

بررسی کارایی فیلترهای تولیدشده از لایه‌های نانولیفی در جذب ناخالصی و آلودگی سوخت دیزل

علیرضا شیاسی^۱، پرویز نورپناه^{۲*}، احمد موسوی شوشتری^۲
^۱ دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی اصفهان
^۲ دانشیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

چکیده

موتورهای دیزل به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین پایه‌های حمل‌ونقل و صنعت در جوامع مدرن به خدمت گرفته می‌شوند. ویژگی‌های جذاب اقتصادی و فنی، قابلیت اعتماد، سادگی، طول عمر مفید طولانی و رانش‌پذیری مناسب، برخی از مشخصات خاص این موتورها را تشکیل می‌دهند. به دلیل فشار بالا در پمپ‌ها و تجهیزات سوخت‌رسانی، عملکرد صحیح این موتورها به سوخت تمیز وابسته است. لذا انتخاب مناسب‌ترین تجهیزات تصفیه سوخت اهمیت زیادی دارد. فیلترهای پلیمری متداول علی‌رغم اینکه بسیاری از ناخالصی‌های گازوئیل را حذف می‌کنند، از جداسازی ذرات میکرونی عاجزند. به‌علاوه حذف قطرات ریز آب به‌وسیله این فیلترها به‌سختی امکان‌پذیر است. لایه‌های ساخته شده از نانوالیاف در یک دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ظرافت و نسبت سطح به حجم بالای لایه‌های نانولیفی آن‌ها را قادر می‌سازد که در جداسازی ذرات ریز میکرونی، دقیق و مؤثر عمل کنند. در این پژوهش با تولید لایه نانولیفی مناسب، به بررسی رفتار جذب آب و عملکرد جداسازی ذرات ریز میکرونی از گازوئیل پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: فیلتراسیون، نانوالیاف، گازوئیل، ذرات ریز میکرونی

مقدمه

کارایی و طول عمر پمپ‌ها، انژکتور و تجهیزات سوخت‌رسانی در موتورهای دیزل وابستگی شدیدی به سوخت تمیز دارند. ذرات ساینده می‌توانند بخش‌های مختلف پمپ‌ها و دریچه‌های عبور سوخت و هوا را با سایش و خوردگی روبه‌رو کنند. همچنین شیرهای انتقال و اجزاء پمپ‌های خطی از دیگر نقاط حساس به شمار می‌روند که باید سطح پوشش آن‌ها حفظ شود. در این میان ناخالصی‌هایی که بیش‌ترین آسیب را به سیستم تزریق سوخت وارد می‌کنند، ذرات ساینده در محدوده ابعاد ۲ تا ۱۰۰ میکرون هستند. آب هم به‌عنوان یک آلاینده می‌تواند در گازوئیل حضور داشته باشد و قادر است آثار تخریبی مشابهی با سایر آلاینده‌ها روی پمپ‌ها و انژکتور داشته باشد [۱].

به‌منظور جداسازی و رفع آلودگی سوخت در خودروها معمولاً از یک یا چند فیلتر استفاده می‌شود. کاغذ فیلترهای متداول از حذف ذرات بسیار کوچک، خصوصاً ذرات معلق کوچک‌تر از ۵ میکرون عاجزند و فقط قادر به حذف محدود بخشی از این آلودگی‌ها هستند. برخی از این فیلترها تنها توانایی جداسازی آب در سوخت را دارند. در این میان غشاهای نانولیفی نیز از اهمیت خاصی برخوردارند. فشار عملکرد نسبتاً پایین، قابلیت عبور جریان بالا، هزینه کم و سهولت انجام عملیات جداسازی از مزایای غشاهای نانولیفی در مقایسه با میکروغشاها و غشاهای اسمز معکوس به‌شمار می‌روند [۲].

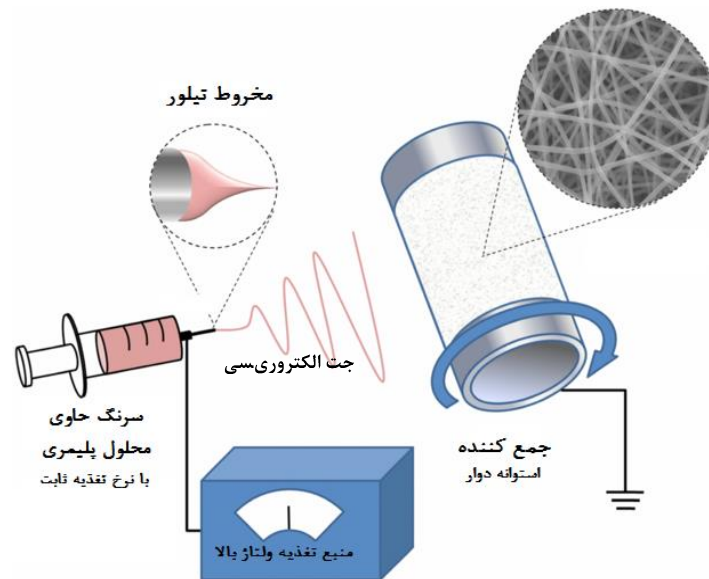
در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای که به مقوله جداسازی امولسیون‌های آب و نفت شده است. استفاده از غشاها در جداسازی آب از دیگر سیال‌ها، خصوصاً سیال‌های آلی از جمله نفت و مشتقات آن سابقه‌ای طولانی دارد. این عمل که بر اساس خاصیت آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح لایه و اختلاف در کشش سطح سیال‌ها مطرح می‌شود، بسته به خواص سیال آلی و نحوه کاربرد غشا پیشرفت‌های متنوعی در سال‌های اخیر داشته است که در این خصوص می‌توان به روش اصلاح سطحی پلیمرهای مورد استفاده متداول در فیلترها، مخلوط کردن، پیوندزنی به کمک پلاسما و قرار دادن لایه‌ای بر روی سطح اشاره کرد. با این حال در بسیاری از موارد جدایش ذرات آب کوچک‌تر از ۰/۱ میکرون بسیار مشکل است. فیلترهای نانولیفی روشی مؤثر و اقتصادی برای غلبه بر این مشکل به شمار می‌روند [۲]. در آخرین تحقیقات بررسی شده در این زمینه، لایه‌های هیبریدی با ساختار چندلایه باهدف افزایش مقاومت لایه و تقویت جریان با دبی‌های بالاتر توسعه یافته‌اند. ساختار هیبریدی این فیلترهای عموماً از یک بستر متخلخل با استحکام بالا که نقش پشتیبانی مکانیکی را انجام می‌دهد و یک لایه نازک که عملیات فیلتراسیون را بر عهده دارد، تشکیل می‌گردد [۳].

در پژوهشی که توسط Shin و همکارانش در خصوص بررسی اثر مقدار تخلخل لایه در راندمان جداسازی امولسیون‌های مایع-مایع به وسیله نانوالیاف انجام شد، ارتباط معکوس تخلخل لایه با مقدار آب جداشده به‌وسیله لایه گزارش گردید. آن‌ها افزایش مقدار نانوالیاف را عامل اصلی کاهش اندازه حفرات لایه و افزایش افت فشار در دو طرف فیلتر معرفی کردند. با این حال نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که فیلترهایی که مقدار بیش‌تری از نانوالیاف دارند، راندمان جداسازی بالاتری در حذف قطرات ریز آب از خود نشان می‌دهند. این گروه همچنین پس از اشاره به سطح مخصوص نانوالیاف در مقایسه با لیاف درشت‌تر، به بررسی زاویه تماس آب و نفت روی سطوح مختلف پرداختند و از اختلاف بین کشش سطحی این آب و نفت به‌عنوان یک عامل مهم و تأثیرگذار در جدایی دو فاز در سطح لیاف یاد کردند [۴]. در پژوهشی که Shin و همکارانش انجام داده‌اند، لیاف شیشه بیشترین قابلیت ترشوندگی در تماس با آب را از

خود نشان داده‌اند. تحقیقات این محققان همچنین نشان داد که مقدار زیادی از قطرات آب ریزتر از ۵۰ میکرون پس از عبور از لایه الیاف شیشه با ضخامت بیشتر توسط این لایه جذب شده‌اند. این نتایج با نتایجی که قبلاً هم در مشاهدات *Moses, Hazlett, Voyutskii* و *Basu* اعلام شده بود و کارایی بهینه را در جداسازی با ضخامت لایه‌های الیاف با ترشوندگی زیاد می‌دانست همخوانی کامل دارد [۸-۵].

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از پودر کوپلیمر پلی‌اکریلونیتریل (PAN) حاوی ۹۳/۷٪ اکریل نیتریل و ۶/۳٪ متیل اکریلات محصول شرکت پلی اکریل اصفهان با متوسط وزن مولکولی $M_n = 70000$ و پلیمر پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) با متوسط وزن مولکولی $M_n = 6000$ محصول شرکت Merck آلمان استفاده شد. پلیمرهای فوق در حلال N,N-دی متیل فرم آمید (DMF) با خلوص بالاتر از ۹۹٪ محصول شرکت Merck آلمان حل و روی کاغذ صافی سلولزی بدون خاکستر ساخت شرکت Whatman انگلستان به‌عنوان زیرلایه‌ی نانوالیاف الکتروریسی شد.

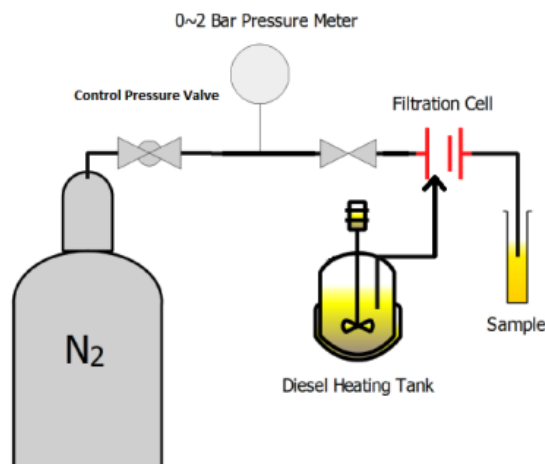


شکل ۱- شمای فرآیند الکتروریسی

غلظت محلول پلیمری در تولید نانوالیاف پارامتری مهم و تأثیرگذار است. به‌منظور یافتن غلظت بهینه برای تولید وب نانوالیاف و بر اساس تحقیقات گذشته در زمینه تولید نانوالیاف پلی‌اکریلونیتریل، برای به‌دست آوردن قطر بهینه نانوالیاف از طراحی آزمایش در محدوده غلظت ۹٪ تا ۱۱٪ PAN استفاده شد. به‌منظور افزایش تخلخل لایه از روش تولید مخلوط دوجزئی نانوالیاف و حذف یک جز استفاده شد. برای این کار محلول همگنی از PAN و PEG با نسبت ۷۰ به ۳۰ در حلال DMF تهیه گردید و پس از انجام فرایند الکتروریسی، به‌منظور حذف جزء PEG، لایه نانوالیاف را به مدت ۶ ساعت در حمام آب گرم شناور کردیم. انحلال PEG به شکل‌گیری حفرات بسیار ریز در سطح و عمق نانوالیاف منجر می‌شود. استفاده از مقادیر بیشتر PEG در محلول باعث ناپیکنواختی محلول و شرایط بی‌ثبات الکتروریسی شده و فرآیند الکتروریسی آن امکان‌پذیر نخواهد بود. از دیگر دلایل انتخاب این ترکیب درصد می‌توان به سهولت عملیات الکتروریسی، توزیع مناسب قطری و یکنواختی قطری نانوالیاف تولید شده از آن اشاره کرد.

برای شمارش ذرات ریز میکرونی در فرآورده‌های نفتی و ارزیابی راندمان جداسازی آن‌ها پس از عبور از فیلتر از ذره‌شمار مدل S40 ساخت شرکت PAMAS آلمان متعلق به آزمایشگاه کنترل کیفیت مواد نفتی - مرکز انتقال نفت شهید بهشتی (اصفهان) - استفاده شد. دستگاه یاد شده قادر به اندازه‌گیری ذرات ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرونی موجود در هر ۰/۱ میلی‌لیتر سیال مطابق با استاندارد ISO-4402 بوده و با نرخ تغذیه ۱۰ و ۲۵ میلی‌لیتر در دقیقه تحت فشارهای کم (۰ تا ۶ بار) و فشارهای زیاد (۳ تا ۴۲۰ بار) کار می‌کند. همچنین برای اندازه‌گیری آب همراه با گازوئیل از تیترا تور کارل فیشر مدل MKC-501 ساخت شرکت Kyoto Electronics ژاپن متعلق به آزمایشگاه کنترل کیفیت مواد نفتی - مرکز انتقال نفت شهید بهشتی (اصفهان) - استفاده شد. این دستگاه قادر است آب موجود در محلول را در محدوده ۱۰ میکروگرم تا ۱۰۰ میلی‌گرم نمونه و با دقت ۰/۱ میکروگرم اندازه‌گیری کند. اندازه‌گیری آب موجود در گازوئیل در این تحقیق تحت روش آزمون استاندارد ASTM-D2709 انجام پذیرفت.

در این آزمایش از گاز نیتروژن - که گازی بی‌اثر است - برای تأمین نیروی پیش‌رانندگی سیال از میان فیلتر استفاده شد. پس از تنظیم فشار خروجی کپسول، گاز نیتروژن با اعمال فشار به گازوئیل - که در ظرف محفظه پشت فیلتر جمع شده است - آن را از درون سل فیلتراسیون عبور می‌دهد و در ظرف نمونه جمع‌آوری می‌شود. فشار اعمال شده به گازوئیل بر روی فشارسنج نشان داده می‌شود. نرخ جریان گازوئیل از تقسیم حجم سیال عبوری بر سطح مقطع فیلتر در زمان آزمایش به دست می‌آید.



شکل ۲- چیدمان آزمایش

نتایج و بحث

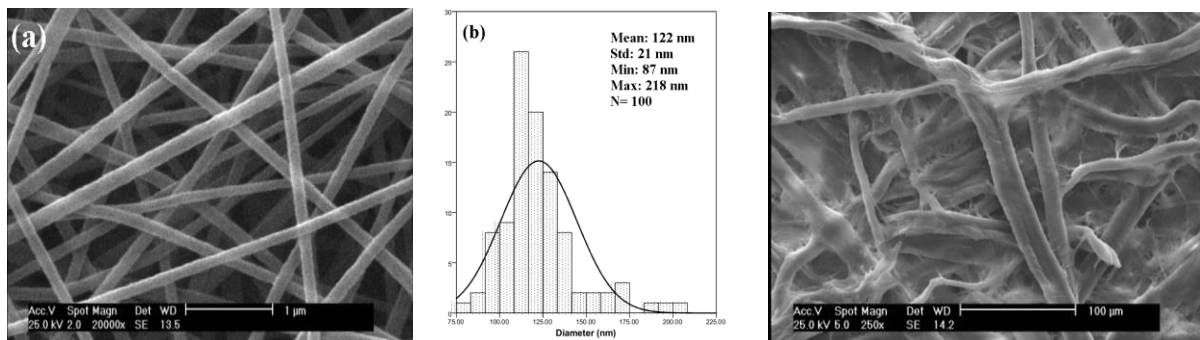
۱. بهینه‌سازی قطر نانوالیاف

در فرایند الکتروریسی برای رسیدن به قطر مناسب نانوالیاف می‌توان از تغییر در پارامترهای مختلفی نظیر خصوصیات محلول پلیمری (غلظت، ویسکوزیته، درصد مخلوط پلیمری و...)، متغیرهای فرآیندی (فاصله تا صفحه جمع‌کننده، ولتاژ، نرخ تغذیه و...) و شرایط محیطی نظیر دما و رطوبت استفاده کرد. در این پژوهش برای انجام آزمایش‌های اولیه از میان عوامل ذکر شده، غلظت محلول پلیمری، ولتاژ الکتروریسی و فاصله نوک سوزن تا صفحه جمع‌کننده به‌عنوان متغیرهای اصلی اثرگذار انتخاب گردید [۹]. سطوح هرکدام از پارامترها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- محدوده سطوح انتخابی برای طراحی آزمایش‌ها

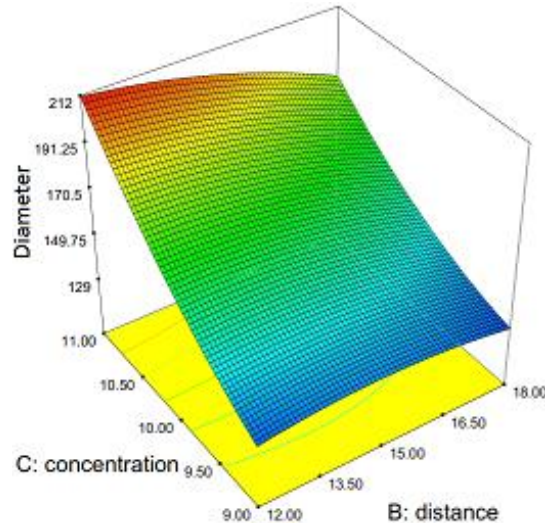
پارامترها	واحد	حد پایین	حد بالای
ولتاژ اعمالی (A)	kV	۱۰	۱۸
فاصله (B)	cm	۱۲	۱۸
غلظت محلول (C)	% W/W	۹	۱۱

از میان روش‌های طراحی آزمایش، روش‌شناسی رویه پاسخ (RSM) یکی از جدیدترین روش‌های طراحی آزمایش است که به دلیل کارایی بالاتر نسبت به دیگر روش‌ها، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. به منظور طراحی آزمایش‌ها در این تحقیق از RSM و تکنیک طراحی BBD استفاده شده است. با توجه به اینکه هر پارامتر در این تحقیق در سه سطح مورد بررسی قرار گرفته، تعداد ۱۷ آزمایش طراحی و انجام گرفت. پس از انجام آزمایش‌ها، نتایج حاصل از الکتروریسی با یک معادله درجه ۲ برازش شده و آنالیز واریانس آن بررسی شد. به منظور تأیید صحت مدل، ضریب تعیین (R²) بررسی شد. ضریب تعیین ۰/۹۵۳۰ تأیید می‌کند تغییر در قطر نانوالیاف به طور قابل قبولی با تقریب حاصل از روش رویه پاسخ قابل انطباق است؛ بنابراین اعتبار مدل طراحی شده تأیید می‌گردد. به این ترتیب شرایط بهینه فاصله الکتروریسی ۱۳/۱۵ سانتیمتر، ولتاژ ۱۷/۵ کیلوولت و غلظت ۹ درصد برای پارامترهای فاصله، ولتاژ و غلظت توسط نرم‌افزار تعیین شد و برای راستی‌آزمایی، نمونه‌ای با شرایط تعیین شده تولید گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری قطر نانوالیاف تولید شده تحت شرایط بهینه نشان می‌دهد که مدل توانایی خوبی در پیش‌بینی قطر نانوالیاف دارد.



شکل ۳- تصویر SEM گرفته شده از کاغذ صافی سلولزی (راست)، نانوالیاف تولید شده با شرایط بهینه (چپ) و توزیع قطری آن (وسط)

اثر متقابل پارامترهای فاصله الکتروریسی و غلظت محلول بر روی قطر در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در غلظت‌های پایین، فاصله الکتروریسی اثر قابل توجهی ندارد در حالی که با افزایش غلظت، اثرگذاری پارامتر فاصله معنادارتر شده و با افزایش فاصله در غلظت‌های بالا قطر کاهش می‌یابد.



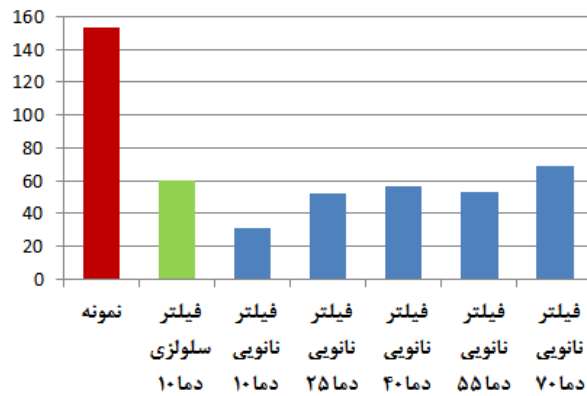
شکل ۴- اثر فاصله نوک سوزن تا صفحه جمع کننده و غلظت محلول بر روی قطر متوسط ایف

۲. ارزیابی عملکرد جداسازی

از آنجاکه عوامل متعددی در رفتار عبوری گازوئیل اثرگذار بوده و برخی از آن‌ها بر روی نتایج دیگر عوامل تأثیر می‌گذارند، نحوه‌ی ارزیابی عملکرد جداسازی را در این پژوهش به سه مرحله تقسیم گردید. در ابتدا لایه نانولیفی را که به مدت سه ساعت تولید شده بود را به‌عنوان نمونه ثابت برای تمامی آزمایش‌ها در نظر گرفته و در پنج آزمایش جداگانه، هر بار ۳۰ میلی‌لیتر گازوئیل را تحت فشار ثابت و پس از رساندن به دمای مشخص از آن عبور دادیم. پس از اندازه‌گیری میزان آب و تعداد ذرات موجود در آن، دمایی را که از نظر بهینه‌تر از بقیه حالت‌ها بود را به‌عنوان دمای مرجع برای بقیه مراحل آزمایش انتخاب کردیم. در ادامه نتایج جداسازی توسط فیلترهایی با مدت زمان الکترورسی متفاوت بررسی گردید. در این مرحله، در هر آزمایش ۳۰ میلی‌لیتر گازوئیل را پس از رساندن به دمای مرجع و تحت فشار ثابت، از لایه‌های نانویی که به مدت ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ ساعت الکترورسی شده بودند، عبور داده شد و پس از تحلیل نتایج میزان جداسازی آب و ذرات معلق میکرونی توسط فیلتر نانویی، لایه‌ی بهینه انتخاب گردید. در نهایت عملکرد فیلتراسیون تحت پنج فشار متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت.

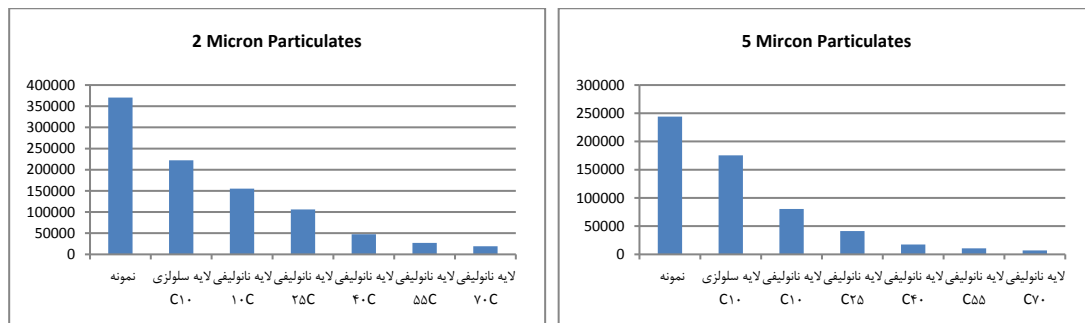
الف. بررسی اثر دما

رفتار دینامیکی گازوئیل همانند اغلب سیالات به دما وابسته است. علت آن تغییر ویسکوزیته دینامیکی گازوئیل با دما است. گازوئیل در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد به حالت ژله‌ای درآمده و دیگر نمی‌تواند از منافذ فیلترها و تجهیزات سوخت‌رسانی عبور کند. لذا عبور گازوئیل از منافذ ساختارهای متخلخلی همچون فیلترها نیز به دما وابسته بوده و لازم است اثر دما بر راندمان جداسازی مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور گازوئیل را ابتدا تا دماهای ۱۰، ۲۵، ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه حرارت داده و سپس آن را تحت فشار از فیلترها عبور دادیم. نتایج مرتبط با این آزمایش‌ها در نمودارهای زیر آمده است.

Water Contaminates (ppm)


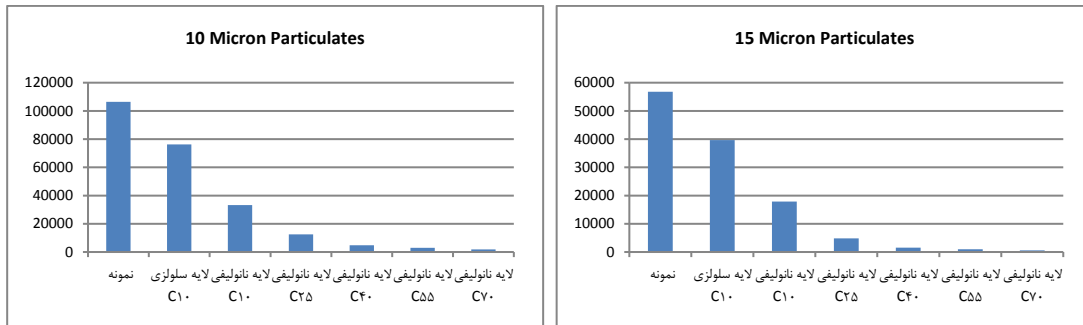
شکل ۵- نمودار میزان آب موجود به همراه گازوئیل.

نمودار بالا نشان می‌دهد میزان آب موجود در گازوئیل در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد پس از عبور از کاغذ صافی‌های سلولزی از ۱۵۳ ppm به ۶۰ ppm کاهش می‌یابد. با افزودن لایه نانولیفی در میان دو کاغذ سلولزی، میزان آب موجود در گازوئیل در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد پس از عبور از این مجموعه به ۳۱٫۵ ppm کاهش می‌یابد. با افزایش دما از ۱۰ به ۲۵ درجه سانتی‌گراد، جذب آب در لایه کاهش می‌یابد و مقدار آن برای دماهای ۲۵، ۴۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد در محدوده ۵۲-۵۷ ppm خواهد بود. با افزایش دما جذب آب کاهش بیشتری داشته و مقدار آن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به حدود ۶۸ ppm می‌رسد. کاهش جذب آب می‌تواند ناشی از افزایش انرژی جنبشی مولکول‌های آب و شکل‌گیری قطرات ریزتر در اثر افزایش دما باشد.



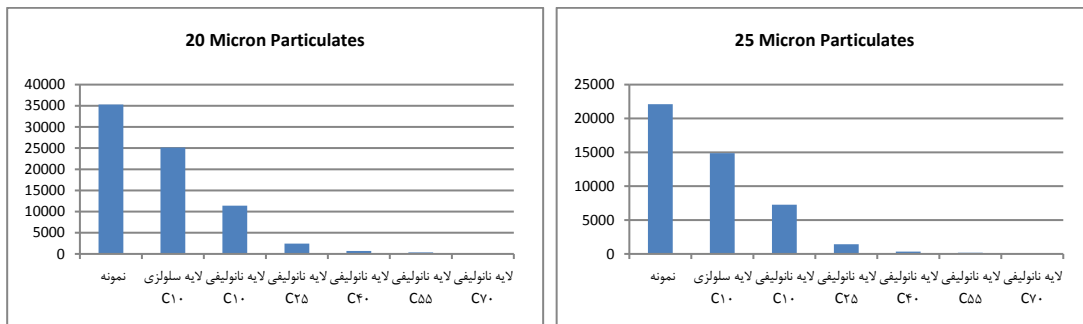
شکل ۶- نمودار فراوانی ذرات ریز ۲ و ۵ میکرونی همراه گازوئیل.

نتایج آزمایش تعداد ذرات ۲ و ۵ میکرونی همراه با گازوئیل در نمودارهای شکل ۱۳ آمده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد علی‌رغم کاهش تعداد این ذرات پس از عبور از فیلترهای نانویی، در دماهای پایین بهره‌وری این جداسازی - با وجود بهبود نسبت به کاغذ صافی سلولزی معمولی - چندان چشم‌گیر نیست. ولی از دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به بالا، میزان جداسازی ذرات ۲ و ۵ میکرونی افزایش شدیدی می‌یابد. افزایش دما ضمن افزایش انرژی جنبشی ذرات ریز منجر به تورم، خارج شدن و انحلال PEG باقی‌مانده در عمق نانوالیاف می‌شود. بدین ترتیب با ژله‌ای شدن و انحلال این بخش از الیاف نانویی، حفرات بیشتری در درون نانوالیاف برای احتباس و گیرافتادن ذرات ریز ایجاد می‌شود. لذا با افزایش دما - خصوصاً از دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به بالا - با رشد چشم‌گیر جداسازی ذرات ریز میکرونی از گازوئیل مواجه می‌شویم.



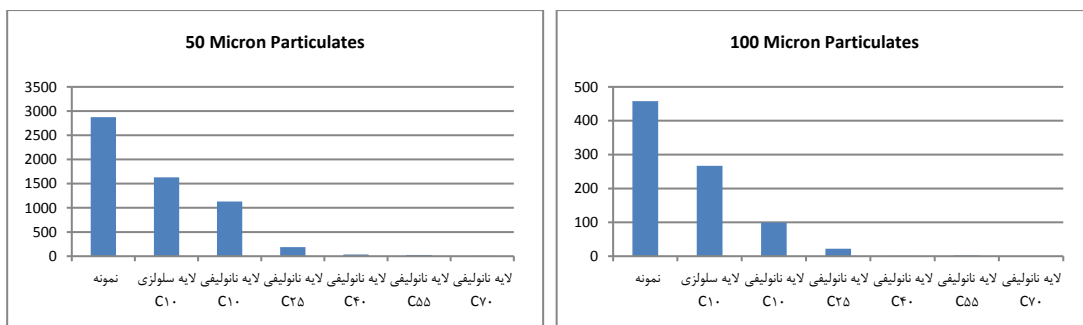
شکل ۷- نمودار فراوانی ذرات ریز ۱۰ و ۱۵ میکرونی همراه گازوئیل

برای ذرات ۱۰ و ۱۵ میکرونی روند جداسازی از دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با شدت بیشتری آغاز می‌شود. علت این است که علی‌رغم تکرار روند گفته شده برای ذرات ۲ و ۵ میکرونی، ابعاد بزرگ‌تر این ذرات به احتباس فیزیکی شدت بیشتری می‌بخشد. جداسازی ذرات ۲۰ و ۲۵ میکرونی نیز با همین استدلال قابل توجیه است.



شکل ۸- نمودار فراوانی ذرات ریز ۲۰ و ۲۵ میکرونی همراه گازوئیل

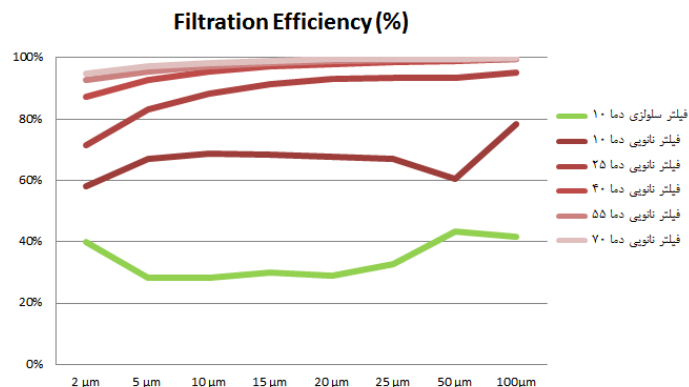
با افزایش ابعاد ذرات معلق به ۵۰ و ۱۰۰ میکرون، کاهش تعداد این ذرات به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که راندمان جداسازی ذرات ۱۰۰ میکرونی برای گازوئیل با دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بیش از ۷۵ درصد بوده و راندمان جداسازی ذرات ۵۰ و ۱۰۰ میکرونی برای گازوئیل با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب بیش از ۹۰ و ۹۵ درصد است.



شکل ۹- نمودار فراوانی ذرات ریز ۵۰ و ۱۰۰ میکرونی همراه گازوئیل

پس از ارزیابی راندمان جداسازی فیزیکی و همچنین جذب آب صورت گرفته توسط فیلتر نانویی، دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای انجام مراحل بعدی آزمایش انتخاب شد. علت این انتخاب این است که اولاً با توجه به شرایط اقلیمی و آب‌وهوای کشور، افزایش دمای گازوئیل به ۴۰ درجه سانتی‌گراد مستلزم صرف انرژی زیادی نخواهد بود. ثانیاً درحالی که میزان حذف آب از گازوئیل توسط لایه نانولیفی در این دما نسبت به دماهای مجاور (۲۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد)

بسیار نزدیک به هم است، امکان حبس ذرات میکرونی معلق در گازوئیل در این دما بیش‌تر از دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است.

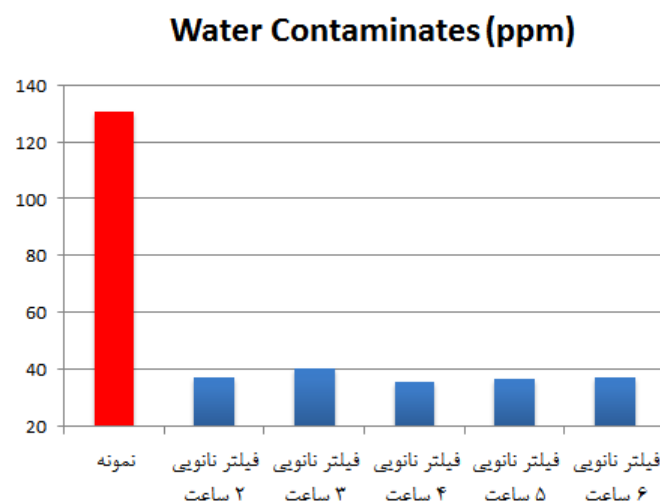


شکل ۱۰- نمودار راندمان جداسازی ذرات در دماهای مختلف

ب. بررسی اثر مدت زمان الکتروروسی

مدت‌زمان الکتروروسی تعیین‌کننده تراکم الیاف در سطح و فشردگی لایه است. هر چه مدت‌زمان الکتروروسی بیش‌تر باشد، تعداد الیاف در ساختار لایه بیش‌تر است؛ به‌گونه‌ای که در یک واحد از سطح، مقدار بیش‌تری از الیاف بر روی هم تشکیل می‌شوند. از آنجاکه قرارگیری نانوالیاف در طی فرآیند الکتروروسی نظم خاصی نداشته و تقریباً تصادفی است، لذا با افزایش تراکم الیاف در لایه، مسیر سیال و ذرات همراه با آن در حین عبور با پیچیدگی و مقاومت بیش‌تری روبه‌رو می‌شوند. این تماس مضاعف و پیچیدگی مسیر که از آن به پیچیدگی تخلخل یاد می‌شود، موجب افزایش فشار در سمت ورود سیال می‌گردد و بنابراین افت فشار بیش‌تری در سیال در دو طرف فیلتر اتفاق خواهد افتاد و از شار عبوری از فیلتر کاسته خواهد شد.

شکل ۱۱ میزان آب باقی‌مانده در نمونه‌های گازوئیل پس از عبور از فیلترهای نانویی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی لایه‌های نانولیفی به دلیل ناهمواری‌های سطحی که در مقیاس نانو دارد، در تماس با قطرات آب رفتار پدیده لوتوس را از خود نشان می‌دهد که به شکل‌گیری قطرات درشت‌تر آب از قطرات ریز منجر می‌شود.

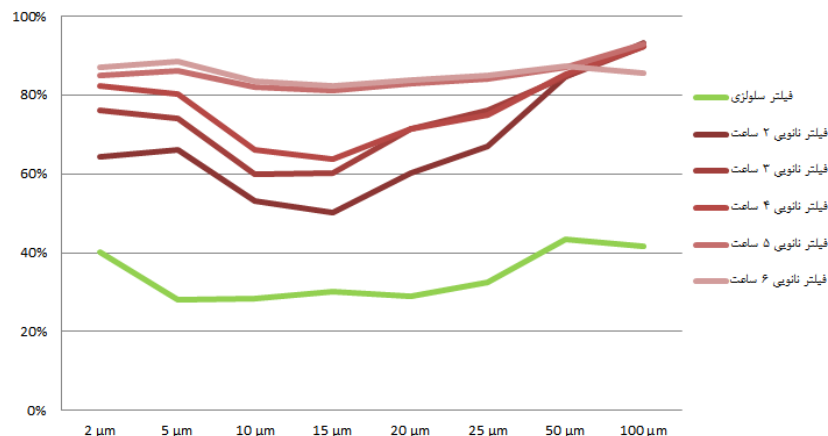


شکل ۱۱- نمودار میزان آب موجود به همراه گازوئیل

راندمان جداسازی ذرات ریز میکرونی در شکل ۱۲ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود لایه سلولزی - که به‌عنوان زیرلایه در تولید نانوالیاف به کار گرفته شد - نتوانسته است در جداسازی ذرات میکرونی موفق عمل کند و به‌طور میانگین برای ذرات ۵ تا ۲۵ میکرونی تنها ۳۰ درصد موفق بوده است. عملکرد این لایه در بهترین نتایج حتی به ۵۰ درصد هم نمی‌رسد؛ اما با افزودن نانوالیاف به لایه شاهد یک جهش در جداسازی خصوصاً در ذرات درشت ۵۰ و ۱۰۰ میکرونی هستیم. این در حالی است که جداسازی ذرات ریز میکرونی برای لایه‌های نانوالیاف که به مدت ۵ و ۶ ساعت الکترورسی شده بود با بیش از ۸۰ درصد موفقیت صورت پذیرفته است.

راندمان جداسازی ذرات توسط فیلترهای نانولیفی

تولید شده در مدت زمان‌های مختلف الکترورسی

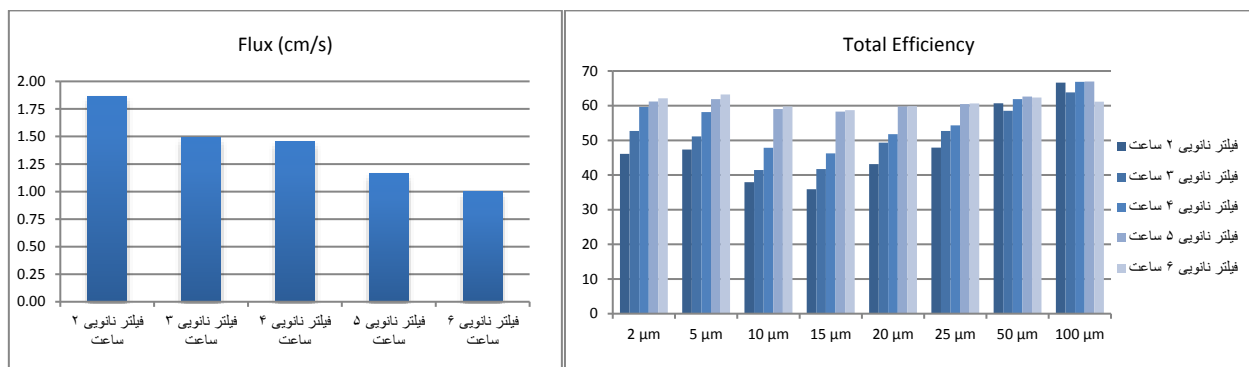


شکل ۱۲- نمودار راندمان جداسازی ذرات ریز میکرونی

از آنجاکه تفاوت در مدت‌زمان الکترورسی تأثیر زیادی در رفتار حذف آب از گازوئیل نداشته است، برای ارزیابی توأم راندمان حذف آب و جداسازی ذرات ریز میکرونی، از رابطه زیر استفاده گردید.

$$\text{Total Efficiency} = \text{Water Separation (\%)} \times \text{Particulates Filtration (\%)}$$

در این رابطه، از ضرب راندمان حذف آب و جداسازی ذرات ریز میکرونی - که اعدادی بی‌بُعد هستند - می‌توان به جمع‌بندی کلی در خصوص اثر کلی فاکتورهای جداسازی رسید. همان‌طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، لایه‌های تهیه شده از الکترورسی به مدت ۵ و ۶ ساعت رفتار نسبتاً یکسانی داشته و در بسیاری از شرایط توانسته‌اند با اختلاف بیش‌تری نسبت به دیگر لایه‌ها به جداسازی توأم آب و ذرات ریز میکرونی بپردازند.



شکل ۱۳- نمودارهای شار عبور گازوئیل (چپ) و کارایی کلی فیلترهای نانویی در جذب آب و ذرات ریز میکرونی (راست)

همان‌طور که انتظار می‌رود و در شکل ۱۳ دیده می‌شود، افزایش مدت الکترورسی، شار گازوئیل عبوری از لایه را کاهش می‌دهد. لذا با توجه به این موضوع، لایه نانولیفی الکترورسی شده به مدت ۵ ساعت به‌عنوان لایه بهینه انتخاب گردید.

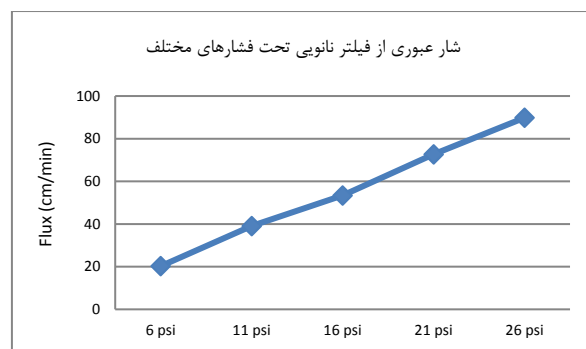
پ. بررسی اثر فشار

از آنجاکه منافذ لایه‌های تهیه شده از نانوالیاف بسیار کوچک‌تر از کاغذ صافی‌های متداول است، عبور گازوئیل از آن نیازمند اعمال فشار است. همان‌طور که گفته شد، در این پژوهش از گاز نیتروژن به‌عنوان تأمین نیروی پیش‌راننده سیال استفاده گردید. با توجه به این نکته که مایعات برخلاف گازها قابلیت فشرده‌پذیری بسیار کمی دارند، فشار اعمال شده مستقیماً روی سرعت عبور سیال از لایه اثر می‌گذارد و شار عبوری از لایه فرآیند جداسازی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. لذا بررسی اثر فشار ضروری به نظر می‌رسد. برای بررسی اثر فشار بر روی فرآیند جداسازی، گازوئیل را در پنج فشار مختلف از فیلتر نانویی عبور دادیم. جدول ۲ نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده را در فشارهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری آب و تعداد ذرات ریز میکرونی موجود در گازوئیل پس از عبور از فیلترهای نانویی تحت فشارهای مختلف

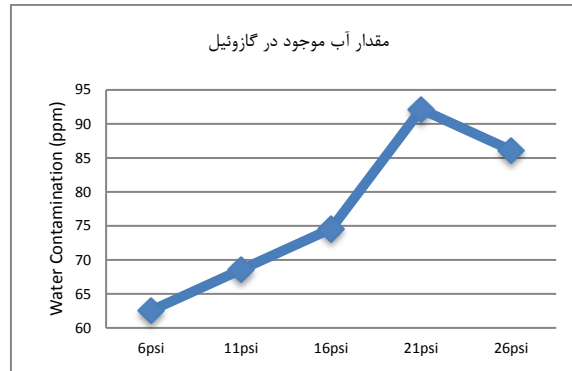
نمونه گازوئیل فیلتر نشده	۶ psi	۱۱ psi	۱۶ psi	۲۱ psi	۲۶ psi	
۱۵۳/۰۷	۶۲/۵۵	۶۸/۵۶	۷۴/۵۸	۹۲/۱۶	۸۶/۱۳	مقدار آب موجود (ppm)
	۲۰/۲۵	۳۹/۰۵	۵۳/۳۷	۷۲/۶۸	۸۹/۸۱	شار عبوری (cm/min)
۴۵۳۸۰۹	۷۶۴۹۹	۵۹۹۱۷	۶۲۲۸۸	۱۱۰۴۰۸	۱۲۷۵۰۲	۲ μm
۱۵۶۱۸۴	۳۰۴۹۰	۲۳۱۱۴	۲۶۱۰۵	۴۵۶۲۵	۵۴۱۹۵	۵ μm
۲۴۳۳۶	۸۵۶۲	۶۲۵۸	۷۲۰۵	۱۱۷۶۸	۱۵۸۴۰	۱۰ μm
۷۰۱۰	۲۶۸۷	۱۸۹۸	۲۲۶۳	۳۷۸۱	۵۷۹۸	۱۵ μm
۳۱۰۹	۱۰۰۰	۷۰۳	۹۳۲	۱۷۳۲	۲۹۰۲	۲۰ μm
۱۵۹۸	۴۷۵	۳۳۲	۴۶۷	۹۲۶	۱۶۳۵	۲۵ μm
۲۲۳	۴۵	۲۸	۵۱	۹۸	۱۴۷	۵۰ μm
۳۹	۵	۲	۷	۱۱	۱۴	۱۰۰ μm

همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، با افزایش فشار، شار عبوری از فیلتر تقریباً به‌صورت خطی افزایش یافته است. لذا می‌توان افزایش فشار را معادل با افزایش شار در نظر گرفت. شکل ۲۲ نشان می‌دهد که با افزایش فشار، میزان آب باقی‌مانده در گازوئیل پس از عبور از فیلتر نانویی بیش‌تر شده است.



شکل ۱۴- شار گازوئیل در حین عبور از فیلتر نانویی تحت فشارهای مختلف

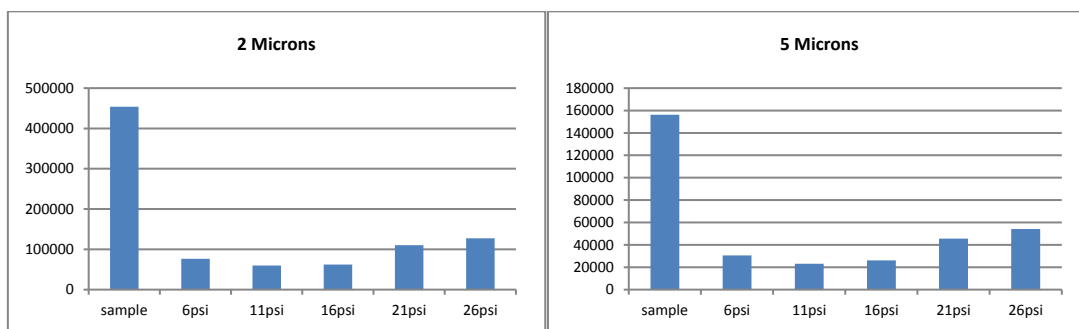
با افزایش شار عبور گازوئیل از فیلتر، فرصت کافی برای جذب آب به لایه داده نمی‌شود. به‌علاوه این امکان وجود دارد که شار عبوری بیش‌تر و فشار زیاد باعث انتقال قطرات ریز آب از میان لایه‌های نانوالیاف شود. شکل ۱۵ مقدار آب باقی‌مانده در گازوئیل را پس از عبور از فیلتر نانولیفی نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- مقدار آب باقی‌مانده در گازوئیل پس از عبور از فیلتر نانویی تحت فشارهای مختلف

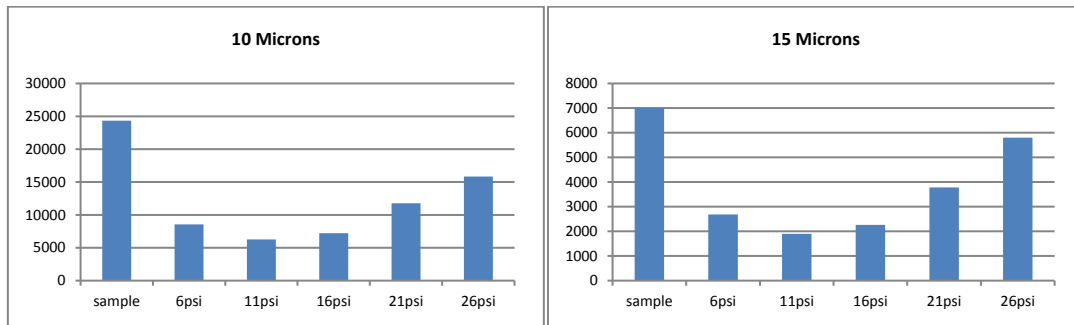
بررسی‌های انجام شده روی ذرات موجود در گازوئیل پس از عبور دادن آن از فیلتر نانویی نشان می‌دهد که در فشارهای پایین، حبس و جداسازی ذرات ۲ و ۵ میکرونی با شدت بیش‌تری صورت می‌گیرد. ذرات ریز ۲ و ۵ میکرونی به دلیل ابعاد کوچک و جرم ناچیز دارای حرکت براونی زیادی هستند و به همین دلیل هنگامی که از میان الیاف و مجاری فیلتر عبور می‌کنند با دیواره‌های آن‌ها برخورد می‌کنند. این برخورد می‌تواند به گیرافتادن ذرات ریز منجر شوند. همچنین وجود حرکت براونی احتمال ورود ذرات ریز میکرونی را از مجرای اصلی به مجاری فرعی لایه افزایش می‌دهد. با این‌وجود وقتی سیال تحت فشار با سرعت بیش‌تری از میان حفره‌های لایه عبور می‌کند، مسیر حرکت براونی نیز تا حدودی دچار تغییر شده و برآیند آن با مسیر کلی عبور سیار هم‌جهت می‌گردد و به‌این‌ترتیب از احتمال ورود ذرات به حفره‌ها و مجاری فرعی کاسته می‌شود. به‌علاوه شار زیاد سیال همچنین می‌تواند ذرات ریز میکرونی را که به دلیل ابعاد کوچک سبک‌تر هستند با خود شسته و جابه‌جا کند.

برخورد ذرات معلق تحت سرعت‌های بالا به لایه ممکن است منجر به آسیب دیدن لایه و حتی جدا شدن بخشی از آن (خصوصاً لایه‌های نانولیفی که استحکام ناچیزی دارند) شود. با این‌حال به‌نظر نمی‌رسد شدت برخورد ذرات بسیار ریز میکرونی به دلیل جرم پایین و در نتیجه شتاب کم آن‌ها باعث آسیب جدی به لایه شود؛ بلکه حتی می‌تواند عاملی مؤثر در برقراری تماسی مؤثر و گیر افتادن آن ذرات به حساب آید.



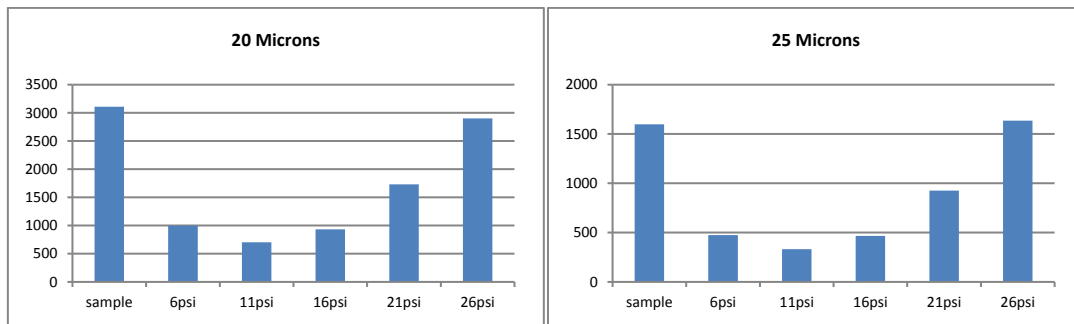
شکل ۱۶- تعداد ذرات ۲ و ۵ میکرونی در گازوئیل پس از عبور از فیلتر نانویی تحت فشارهای مختلف

با افزایش ابعاد و سنگین شدن ذرات، از حرکت براونی آن‌ها کاسته شده و دیگر اندازه آن‌ها نیز این اجازه را به این ذرات نمی‌دهد که از حفرات کوچک عبور کنند. به این ترتیب علی‌رغم اینکه اندازه ذرات هنوز از اغلب اندازه حفره‌های لایه سلولزی کوچک‌تر است، احتمال وارد شدن آن‌ها و گیرافتادن در مجاری فرعی کاهش می‌یابد. با این وجود، جرم نسبتاً کم این ذرات به آن‌ها این شانس را می‌دهد تا تحت سرعت‌های بالا و در تغییر جهت‌های احتمالی سیال در مجاری اصلی، از مسیر سیال خارج شده و با جداره‌های الیاف تماس پیدا کنند.



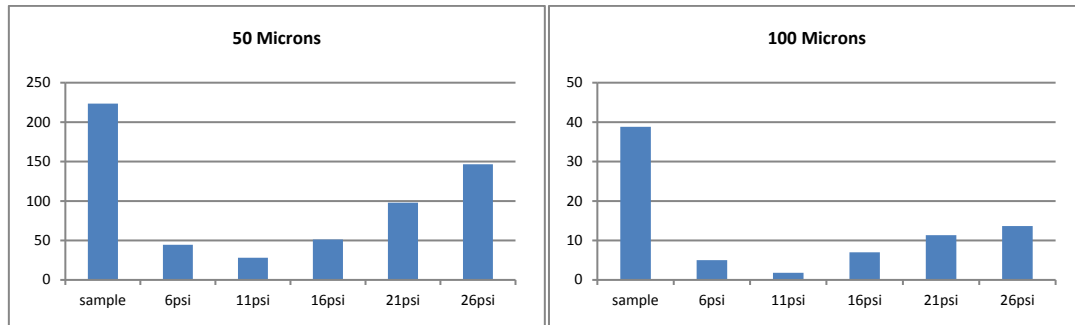
شکل ۱۷- تعداد ذرات ۱۰ و ۱۵ میکرونی در گازوئیل پس از عبور از فیلتر نانویی تحت فشارهای مختلف

البته این امکان وجود دارد که تحت شار بالا، به علت شتاب نسبتاً زیاد، ذرات میکرونی پس از برخورد به لایه نانولیفی به آن آسیب وارد کرده و حتی قسمت‌هایی از آن را که استحکام کافی ندارند با خود جدا کنند. از آنجاکه این ذرات و قسمت‌های جدا شده از لایه نانولیفی هنوز از حفرات زیرلایه سلولزی کوچک‌تر هستند، می‌توانند همراه با گازوئیل از فیلتر عبور کنند. با این وجود، هنوز هم تحت فشارهای پایین جداسازی ذرات نسبتاً کوچک به خوبی انجام می‌گیرد.



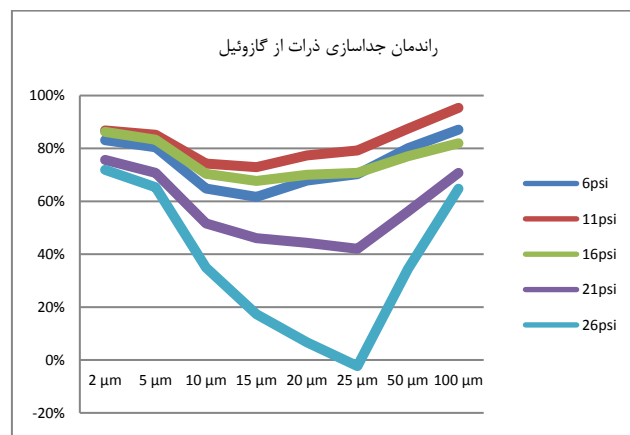
شکل ۱۸- تعداد ذرات ۲۰ و ۲۵ میکرونی در گازوئیل پس از عبور از فیلتر نانویی تحت فشارهای مختلف

همان‌طور که قبلاً گفته شد، فشارهای بالا می‌تواند ذرات کوچک‌تر جذب بر روی الیاف را با خود همراه کند و از برخورد آن‌ها با یکدیگر ذرات درشت‌تری بسازد. این می‌تواند یکی از دلایل افزایش تعداد ذرات نسبتاً کوچک ۱۵ تا ۲۵ میکرونی تحت فشار پیش‌راننده زیاد باشد.



شکل ۱۹- تعداد ذرات ۵۰ و ۱۰۰ میکرونی در گازوئیل پس از عبور از فیلتر نانویی تحت فشارهای مختلف

ذرات با قطر ۵۰ و ۱۰۰ میکرون معمولاً به علت اندازه دُرشتشان در اغلب حفرات لایه‌های سلولزی و نانولیفی به دام می‌افتند. باین وجود احتمال عبور آن‌ها از حفره‌های لایه پس از به دام افتادن در فشارهای بالا بیش‌تر است. افزون بر این بعضی از آن‌ها به علت شتاب بالایی که تحت شارهای بالا و به‌واسطه وزنشان در حین عبور از مجراهای فیلتر پیدا کرده‌اند، می‌توانند با وارد کردن ضربه از لایه‌های نازک عبور نمایند؛ اما از آنجاکه قطر آن‌ها در مقایسه با اندازه مجراهای زیرلایه سلولزی قابل چشم‌پوشی نیست، مقدار زیادی از آن‌ها توسط همین بخش از فیلتر و همچنین اثر هم‌افزایی که به‌واسطه حضور نانوالیاف و نیز کیک ناشی حبس دیگر ذرات بر روی فیلتر به وجود آمده است، به دام می‌افتند. گفتنی است فرآیند جداسازی ذرات ریز میکرونی تحت فشارهای پایین برای اکثر ذرات با موفقیت انجام می‌شود. البته فشارهای خیلی پایین این شانس را به ذرات کوچک و نسبتاً کوچک می‌دهد که چنانچه در مسیر عبور از پیچ‌وخم‌ها، جریان آرام باشد، ذرات هم تحت جریان سیال، مسیر عبوری خود را پیدا کرده و از فیلتر رد شوند. به‌این ترتیب در شارهای عبوری خیلی کم، در صورتی که به دام افتادن ذرات صرفاً فیزیکی باشد، احتمال حضور ذرات ریز میکرونی پس از فیلتر بیش‌تر خواهد شد. شکل ۲۰ راندمان جداسازی ذرات مختلف را در فشارهای متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۲۰- راندمان جداسازی ذرات با اندازه‌های مختلف در فشارهای مختلف

با توجه به مطالب گفته شده در این بخش، تعداد ذرات ریز میکرونی عبور کرده از فیلتر تابعی از سرعت سیال، ابعاد ذرات، احتمال برخورد ذره با لایه و اندازه حفرات لایه خواهد بود که احتمال برخورد ذرات با لایه به سرعت سیال و اندازه ذرات وابسته است. با ارزیابی نتایج به‌دست آمده، فشار ۱۱ psi به‌عنوان فشار بهینه برای جداسازی ذرات انتخاب گردید.

نتیجه گیری

در پایان مباحث مطرح شده در این پروژه، نتایج این پژوهش به شرح زیر جمع بندی می گردد:

- در این تحقیق به منظور تولید لایه نانولیفی از مخلوط پلیمری PAN/PEG استفاده و برای رسیدن به قطر بهینه از طراحی آزمایش RSM کمک گرفته شد. این تکنیک ضمن تعیین شرایط آزمایشها، مقدار بهینه قطر را تخمین می زند. نتایج آزمایشها نشان می دهد که الکتروریسی محلول پلیمری PAN/PEG با غلظت ۹٪ و ترکیب درصد ۷۰/۳۰ تحت ولتاژ ۱۷/۵ کیلوولت و فاصله الکتروریسی ۱۳/۱۵ سانتی متر به تولید نانوالیافی با قطر متوسط ۱۲۲/۵ نانومتر انجامید که با مقدار پیش بینی شده به روش RSM (۱۲۱/۵۸ نانومتر) تطابق خوبی داشته است. افزایش در مقدار جزء PEG در مخلوط پلیمری به عدم انحلال پلیمرها در حلال و بی ثبات شدن شرایط الکتروریسی منجر گردید. لذا مقادیر بیش تر PEG در مخلوط پلیمری PAN/PEG پیشنهاد نمی شود.
- با توجه به نتایج به دست آمده، از آنجاکه گرم کردن گازوئیل به کاهش جذب آب توسط فیلتر منجر می شود ولی راندمان حذف ذرات ریز میکرونی را بالا می برد. با توجه به شرایط اقلیمی کشورمان و نیز این که گرم کردن سوخت خصوصاً در خودروها مستلزم صرف انرژی است، دمای ۴۰ درجه سانتی گراد به عنوان شرایط بهینه برای انجام آزمایشها انتخاب گردید.
- افزایش مدت زمان الکتروریسی منجر به افزایش راندمان جداسازی ذرات ریز میکرونی - خصوصاً ذرات در محدوده ۱۰ تا ۲۵ میکرون - می شود؛ ولی از شار عبوری از فیلتر می کاهد. لذا لازم است با در نظر گرفتن هر دو عامل فوق به انتخاب مدت زمان مناسب برای تولید لایه نانولیفی پرداخته شود. با توجه کارایی فیلترها در جداسازی آب و ذرات ریز میکرونی و دقت در شار عبوری از آنها، لایه ای که از الکتروریسی به مدت ۵ ساعت تهیه شده بود به عنوان لایه بهینه انتخاب گردید.
- نتایج آزمایشهای انجام شده در خصوص تأثیر فشار بر رفتار جداسازی آب و ذرات ریز میکرونی نشان می دهد که فشارهای زیاد - که منجر به عبور گازوئیل تحت شار زیاد از فیلتر می شود - کارایی فیلترها را کاهش می دهد. همچنین فشارهای بسیار کم نیز اثر معکوسی در جداسازی ذرات ریز میکرونی دارد. در این تحقیق، فشار ۱۱ psi برای فیلتراسیون گازوئیل مناسب ترین فشار بود.

منابع

- [1] Sutherland K.; *Filters and Filtration Handbook*, 5th Edition, Elsevier Ltd, 2008.
- [2] M.K. Khair; "Progress in Diesel Engine Emission Control", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 114, pp. 568-577, 1992.
- [3] مجید آل آقا، احمد موسوی شوشتری، «تولید نانولایه های هیبریدی با قابلیت جداسازی ذرات آب از نفت»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۰.
- [4] C. Shin, G. G. Chase; "Water-in-Oil Coalescence in Micro-Nanofiber Composite Filters", *AIChE Journal*, Vol.50, No.2, pp. 343-350, 2004.
- [5] Basu, S.; "A Study on Effect of Wetting on Mechanism of Coalescence in a Model Coalescer", *J. Colloid Inter. Sci.*, Vol.159, pp. 68, 1993.
- [6] Moses, S. F., and K. M. Ng; "A Visual Study of the Breakdown of Emulsions in Porous Coalescers", *Chem. Eng. Sci.*, Vol.40, No.12, pp. 2339, 1985.
- [7] Hazlett, R. N.; "Fibrous Bed Coalescence of Water: Steps in the Coalescence Process", *I & EC Fundamentals*, Vol.8, No.4, pp. 625, 1969.

-
- [8] Voyutskii, S. S., K. A. Akl'yanova, R. Panich, and N. Fodiman; "Mechanism of Separation of the Disperse Phase of Emulsions during Filtration", SSSR, Vol.11, pp.1155, 1953.
- [9] Nasouri K., Shoushtari A.M.; "Modeling and optimization of electrospun PAN nanofiber diameter using response surface methodology and Artificial Neural Networks", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 126, pp.127-135, 2012.
- [10] D.C. Montgomery; Design of Experiments, John Wiley and Sons, New York, USA, 2001.