترهای کلیدی یک فیلتر لیفی، قطر الیاف، درصد تراکم، تعداد الیاف و ضخامت فیلتر می باشند[۲۵].

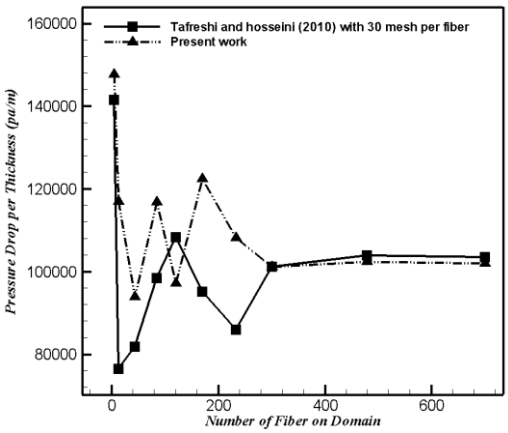
در این راستا، تاثیر اختلاف فشار در طول فیلتر را نسبت به درصد تراکم-قطر الیاف در شکل (۵) سنجیده شده است.



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

مطابق شکل (۵)، اختلاف فشار در طول فیلتر برای الیاف به قطر $۱۰\mu m$، 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.



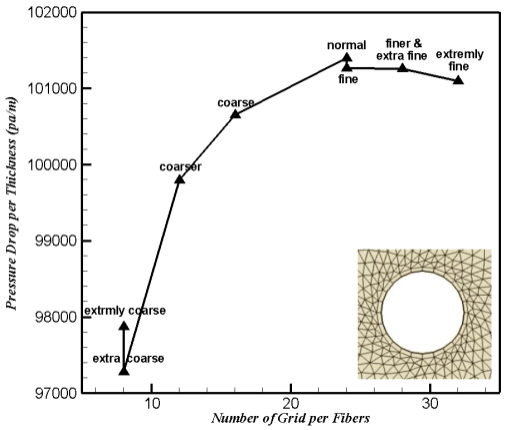
شکل (۶): تاثیر تعداد الیاف فیلتر بر اختلاف فشار در طول فیلتر.

بنابراین، در این پژوهش از یک فیلتر لیفی با ۳۰۰ فیبر به قطر $۱۰\mu m$ و درصد تراکم ۱۵٪ در قسمت‌های بعدی استفاده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]

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



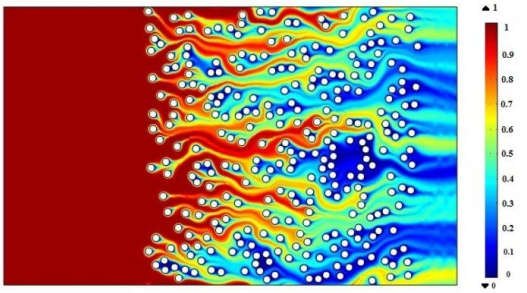
شکل (۷): تاثیر شبکه محاسباتی بر اختلاف فشار در طول فیلتر. نتایج برای محیط یک فیلتر لیفی با ۳۰۰ فیبر به قطر $10\mu m$ و درصد تراکم ۱۵٪ بدست آمده‌اند.

جدول (۱)، مشخصات انواع مختلف شبکه‌بندی را در پژوهش حاضر، معرفی می‌کند.

جدول (۱): مشخصات انواع مختلف شبکه بندی در پژوهش حاضر

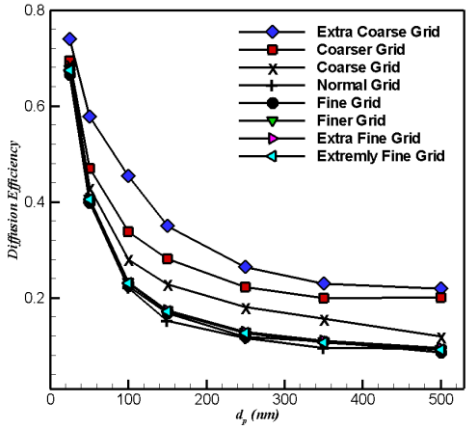
پارامتر	معادل فارسی	میانگین کیفیت شبکه
coarse Extremly	بی نهایت درشت	0.7281
coarse Extra	خیلی درشت	0.8294
Coarse	درشت تر	0.8633
Coarse	درشت	0.8674
coarse Extremly	معمولی	0.8629
Fine	ریز	0.8689
Finer	ریزتر	0.8787
fine Extra	خیلی ریز	0.8817
fine Extremly	بی نهایت ریز	0.9103

در غیاب گرادیان دما، 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 ۲۵ nm معلق در سیال پایه را درون محیط فیلتر لیفی مورد نظر به تصویر می‌کشد.



شکل (۸):نمونه‌ای از شکل تغییر غلظت نانوذرات به قطر nm ۲۵ معلق درون سیال پایه در محیط فیلتر لیفی.

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.



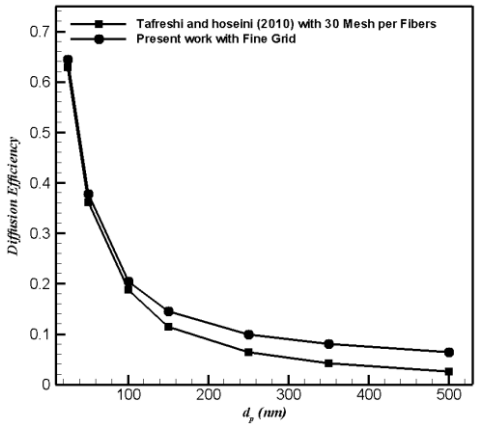
شکل (۹): تاثیر شبکه محاسباتی بر نتایج بازده جذب ذرات در اثر مکانیزم پخش براونی.

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.

در دیدگاه لاگرانژ، با استفاده از روش ردیابی ذرات (سنجش مداوم موقعیت مرکز جرم ذرات) و از طریق یک زیروال به زبان متلب، بازده جذب در اثر گیرش بدست آمده است. بر اساس این زیروال، چنانچه مرکز جرم یک ذره به نزدیکی فاصله‌ای معادل شعاع یک ذره از سطح فیبرها برسد، ذره موردنظر تحت اثر نیروی واندروالس گرفتار شده و از جریان، حذف می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

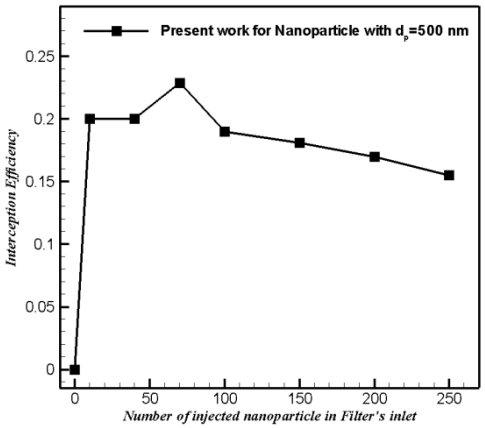
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]



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

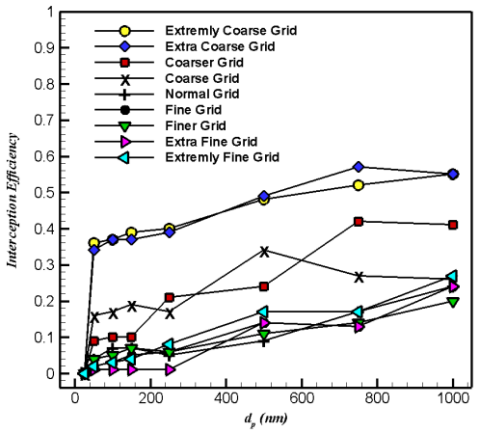
این نکته حائز اهمیت است که ذرات مورد استفاده در پژوهش حاضر، از نوع پایه رسی بوده و در شرایط استاندارد دارای چگالی $1000\ kg/m^3$، ضریب رسانش حرارتی $1{,}1\ W/m.°K$ و ظرفیت حرارتی در فشار ثابت $800\ j/kg.°K$ هستند [۳۱-۲۹].

شکل (۱۱)، استقلال نتایج حاصل شده از این قسمت را نسبت به تعداد ذرات تزریق شده در ورودی فیلتر، برای حالتی که ۱۰۰ ذره یا بیشتر در ورودی آن رها شده باشد، نشان می‌دهد.



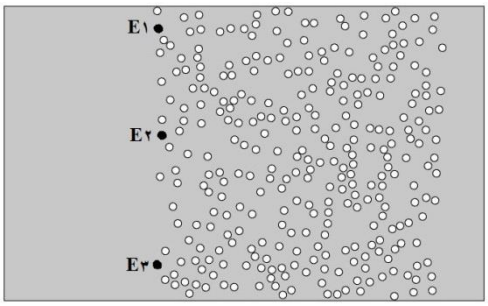
شکل (۱۱): تاثیر تعداد ذرات نزریق شده در ورودی فیلتر بر نتایج بازده جذب ذرات در اثر مکانیزم گیرش.

شکل (۱۲)، استقلال نتایج بازده جذب در اثر مکانیزم گیرش را نسبت به شبکه محاسباتی برای حالتی که شبکه محاسباتی از نوع ریز به پایین باشد، نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): تاثیر شیکه محاسباتی بر نتایج بازده جذب ذرات در اثر مکانیزم گیرش.

در این قسمت، فرض شده است که سیال پایه با دمای $298{,}15\ °K$ و فشار $101{,}325\ kpa$، وارد محیط فیلتر می‌شود. این سیال با گذر از سطح یک یا چند المنت گرمایی با دمای ثابت (این المنت‌ها بر اساس موقعیت خود، $E1$، $E2$ و $E3$ نامگذاری و در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند)، محیط فیلتر را ترک می‌کند. الیاف فیلتر بجز المنت‌های گرمایی، عایق فرض شده‌اند. برای دیواره‌های فوقانی و تحتانی فیلتر، از شرط مرزی تناوبی استفاده گردیده است.

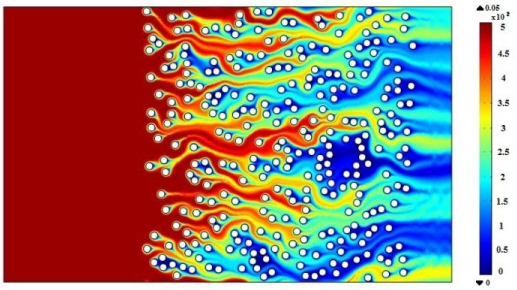


شکل (۱۳): شماتیک محیط فیلتر بهمراه الیاف و شرایط مرزی حاکم بر معادله انرژی

در حضور گرادیان دما، معادله پیوستگی برای نانوذرات (معادله (۵))، پخش (انتشار) نانوذرات در اثر گرادیان دما (پدیده ترموفورسیس) را نیز شامل می‌شود. نتایج شکل (۱۴) از حل همزمان معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت سیال پایه به دست آمده است. این نکته حائز اهمیت است که غلظت نانوذرات در جریان سیال-نانوذره رقیق مساوی یا کوچکتر از ۰،۰۵ می‌باشد ($C \leq$ ۰،۰۵) [۲۳]. در این قسمت، کسر حجمی نانوذرات در ورودی برابر ۰،۰۵ در نظر گرفته شده است؛ انتخاب این عدد بدلیل بزرگتر بودن مرتبه ضریب ترموفورسیس (10^{-9}) نسبت به حالات دیگر خواهد بود. شکل (۱۴)، تغییر غلظت نانوذرات با قطر $25\ nm$ معلق درون سیال پایه و در فیلتر لیفی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]

در حالتی که المنت گرمایی $E2$ با دمای $305\,^{\circ}K$، روشن و المنت‌های گرمایی $E1$ و $E3$، خاموش (یا عایق) باشند، را نشان می‌دهد.



شکل (۱۴): نمونه‌ای از شکل تغییر غلظت نانوذرات به قطر nm ۲۵ معلق درون سیال پایه در محیط فیلتر لیفی برای حالتی که ۳۰۵ روی سطح خود، $^{\circ}K$ با دمای ثابت Eالمنت گرمایی ۲ روشن باشد.

در این قسمت، با فرض آنکه المنت گرمایی $E2$، روشن و المنت‌های گرمایی $E1$ و $E3$، خاموش (یا عایق) باشند، تاثیر دماهای مختلف روی سطح المنت گرمایی $E2$ بر بازده جذب کلی ذرات (مجموع بازده جذب ذرات در اثر مکانیزم‌های پخش براونی و ترموفورسیس)، مطابق جدول (۲) سنجیده شده است.

جدول (۲): تاثیر دمای سطح المنت گرمایی E_2 روی محاسبات بازده جذب کلی ذرات

دمای سطح المنت گرمایی E۲ (کلوین)	بازده جذب کلی ذرات برای نانوذرات با قطرهای مختلف				
	۲۵ nm	۵۰ nm	۱۰۰ nm	۱۵۰ nm	۲۵۰ nm
۳۰۵	۰.۶۶۵۷۳	۰.۳۸۸۷۱	۰.۲۱۰۱	۰.۱۵۰۳۲	۰.۱۰۵۱۳
۳۱۰	۰.۶۶۵۷۳	۰.۳۸۸۷	۰.۲۱۰۰۹	۰.۱۵۰۳۱	۰.۱۰۵۱۲
۳۲۰	۰.۶۶۵۷۱	۰.۳۸۸۶۹	۰.۲۱۰۰۸	۰.۱۵۰۲۹	۰.۱۰۵۱
۳۴۰	۰.۶۶۵۶۹	۰.۳۸۸۶۵	۰.۲۱۰۰۴	۰.۱۵۰۲۵	۰.۱۰۵۰۶

همچنین، فرض شده است که المنت‌های گرمایی $E1$ و $E3$، روشن و المنت گرمایی $E2$، خاموش (عایق) باشند. در این حالت، تاثیر دمای سطح المنت‌های گرمایی $E1$ و $E3$ بر بازده جذب کلی ذرات مطابق جدول (۳)، بررسی شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، افزایش دمای سطح المنت‌ها، باعث کاهش آرامی در میزان بازده جذب ذرات کلی ذرات شده است؛ این کاهش در ذرات بزرگتر از nm ۱۵۰، کمی بیشتر است.

۶- جمع بندی

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

جدول (۳): تاثیر دمای سطح المنت‌های گرمایی $E1$ و $E3$ روی محاسبات بازده جذب کلی ذرات

المنتهای گرمایی		بازده جذب کلی ذرات برای نانوذرات با قطرهای مختلف				
$E3$	$E1$	۲۵ nm	۵۰ nm	۱۰۰ nm	۱۵۰ nm	۲۵ nm
۳۰۵	۳۰۵	۰.۶۶۵۷۳	۰.۳۸۸۷۱	۰.۲۱۰۱	۰.۱۵۰۳۱	۰.۱۰۵۱۳
۳۱۰	۳۱۰	۰.۶۶۵۷۲	۰.۳۸۸۷	۰.۲۱۰۰۹	۰.۱۵۰۳۱	۰.۱۰۵۱۲
۳۲۰	۳۲۰	۰.۶۶۵۷۱	۰.۳۸۸۶۹	۰.۲۱۰۰۸	۰.۱۵۰۲۹	۰.۱۰۵۱
۳۴۰	۳۴۰	۰.۶۶۵۶۹	۰.۳۸۸۶۹	۰.۲۱۰۰۴	۰.۱۵۰۲۹	۰.۱۰۵۰۶
۳۰۵	۳۱۰	۰.۶۶۵۷۳	۰.۳۸۸۷۱	۰.۲۱۰۱	۰.۱۵۰۳۲	۰.۱۰۵۱۳
۳۰۵	۳۱۰	۰.۶۶۵۷۳	۰.۳۸۸۷	۰.۲۱۰۰۹	۰.۱۵۰۳۱	۰.۱۰۵۱۳
۳۰۵	۳۴۰	۰.۶۶۵۷	۰.۳۸۸۶۹	۰.۲۱۰۰۸	۰.۱۵۰۳	۰.۱۰۵۱۳
۳۱۰	۳۰۵	۰.۶۶۵۷۳	۰.۳۸۸۷	۰.۲۱۰۱	۰.۱۵۰۳۱	۰.۱۰۵۱۳
۳۱۰	۳۲۰	۰.۶۶۵۷۲	۰.۳۸۸۷	۰.۲۱۰۰۹	۰.۱۵۰۳	۰.۱۰۵۱۲
۳۱۰	۳۴۰	۰.۶۶۵۷	۰.۳۸۸۶۶	۰.۲۱۰۰۴	۰.۱۵۰۲۵	۰.۱۰۵۰۴
۳۲۰	۳۰۵	۰.۶۶۵۷۲	۰.۳۸۸۶۹	۰.۲۱۰۰۹	۰.۱۵۰۳۱	۰.۱۰۵۱۳
۳۲۰	۳۱۰	۰.۶۶۵۷۲	۰.۳۸۸۶۹	۰.۲۱۰۰۸	۰.۱۵۰۳	۰.۱۰۵۱۲
۳۲۰	۳۴۰	۰.۶۶۵۷۲	۰.۳۸۸۶۹	۰.۲۱۰۰۸	۰.۱۵۰۳	۰.۱۰۵۱۲
۳۴۰	۳۰۵	۰.۶۶۵۷۱	۰.۳۸۸۶۸	۰.۲۱۰۰۸	۰.۱۵۰۳۱	۰.۱۰۵۱۴
۳۴۰	۳۱۰	۰.۶۶۵۷۱	۰.۳۸۸۶۷	۰.۲۱۰۰۷	۰.۱۵۰۳	۰.۱۰۵۱۲
۳۴۰	۳۴۰	۰.۶۶۵۷	۰.۳۸۸۶۶	۰.۲۱۰۰۶	۰.۱۵۰۲۸	۰.۱۰۵۱

مهم‌ترین نتایج این پژوهش را می توان بصورت زیر گزارش داد:

۱-در غیاب گرادیان دما، بازده جذب ذرات در اثر مکانیزم پخش براونی برای ذرات nm ۱۰۰ ~ ۲۵ بین ۶۴,۵ ~ ۲۰ درصد و برای ذرات nm ۱۰۰۰ ~ ۱۰۰ بین ۲۰ ~ ۵ درصد، متغیر است. دلیل این تفاوت، افزایش ضریب پخش براونی برای ذرات کوچکتر در معادله انتقال جرم نانوذرات می‌باشد. این ضریب در گستره ذرات nm ۱۰۰ ~ ۲۵ از مرتبه 10^{-10} ~ 10^{-9} و برای ذرات بزرگتر تا μm ۱ از مرتبه 10^{-12} ~ 10^{-11} است.

۲-در غیاب گرادیان دما، بازده جذب ذرات در اثر مکانیزم گیرش برای ذرات nm ۱۰۰ ~ ۲۵ حدود ۱ درصد یا کمتر بوده ولی برای ذرات بزرگتر تا μm ۱ بین ۲۵ ~ ۳,۵ درصد متغیر شده است. ۳-استفاده از المنت‌های گرمایی در فیلتر (پدیده ترموفورسیس)، اثر چندانی بر بازده جذب ذرات نداشته است. دلیل این امر را می‌توان سرعت بالای جریان در طول فیلتر دانست؛ طوری که فرصت کافی به ذرات نمی‌دهد تا بخوبی تحت تاثیر گرادیان دما قرار گیرند. ۴-در حضور گرادیان دما، افزیش دمای سطح المنت‌های گرمایی باعث کاهش بسیار آرامی در میزان بازده جذب ذرات خصوصاً برای ذرات بزرگتر از nm ۱۵۰، شده است. ۵-در حضور گرادیان دما، افزیش تعداد المنت‌های گرمایی باعث افزایش بسیار آرامی در میزان بازده جذب ذرات خصوصاً برای ذرات بزرگتر از nm ۱۵۰، شده است.

به نظر می رسد دلیل خوب عمل نکردن نیروی ترموفروسیس، سرعت بالای جریان در فیلترهای لیفی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]

است. پیشنهاد می شود در راستای ادامه این پژوهش، تاثیر نیروی ترموفروسیس بر فیلتراسیون ذرات در یک نانوفیلتر لیفی که جریان عبوری از آن، سرعت پایین داشته باشد و بر اساس انتقال حرارت جابجایی طبیعی عمل نماید، بررسی شود.

فهرست علائم

	علائم انگلیسی
C	غلظت نانوذرات
d_f	قطر الیاف، m
d_p	قطر نانوذرات، m
k	ضریب رسانش گرمایی، $W/\mathrm{m.^\circ K}$
Kn	عدد نادسن
p	فشار با بعد، pa
T	دمای با بعد، $^\circ K$
SVF	کسر حجمی جامد (درصد تراکم)
u	مولفه سرعت در جهت جریان، m/s
v	مولفه سرعت عمود بر جریان، m/s
	علائم یونانی
ρ	چگالی، kg/m^3
μ	ویسکوزیته دینامیکی، $kg/m.s$
λ	فاصله پویش آزاد متوسط مولکول‌های سیال پایه
	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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]

[20] M. Ghalambaz, A.R. Noghrehabadi, M. Ghanbarzadeh, Natural convection of nanofluidsover 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.

[۲۴] محمد قلمباز، بررسی جریان و انتقال حرارت لایه مرزی نانوسیالات برروی صفحه تخت، پایان‌نامه دکتری حرارت و سیالات، دانشگاه شهید چمران اهواز، گروه مهندسی مکانیک، اهواز، ۱۳۹۳.

[25] J. Buongiorno, Convective Transport in Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, 128, 2006, 240-250.

[۲۶] علی بهسرشت، بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد در محیط متخلخل اشباع شده توسط نانوسیال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه شهید چمران اهواز، گروه مهندسی مکانیک، اهواز، ۱۳۹۱.

[۲۷] قنبرعلی شیخ زاده، مجید دستمالچی، مطالعه عددی انتقال نانوذرات در جابه جایی طبیعی نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم با خواص متغیر در یک محفظه مربعی، روشهای عددی در مهندسی، شماره ۳۱(۲)، ۱۳۹۱، ۱۱۳-۹۹.

[28] L. Talbot, R.K. Cheng, R.W. Schefer, D.R. Willis, Thermophoresis of particles in a heated boundary layer, J. Fluid Mech., 101, 1980, 737.

[29] E.ToolBox, Specific heat of common substances, Retrieved 2013-1-11 from http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html

[30] E.ToolBox, Densities of common material. Retrieved 2013-1-11, from http://www.engineeringtoolbox.com/densitymaterials-d_1652.html.

[31] E.ToolBox, Thermal Conductivity of Materials and Gases, Retrieved 2013-1-11 from http://www.engineeringtoolbox.com/thermalconductivity-d_429.html.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.1.1.0]