DOI: 10.30511/jmms.2026.2092456.1059 - ISSN: 3060-8384 - Vol 2(3), 2026

MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: http://jmss.qut.ac.ir/

QOM UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Localization, Experimental Performance Evaluation, and Techno-Economic Analysis of Coalescing Filters for Oil Aerosol Separation in Lubrication Systems

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Rahimi, Alireza*

General Engineering and Technical Services Department, Bushehr Petrochemical Company, Asaluyeh, Iran,
al.rahimi@bupc.ir

**** Correspondence***
General Engineering and Technical Services Department, Bushehr Petrochemical Company, Asaluyeh, Iran,
al.rahimi@bupc.ir

Article History
Received: June 24, 2026
Accepted: August 18, 2026
ePublished: October 10, 2026

ABSTRACT

Oil mist emissions from turbomachinery lubrication reservoirs cause lubricant loss, environmental contamination, varnish deposition, and operational safety concerns. This study investigates the localization and experimental performance of an oil mist coalescing cartridge filter through reverse engineering and techno-economic assessment. A localized prototype was designed using pleated glass microfiber media with an effective filtration area of 2.55m², following structural and material characterization of an imported reference filter. Tests were conducted according to ISO 12500-1 and ISO 12500-3 at 20°C, relative humidity below 50%, and operating pressure of 7 bar(g), using a laser particle counter. Based on three independent trials, the localized filter achieved a separation efficiency of 99.95% for 1 µm oil aerosols, clean-filter pressure drops of 0.01 MPa (100 mbar) and collapse pressure exceeding 10 bar(g). The prototype exhibited performance equivalent to the imported filter while reducing procurement costs by approximately 35%. Long-term saturation and drainage behavior were not investigated and should be addressed in future studies.

Keywords: Coalescing filter, Oil mist, Lubrication systems, Reverse engineering.

بومی‌سازی، ارزیابی تجربی عملکرد و تحلیل فنی-اقتصادی فیلترهای کوآلیسرِ جداساز آئروسل‌های روغنی در سیستم‌های روانکاری

علیرضا رحیمی*

اداره مهندسی عمومی و خدمات فنی، شرکت پتروشیمی بوشهر، عسلویه، ایران

چکیده

در سامانه‌های روانکاری توربوماشین‌های صنعتی، انتشار مه روغن از مخازن روانکار علاوه بر اتلاف سیال و آلودگی زیست‌محیطی، موجب تشکیل رسوبات وارنیش و کاهش ایمنی فرایندی می‌گردد. در این پژوهش، بومی‌سازی و ارزیابی تجربی عملکرد فیلتر کارتریجی کوآلیسر با رویکرد مهندسی معکوس و ارزیابی فنی-اقتصادی به انجام رسید. ابتدا مشخصات هندسی و متالورژیکی نمونه مرجع خارجی تحلیل و المان بومی با بهره‌گیری از مدیای میکروفایبر شیشه‌ای و ساختار چین‌خورده با سطح مؤثر ۲٫۵۵ مترمربع طراحی و ساخته شد. ارزیابی‌های تجربی بر مبنای الزامات استانداردهای ISO 12500-1 و ISO 12500-3 در شرایط مرجع کنترل‌شده (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی کمتر از ۵۰ درصد و فشار عملیای ۷ بار گیج) با استفاده از شمارنده ذرات لیزری (Met One HHPC 6) انجام پذیرفت. جهت تضمین تکرارپذیری، کلیه آزمون‌ها در سه تکرار مستقل اجرا شده و داده‌ها به‌صورت انحراف معیار ± میانگین گزارش شدند. نتایج نشان داد که فیلتر بومی به راندمان جداسازی متوسط ۹۹٫۹۵ درصد برای آئروسل‌های روغنی با اندازه اسمی ۱ میکرومتر، افت فشار پایه افت فشار پایه ۰٫۰۱ مگاپاسکال (معادل ۱۰۰ میلی‌بار) و مقاومت به فشار فروپاشی بیش از ۱۰ بار گیج دست یافته است که انطباق کاملی با نمونه وارداتی دارد. همچنین تحلیل اقتصادی مؤید کاهش ۳۵ درصدی در هزینه‌های تأمین این قطعه مصرفی است. در نهایت، تمرکز بر فاز اولیه عملکرد و عدم ثبت پیوسته رفتار اشباع بلندمدت به عنوان محدودیت مطالعه تبیین شده و جهت‌گیری‌های پژوهش آتی پیشنهاد گردید.

کلید واژه‌ها

فیلتر کوآلیسر، مه روغن، سیستم‌های روانکاری، مهندسی معکوس.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

* نویسنده مسئول: al.rahimi@bupc.ir

۱ مقدمه

در تجهیزات دوار صنعتی نظیر توربین‌های بخار و گاز، توربوکمپرسورها، گیربکس‌ها و پمپ‌ها، سیستم‌های روانکاری نقش اساسی در کاهش اصطکاک، انتقال حرارت و افزایش طول عمر تجهیزات ایفا می‌کنند. در این سیستم‌ها، روغن روانکار در حین گردش در مدار و تماس با اجزای متحرک تحت شرایط دمایی و دینامیکی مختلف قرار می‌گیرد و بخشی از آن به‌صورت آئروسل و بخارات روغن در فضای مخزن منتشر می‌شود. در صورت عدم کنترل مناسب، این ذرات از طریق سیستم تهویه مخازن به محیط پیرامون منتقل شده و علاوه بر ایجاد آلودگی زیست‌محیطی، موجب اتلاف تدریجی روانکار و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شوند. از سوی دیگر، تجمع این ذرات بر روی سطوح تجهیزات اطراف می‌تواند منجر به تشکیل رسوبات روغنی موسوم به وارنیش (Varnish) شود که علاوه بر آلودگی محیط کار، موجب اختلال در عملکرد تجهیزات کنترلی و ابزار دقیق و در برخی موارد ایجاد مخاطرات ایمنی می‌گردد.

به‌منظور کنترل انتشار مه روغن، استفاده از فیلترهای حذف مه روغن (Oil Mist Filters) یا فیلترهای کوآلیسر (Coalescing) در مسیر تهویه مخازن روانکاری به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملکرد این فیلترها مبتنی بر عبور جریان گاز حاوی ذرات روغن از میان مدیای الیافی متخلخل است؛ به‌گونه‌ای که قطرات ریز پس از برخورد با الیاف به دام افتاده و از طریق فرآیند هم‌جوشی (Coalescing) با یکدیگر ادغام می‌شوند. در ادامه، قطرات بزرگ‌تر تشکیل‌شده تحت اثر نیروی گرانش یا نیروی جریان به سمت پایین حرکت کرده و از مدیا تخلیه می‌شوند. در این فرآیند، مکانیزم‌های اصلی جمع‌آوری شامل نفوذ براونی، رهگیری مستقیم و برخورد اینرسی است که هر یک در بازه‌های مختلف اندازه ذرات و سرعت جریان نقش غالب دارند. مدیای این فیلترها معمولاً از الیاف شیشه‌ای میکروفایبر یا الیاف سنتتیک با تخلخل بالا ساخته می‌شود تا ضمن فراهم کردن سطح تماس مناسب برای به دام انداختن ذرات، افت فشار قابل قبولی نیز در مسیر جریان ایجاد شود.

از دیدگاه علمی، آئروسل‌ها به ذرات مایع یا جامد معلق در محیط گازی با محدوده اندازه‌ای تقریباً ۰٫۰۱ تا ۱۰۰ میکرومتر اطلاق می‌شوند که رفتار آن‌ها تحت تأثیر دینامیک سیالات و مکانیزم‌های انتقال جرم قرار دارد [۱،۲]. در سیستم‌های روانکاری صنعتی و توربین‌ها، مه روغن عمدتاً در اثر تلاطم شدید سیال، برخورد قطعات متحرک و تبخیر جزئی روانکار تولید می‌شود [۳]. انتشار این ذرات علاوه بر اتلاف روانکار، می‌تواند منجر به آلودگی محیط زیست و تشکیل رسوبات روغنی بر روی تجهیزات شود [۴، ۵]. از این‌رو کنترل و بازیابی این ذرات از جریان گاز از اهمیت ویژه‌ای در صنایع فرایندی برخوردار است.

مطالعات متعددی به بررسی عملکرد فیلترهای فیبری و مکانیزم‌های جداسازی ذرات پرداخته‌اند. در فیلترهای کوآلیسر، قطرات ریز پس از برخورد با الیاف به‌تدریج با یکدیگر ادغام شده و قطرات بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند که امکان تخلیه آن‌ها از ساختار مدیا فراهم می‌شود [۶]. راندمان این فرآیند تابعی از ترکیب مکانیزم‌های نفوذ براونی، رهگیری مستقیم و برخورد اینرسی است [۷، ۸]. مطالعات کلاسیک نشان داد که راندمان کلی فیلترهای فیبری از برهم‌کنش این مکانیزم‌ها در شرایط مختلف جریان حاصل می‌شود [۹]. همچنین تحقیقات نشان داده است که پارامترهایی نظیر قطر الیاف، تخلخل مدیا و ضخامت لایه فیلتر نقش تعیین‌کننده‌ای در افت فشار اولیه و عملکرد فیلتراسیون دارند [۱۰، ۱۱].

در سال‌های اخیر، استفاده از مدیاهای مبتنی بر میکروفایبر شیشه‌ای به دلیل سطح ویژه بالا و توانایی جذب ذرات زیرمیکرون در فیلترهای مه روغن بسیار رایج شده است [۱۲]. با این حال، تجمع تدریجی روغن در ساختار متخلخل فیلتر باعث تغییر رفتار هیدرودینامیکی مدیا و افزایش افت فشار می‌شود. این پدیده در مطالعات پایت و همکاران مورد بررسی قرار گرفته و اثر بارگذاری روغن بر عملکرد فیلتر تحلیل شده است [۱۳]. در ادامه، پژوهش‌های ژانگ و کامپا با ارائه مدل موسوم به جامپ اند چنل (Jump-and-Channel)، تشکیل کانال‌های عبور روغن در مدیای اشباع و تأثیر آن بر مقاومت جریان و تخلیه مایع را تحلیل کردند [۱۴، ۱۵].

در سال‌های اخیر، تحقیقات بر بهبود ساختار سطحی مدیا و کاهش افت فشار در شرایط مرطوب متمرکز شده است. ژا و همکاران نشان دادند که استفاده از فیلترهای با ساختار جانوس (Janus) و اصلاح سطح الیاف می‌تواند افت فشار مرطوب را تا حدود ۵۰ درصد نسبت به فیلترهای متداول کاهش دهد [۱۶]. همچنین مطالعات جدید با استفاده از مدل‌سازی پیشرفته و روش‌های یادگیری ماشین، رفتار جریان‌های چندفازی در فیلترهای کوآلیسر را بررسی کرده و امکان پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد فیلتر در شرایط اشباع را فراهم کرده است [۱۷]. پژوهشگران همچنین نشان دادند که اعمال ارتعاشات کنترل‌شده می‌تواند به تخلیه مؤثرتر قطرات روغن از مدیا کمک کرده و از افزایش سریع افت فشار جلوگیری کند [۱۸]. علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اصلاح ترشوندگی سطح الیاف و کنترل زاویه تماس قطرات با فیبر می‌تواند نقش مهمی در بهبود

راندمان جداسازی و افزایش فاکتور کیفیت فیلتر داشته باشد [۱۹، ۲۰].

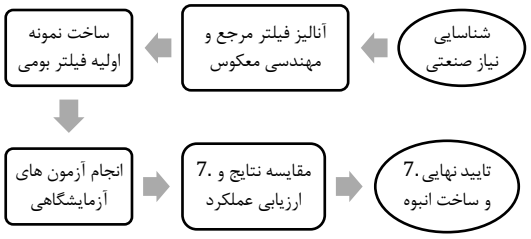
خلاصه‌ای از مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در زمینه فیلتراسیون مه روغن و فیلترهای کوآلیسر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ خلاصه مطالعات پیشین

مرجع	*خلاصه نتیجه پژوهش*
[۲-۱]	معرفی اصول رفتار، توزیع اندازه و روش‌های اندازه‌گیری ذرات آئروسل در محیط‌های گازی.
[۵-۳]	بررسی تشکیل مه روغن در سیستم‌های صنعتی و اهمیت کنترل انتشار آن برای کاهش آلودگی.
[۷-۶]	تشریح مکانیزم عملکرد فیلترهای کوآلیسر و مکانیزم‌های اصلی جمع‌آوری ذرات در مدیای الیافی.
[۹-۸]	توسعه مدل‌های تئوریک برای پیش‌بینی راندمان فیلتراسیون و افت فشار در فیلترهای فیبری.
[۱۱-۱۰]	بررسی اثر ساختار مدیا و بارگذاری ذرات بر عملکرد و افزایش مقاومت جریان در فیلترها.
[۱۳-۱۲]	مطالعه رفتار تجمع مه روغن در مدیا و تأثیر بارگذاری روغن بر افزایش افت فشار.
[۱۵-۱۴]	تحلیل عملکرد فیلترهای کوآلیسر و ارائه مدل جامپ اند چنل در فیلترهای روغنی.
[۱۶]	استفاده از فیلترهای جانوس با اصلاح سطح برای کاهش قابل توجه افت فشار مرطوب.
[۱۸-۱۷]	استفاده از مدل‌سازی عددی، یادگیری ماشین و روش‌های کمکی مانند ارتعاش برای بهبود تخلیه قطرات.
[۲۰-۱۹]	اصلاح ترشوندگی و سطح الیاف برای افزایش راندمان جداسازی و بهبود فاکتور کیفیت فیلتر.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مدل‌سازی رفتار آئروسل‌ها، طراحی مدیاهای فیبری و بهینه‌سازی ساختار فیلترهای کوآلیسر، بخش عمده مطالعات موجود بر تحلیل‌های آزمایشگاهی یا مدل‌سازی تئوریک متمرکز بوده‌اند. در مقابل، تحقیقات محدودی به بررسی فرآیند مهندسی معکوس و بومی‌سازی صنعتی فیلترهای مه روغن و ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط عملیاتی واقعی پرداخته‌اند. این موضوع به‌ویژه در صنایعی که وابستگی بالایی به تأمین‌کنندگان خارجی قطعات مصرفی دارند اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند، زیرا توسعه دانش فنی ساخت داخل می‌تواند نقش مهمی در افزایش پایداری تولید و کاهش هزینه‌های نگهداری ایفا کند.

در این پژوهش، فرآیند بومی‌سازی فیلتر حذف مه روغن مورد استفاده در صنعت پتروشیمی که از نوع کوآلیسر و ساخت شرکت وایکینگ (Viking) است مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا ساختار فیزیکی و مشخصات فنی فیلتر اصلی از طریق بررسی‌های تجربی و دمونتاژ نمونه استخراج شد. سپس با بهره‌گیری از اصول طراحی فیلترهای کوآلیسر، نمونه بومی فیلتر طراحی و ساخته شد. در ادامه، مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی به‌منظور ارزیابی عملکرد فیلتراسیون، افت فشار و کارایی جداسازی انجام شد و نتایج آن با نمونه اصلی مقایسه گردید. در نهایت، عملکرد نمونه بومی در شرایط عملیاتی واقعی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت تا امکان استفاده صنعتی آن بررسی شود. روند گام‌به‌گام انجام این پژوهش شامل تحلیل ساختاری، مهندسی معکوس، ساخت نمونه اولیه، انجام آزمون تجربی و ارزیابی فنی-اقتصادی بصورت روندنما در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ روندنمای مراحل بومی‌سازی فیلتر مه روغن

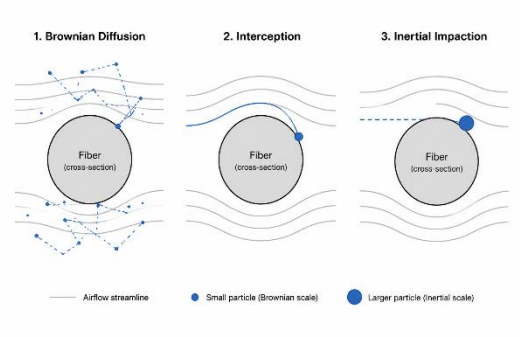
۲ تئوری فیلتراسیون در کوآلیسرها

فیلتراسیون آئروسل در مدیاهای الیافی بر اساس انتقال ذرات و قطرات معلق از جریان گاز به سطح الیاف و تجمع آن‌ها در ساختار متخلخل فیلتر انجام می‌شود. عملکرد این نوع فیلترها معمولاً با تحلیل مکانیزم‌های جداسازی، راندمان فیلتراسیون و افت فشار توصیف می‌شود [۱].

۲-۱ مکانیزم‌های جداسازی ذرات

در فیلترهای الیافی، جداسازی ذرات آئروسل عمدتاً از طریق سه مکانیزم اصلی انجام می‌شود: نفوذ براونی، رهگیری مستقیم و برخورد اینرسی [۱، ۷].

ذرات بسیار ریز تحت تأثیر حرکت تصادفی ناشی از نفوذ براونی از خطوط جریان منحرف شده و با الیاف برخورد می‌کنند. برای ذرات با اندازه متوسط، رهگیری مستقیم زمانی رخ می‌دهد که ذره در حین حرکت در امتداد خطوط جریان با سطح الیاف تماس پیدا کند. در مورد ذرات بزرگ‌تر، اینرسی ذره باعث می‌شود که نتواند مسیر جریان اطراف الیاف را دنبال کند و در نتیجه با الیاف برخورد نماید [۷، ۹]. این سه مکانیزم اصلی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ سه حالت جداسازی ذرات آئروسل در فیلترهای الیافی

در مدل‌های تئوری فیلتراسیون، عملکرد مدیا معمولاً بر اساس راندمان تک‌الیاف بیان می‌شود:

$$\eta_f = \eta_D + \eta_R + \eta_I \qquad (۱)$$

که در آن η_D، η_R و η_I به ترتیب راندمان ناشی از نفوذ براونی، رهگیری و برخورد اینرسی هستند [9].

اهمیت نسبی این مکانیزم‌ها با استفاده از پارامترهای بدون بعد توصیف می‌شود، عدد پکلت نسبت انتقال همرفتی به انتقال نفوذی را نشان می‌دهد:

$$Pe = (u\, d_f) / D \qquad (۲)$$

که در آن u سرعت جریان، d_f قطر الیاف وD ضریب نفوذ ذره است [۱]. برای ذرات بزرگ‌تر، رفتار ذره توسط عدد استوکس توصیف می‌شود:

$$Stk = (\rho_p\, d_p^2\, u) / (18\, \mu\, d_f) \qquad (۳)$$

که در آن ρ_p چگالی و d_p قطر ذره است. افزایش عدد استوکس احتمال برخورد اینرسی ذرات با الیاف را افزایش می‌دهد [7].

در فیلترهای کوآلیسر، قطرات ریز روغن پس از رسوب بر سطح الیاف با یکدیگر ترکیب شده و قطرات بزرگ‌تری تشکیل می‌دهند که تحت اثر نیروهای گرانشی یا نیروی برشی جریان از مدیا جدا می‌شوند [8].

۲-۲ راندمان فیلتراسیون و افت فشار

راندمان فیلتراسیون به صورت نسبت کاهش غلظت ذرات در جریان خروجی نسبت به جریان ورودی تعریف می‌شود:

$$\eta = 1 - (C_out / C_in) \qquad (۴)$$

که در آن C_in و C_out به ترتیب غلظت ذرات در ورودی و خروجی فیلتر هستند [۱].

در مدیاهای فیبری، راندمان کلی فیلتر به ساختار مدیا و راندمان تک‌الیاف وابسته است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta_total = 1 - exp(-(4\, \alpha\, \eta_f L)/(\pi\, d_f)) \qquad (۵)$$

که در آن α کسر حجمی الیاف، L ضخامت مدیا و d_f قطر الیاف است [۷].

علاوه بر راندمان، افت فشار یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد فیلتر محسوب می‌شود. در بسیاری از مدل‌ها، مدیای فیبری به صورت یک محیط متخلخل در نظر گرفته شده و افت فشار آن به صورت زیربیان می‌شود:

$$\Delta P = (\mu\, L\, u) / K \qquad (۶)$$

که در آن μ ویسکوزیته سیال، L ضخامت مدیا، u سرعت سطحی جریان و K تراوایی مدیا است [۷]. در شرایط عملیاتی، تجمع

قطرات روغن در ساختار مدیا می‌تواند مسیرهای جریان را تغییر داده و باعث افزایش افت فشار شود. بنابراین طراحی مدیای فیلتراسیون باید به گونه‌ای باشد که ضمن حفظ راندمان جداسازی بالا، امکان تخلیه مؤثر قطرات روغن از مدیا فراهم گردد [۸].

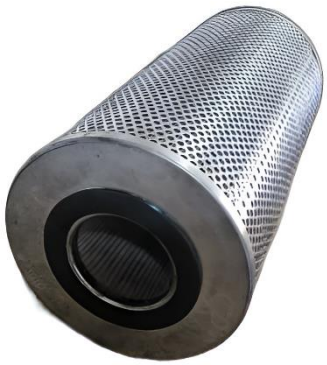
علاوه بر مدل‌سازی تئوریک مکانیزم‌های جداسازی آئروسل در مدیاهای فیبری، ارزیابی عملکرد واقعی فیلترها معمولاً از طریق روش‌های آزمایشگاهی مبتنی بر اندازه‌گیری غلظت ذرات انجام می‌شود. در این روش‌ها، غلظت ذرات معلق در جریان سیال در دو نقطه بالادست و پایین‌دست فیلتر اندازه‌گیری شده و بر اساس اختلاف این مقادیر، راندمان حذف ذرات تعیین می‌شود. برای این منظور از تجهیزاتی نظیر شمارنده لیزری ذرات (Laser Particle Counter) استفاده می‌شود که امکان اندازه‌گیری توزیع اندازه و تعداد ذرات را در محدوده‌های مختلف فراهم می‌کنند. در این زمینه، استانداردهای بین‌المللی نظیر ISO 12500 چارچوبی برای ارزیابی عملکرد فیلترهای هوای فشرده ارائه می‌دهند و اصول اندازه‌گیری، ابزارهای مناسب و شرایط مرجع آزمون را تعریف می‌کنند. استفاده از چنین روش‌هایی امکان مقایسه کمی عملکرد فیلترهای مختلف را تحت شرایط کنترل‌شده فراهم کرده و در مطالعات پژوهشی و آزمون‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳ مواد و روش‌ها

۳-۱ فیلتر مرجع و مشخصات آن

در این پژوهش، فیلتر حذف مه روغن مورد استفاده در خط تهویه مخزن روغن سیستم روانکاری توربین به‌عنوان نمونه مرجع برای بومی‌سازی انتخاب شد. این فیلتر از نوع کارتریجی کوآلیسر بوده و با جداسازی آئروسل‌های روغنی از جریان گاز خروجی، از انتشار مه روغن به محیط جلوگیری می‌کند. نمونه مرجع بررسی‌شده، فیلتر مدل VKOMF22 ساخت شرکت وایکینگ است که در سامانه‌های روانکاری صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از نظر ساختاری، فیلتر مرجع دارای یک المان استوانه‌ای چین‌خورده است که در آن لایه اصلی فیلتراسیون به‌وسیله لایه‌های محافظ داخلی و خارجی و صفحات انتهایی نگهداری می‌شود. مدیای اصلی این فیلتر از جنس میکروفایبر شیشه است که به دلیل قطر کم الیاف، راندمان جمع‌آوری بالا و تراوایی مناسب، به‌طور گسترده در فیلترهای مه روغن به‌کار می‌رود. بر اساس اطلاعات فنی موجود، این فیلتر دارای درجه فیلتراسیون ۱ میکرون، دبی کاری ۱۰۵ لیتر بر دقیقه، افت فشار اسمی حدود ۰٫۰۱ مگا پاسکال و راندمان اسمی ۹۹٫۹۵ درصد است. همچنین سطح مؤثر فیلتراسیون آن حدود ۲٫۵ متر مربع گزارش شده است. مشخصات کامل این فیلتر در بخش نتایج و در قالب مقایسه با نمونه بومی ارائه شده است. تصویر فیلتر مرجع در شکل ۳ ارائه شده است.



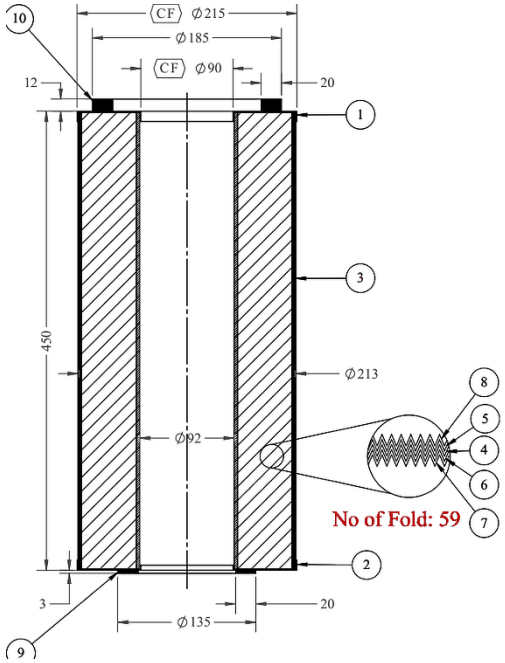
شکل ۳ فیلتر مرجع، مدل VKOMF22 ساخت شرکت وایکینگ

۳-۲ فرآیند مهندسی معکوس

به منظور توسعه نمونه بومی، فیلتر مرجع ابتدا تحت فرآیند مهندسی معکوس قرار گرفت. در این مرحله، فیلتر از نظر هندسه کلی، اجزای تشکیل‌دهنده، آرایش ساختاری و پیکربندی مدیای فیلتراسیون بررسی شد. اجزای اصلی شامل بدنه استوانه‌ای، مدیای چین‌خورده، نگهدارنده داخلی و خارجی، صفحات انتهایی و لایه‌های محافظ شناسایی و تحلیل شدند.

پارامترهای اصلی استخراج‌شده از نمونه مرجع شامل قطر خارجی، قطر داخلی، ارتفاع المان، آرایش چین‌ها و سطح مؤثر فیلتراسیون بود. در این میان، ساختار چین‌خورده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود، زیرا این پارامتر به‌طور مستقیم بر سطح فیلتراسیون، توزیع جریان و ویژگی‌های افت فشار اثر می‌گذارد. افزون بر اندازه‌گیری‌های ابعادی، ترکیب مواد و نحوه آرایش لایه‌های مدیا و اجزای نگهدارنده نیز برای بازطراحی مورد ارزیابی قرار گرفت.

بر پایه این مشاهدات، مدل بازطراحی‌شده فیلتر با هدف حفظ ویژگی‌های ساختاری و عملکردی نمونه اصلی و در عین حال امکان‌پذیر شدن ساخت داخل تهیه شد. مدل مونتاژی نهایی شامل ۱۰ جزء کلیدی (شامل درپوش‌ها، هسته خارجی، مدیای اصلی، نگهدارنده‌ها، محافظ‌های داخلی/خارجی و واشرهای آب‌بندی) با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک (SolidWorks) توسعه یافت که نمای مقطعی و جزئیات آن در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴ نمای مقطعی کارتریج فیلتر در نرم‌افزار سالیدورک. قطعات: ۱ و ۲- درپوش بالا و پایین، ۳- هسته خارجی، ۴- مدیای اصلی، ۵ و ۶- نگهدارنده مدیا، ۷- محافظ داخلی فیلتر، ۸- محافظ خارجی فیلتر، ۹ و ۱۰- واشرهای آب‌بندی.

۳-۳ طراحی و ساخت فیلتر بومی

پس از تکمیل فرآیند مهندسی معکوس، فیلتر بومی طراحی و ساخته شد. در طراحی این فیلتر، پیکربندی کارتریجی چین‌خورده نمونه مرجع حفظ شد تا سطح مؤثر فیلتراسیون در حجمی فشرده تأمین گردد. مدیای اصلی فیلتراسیون از جنس میکروفایبر شیشه انتخاب شد؛ چرا که این ماده برای کاربردهای کوآلیسر بسیار مطلوب بوده و توانایی بالایی در حذف قطرات ریز روغن با حداقل افت فشار دارد. به‌منظور تأمین استحکام مکانیکی، مدیای فیلتراسیون در سمت داخلی توسط توری پلاستیکی و در سمت خارجی توسط توری سیمی استنلس استیل پشتیبانی شده و یک محافظ بیرونی از جنس ورق پانچ کربن استیل با پوشش گالوانیزه (*Punch Plate GCS*) است که برای حفاظت مکانیکی المان تعبیه گردید.

در طراحی نمونه بومی، تمرکز اصلی بر حفظ ابعاد هندسی و نوع متریال نمونه مرجع جهت اطمینان از قابلیت جایگزینی مستقیم بود. بر این اساس، قطر خارجی (۲۱۵ میلی‌متر)، قطر داخلی (۹۰ میلی‌متر) و ارتفاع (۴۵۰ میلی‌متر) دقیقاً مطابق با فیلتر مرجع *خارجی* در نظر گرفته شد. اجزای انتهایی نیز به‌گونه‌ای طراحی شدند که ضمن سازگاری کامل با محفظه موجود در سامانه روانکاری، از آب‌بندی بهینه اطمینان حاصل شود. تصویر فیلتر ساخته‌شده در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵ فیلتر بومی‌سازی شده

۳-۴ مشخصات فنی فیلتر بومی

فیلتر بومی‌سازی‌شده با حفظ ابعاد اصلی نمونه مرجع طراحی و ساخته شد تا امکان استفاده مستقیم آن در سیستم موجود فراهم شود. المان ساخته‌شده دارای قطر خارجی (۲۱۵ میلی‌متر)، قطر داخلی (۹۰ میلی‌متر) و ارتفاع (۴۵۰ میلی‌متر) است. به دلیل استفاده از ساختار چین‌خورده در مدیای فیلتراسیون، سطح مؤثر فیلتراسیون این فیلتر حدود ۲٫۵۵ متر مربع برآورد شد که اندکی بیشتر از نمونه مرجع است.

مدیای اصلی فیلتر از جنس میکروفایبر شیشه انتخاب شد و فیلتر برای سیال مه روغن در پیکربندی کوآلیسر طراحی گردید. درجه فیلتراسیون آن ۱ میکرون بوده و دبی کاری ۱۰۵ لیتر بر دقیقه و افت فشار اسمی آن ۰٫۰۱ مگا پاسکال گزارش شده است. همچنین حداکثر فشار کاری و فشار تخریب به‌ترتیب ۳ و ۱۰ بارگیج در نظر گرفته شد. دمای طراحی فیلتر ۱۰۰ درجه سانتی گراد و حداکثر دمای کاری آن ۸۰ درجه سانتی گراد تعیین گردید و جهت جریان سیال در این فیلتر به‌صورت داخل به بیرون است. بر اساس داده‌های عملکردی موجود، راندمان فیلتراسیون این فیلتر برابر با ۹۹٫۹۵ درصد گزارش شده است. جزئیات مقایسه فنی و عملکردی این فیلتر با نمونه مرجع در بخش نتایج ارائه شده است.

۳-۵ ارزیابی عملکرد و شرایط آزمون

ارزیابی تجربی عملکرد فیلتر کوآلیسر بومی‌سازی شده بر اساس دو شاخص کلیدی «راندمان جداسازی آئروسل‌های روغنی» و «افت فشار تفاضلی» انجام شد. استاندارد ISO 12500-1 به عنوان مرجع اصلی برای تعیین راندمان عملکردی فیلترهای کوآلیسرِ جداسازِ آئروسل ملاک قرار گرفت. همچنین، برای متدولوژی دقیق شمارش ذرات و دسته‌بندی ابعادی آن‌ها، از الزامات فنی استاندارد ISO 12500-3 به عنوان مرجع تکمیلی استفاده شد. فیلتر طراحی‌شده دارای استحکام مکانیکی و فشار فروپاشی (Collapse Pressure) بیش از ۱۰ بارگیج بوده و آزمون‌ها منطبق بر فشار نامی استاندارد انجام پذیرفت.

جهت پایش غلظت ذرات در جریان بالادست (Upstream) و پایین‌دست (Downstream)، از دستگاه شمارنده ذرات لیزری مدل Met One HHPC 6 استفاده گردید. این تجهیز دارای دبی مکش نمونه‌برداری ۲٫۸۳ لیتر بر دقیقه بوده و فرآیند شمارش ذرات را مطابق با الزامات استاندارد ISO 21501-4 انجام می‌دهد.

بر اساس ISO 12500-1، شرایط مرجع برای آزمون‌های عملکردی شامل دمای محیطی ۲۰ درجه سانتی‌گراد، فشار مرجع استاندارد ۷ بار گیج و رطوبت نسبی کنترل‌شده است. راندمان حذف ذرات (E) به صورت درصدی و با استفاده از رابطه (۷) محاسبه گردید:

$$E = (1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}) \, x \, 100 \qquad (۷)$$

که در آن C_{in} و C_{out} به ترتیب نشان‌دهنده میانگین غلظت شمارشی ذرات در مقاطع ورودی و خروجی فیلتر هستند. برای تضمین دقت و تکرارپذیری فرآیند اندازه‌گیری، کلیه تست‌ها در ۳ تکرار مستقل انجام شد و نتایج به صورت Mean ± SD گزارش گردید. شرایط مرجع و پارامترهای کنترل‌شده بستر آزمون در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲. شرایط مرجع و پارامترهای کنترل‌شده بستر آزمون

مشخصه آزمون (واحد)	مقدار / شرایط مرجع	استاندارد مرجع
دمای هوای ورودی (درجه سیلسیوس)	۲۰±۲	ISO 12500-1
رطوبت نسبی جریان هوا	کمتر از ۵۰٪	ISO 12500-3
فشار عملیاتی سیستم (بار گیج)	۷±۰٫۱	ISO 12500-1
سرعت خطی جریان (متر بر ثانیه)	۰٫۱۵	دبی اسمی فیلتر
مدت زمان هر مرحله (دقیقه)	۴۵	ISO 12500-3
سیال آزمون	آئروسل روغن با غلظت پایش‌شده	ISO 12500-1

۴ نتایج و بحث

۴-۱ مقایسه مشخصات فنی و ساختاری

به‌منظور ارزیابی میزان تطابق فنی نمونه بومی با فیلتر مرجع، مشخصات کلیدی و پارامترهای عملکردی دو فیلتر در جدول ۳ مقایسه شده است. نتایج بررسی‌های ساختاری حاکی از آن است که فیلتر بومی از نظر ابعاد هندسی و انتخاب متریال، تطابق کامل با نمونه مرجع دارد؛ این ویژگی امکان جایگزینی مستقیم فیلتر بومی در سیستم موجود را بدون نیاز به هرگونه تغییر مکانیکی فراهم می‌سازد که از منظر بهره‌برداری صنعتی مزیتی کلیدی محسوب می‌شود.

جدول ۳. مقایسه پارامترهای کلیدی عملکرد فیلترهای مرجع و محلی

مشخصه (واحد)	فیلتر مرجع	فیلتر بومی
راندمان فیلتراسیون (درصد)	۹۹,۹۵	۹۹,۹۵
درجه فیلتراسیون (میکرون)	۱	۱
دبی کاری (لیتر بر دقیقه)	۱۰۵	۱۰۵
افت فشار اسمی (مگا پاسکال)	۰,۰۱	۰,۰۱
فشار کاری (بار گیج)	۳	۳
فشار فروپاشی (بار گیج)	۱۰	۱۰
دمای طراحی (درجه سیلسیوس)	۱۰۰	۱۰۰
حداکثر دمای کاری (درجه سیلسیوس)	۷۵	۸۰
سطح مؤثر فیلتراسیون (متر مربع)	۲,۵۰	۲,۵۵

از منظر پارامترهای عملیاتی، مؤلفه‌هایی نظیر دبی اسمی، افت فشار کاری، فشار کاری مجاز، فشار فروپاشی و راندمان فیلتراسیون در هر دو فیلتر در یک محدوده قرار دارند که نشان‌دهنده موفقیت فرآیند مهندسی معکوس در بازتولید دقیق مشخصات طراحی است. تنها تفاوت‌های قابل‌توجه میان دو فیلتر، افزایش جزئی در سطح مؤثر فیلتراسیون (از ۲,۵۰ به ۲,۵۵ مترمربع) و بهبود حداکثر دمای کاری (تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد) در نمونه بومی است که ضریب اطمینان عملکرد کارتریج را در شرایط بار حرارتی افزایش می‌دهد.

۴-۲ تحلیل سطح مؤثر فیلتراسیون و افت فشار

یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در کارکرد فیلترهای آئروسل، سطح مؤثر فیلتراسیون است. در نمونه بومی با بهینه‌سازی گام چین‌خوردگی، مساحت مدیا به ۲,۵۵ مترمربع ارتقا یافته است. افزایش سطح مؤثر فیلتراسیون موجب کاهش سرعت سطحی جریان (u) در بستر الیافی می‌گردد. با توجه به رابطه حاکم بر افت فشار سیال در مدیاهای متخلخل متراکم:

$$\Delta P = \frac{\mu u L}{K} \qquad (۸)$$

که در آن μ لزجت دینامیکی سیال، L ضخامت بستر الیافی و k نفوذپذیری بستر متخلخل است، کاهش سرعت سطحیu ناشی از افزایش سطح به کنترل و تثبیت افت فشار پایه در مقدار ۰,۰۱ مگاپاسکال (مشابه نمونه مرجع) کمک شایانی نموده است. علاوه بر این، کاهش سرعت موضعی جریان، زمان اقامت ذرات در مدیا را افزایش داده و احتمال برخورد و هم‌جوشی قطرات زیرمیکرونی روغن را ارتقا می‌بخشد.

۴-۳ ارزیابی راندمان فیلتراسیون و استحکام مکانیکی

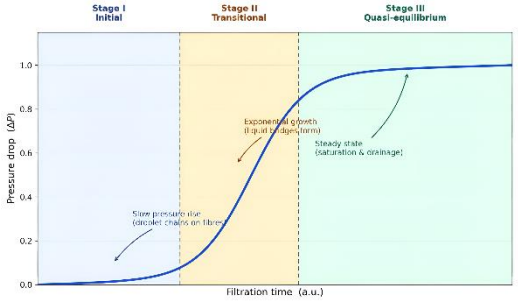
راندمان فیلتراسیون بر اساس سنجش تفاضلی غلظت ذرات در بالادست و پایین‌دست بستر آزمون مطابق رابطه (۷) محاسبه شد. نتایج نشان داد که فیلتر بومی به راندمان متوسط ۹۹,۹۵ درصد برای آئروسل‌های روغنی با اندازه اسمی ۱ میکرومتر دست یافته است. استفاده از مدیای میکروفایبر شیشه با ساختار چندلایه الیاف با قطر متغیر، شرایط بهینه‌ای را برای فعال‌سازی توأم مکانیزم‌های سه‌گانه نفوذ براونی، رهگیری مستقیم و برخورد اینرسی فراهم ساخته است.

از نظر مکانیکی، سازه کارتریج بومی شامل توری‌های محافظ استیل ضدزنگ و کلاهک‌های انتهایی تقویت‌شده، مقاومت به فشار

فروپاشی بیش از ۱۰ بارگیج را نشان داد که امنیت ساختاری کامل را در صورت نوسانات ناگهانی فشار خط تضمین می‌نماید.

۴-۴ تحلیل رفتار در حالت اشباع

بر اساس مبانی تئوریک و مطالعات بنیادین فیلتراسیون آئروسل‌های مایع [۱۳، ۱۴]، تکامل زمانی افت فشار و پدیده کوآلیسنس در بسترهای الیافی از یک رفتار غیرخطی سه‌مرحله‌ای تبعیت می‌کند (شکل ۶):



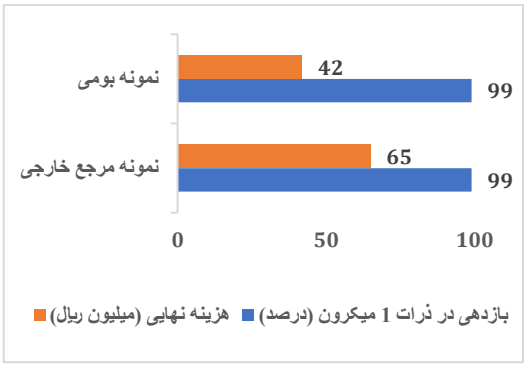
شکل ۶ نمودار شماتیک تکامل سه‌مرحله‌ای افت فشار در فیلترهای کوآلیسر در طول زمان کارکرد (بازسازی مفهومی بر اساس مدل‌های مراجع [۱۳، ۱۴])

- مرحله اولیه (Initial Stage): ذرات آئروسل روی الیاف خشک جذب شده و به‌صورت قطرات مجزا یا زنجیره‌های موضعی ته‌نشین می‌شوند که با افزایش بسیار ملایم افت فشار همراه است.
- مرحله انتقالی (Transitional Stage): با به هم پیوستن قطرات، پل‌های مایع (Liquid Bridges) میان الیاف مجاور شکل گرفته و انسداد منافذ سبب افزایش شدید و نمایی افت فشار می‌گردد.
- مرحله شبه‌تعادل (Quasi-equilibrium / Saturated Stage): در این مرحله، حجم مایع در بستر به حد بحرانی رسیده و نرخ تشکیل قطرات بزرگ و زهکشی ثقلی/موییینگی (Drainage Rate) با نرخ بارگیری آئروسل ورودی برابر می‌شود؛ در نتیجه، افت فشار در یک مقدار اشباع پایدار تثبیت می‌گردد.

اگرچه استاندارد ISO 12500-1 پروتکل ارزیابی در حالت اشباع مداوم (Draining Equilibrium) را توصیه می‌نماید، اما در این پژوهش به دلیل محدودیت‌های زمانی بستر آزمون و کالیبراسیون شمارنده ذرات در بازه‌های منقطع، آزمون‌ها بر فاز اولیه عملکرد و سنجش راندمان تفکیک تمرکز داشته‌اند. ارزیابی رفتار فیلتر در شرایط کارکرد مداوم صنعتی (۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ ساعت) و نوسانات شدید حرارتی-رطوبتی به عنوان چشم‌انداز توسعه و ارزیابی تکمیلی این محصول در نظر گرفته شده است.

۵-۴ تحلیل اقتصادی و صرفه‌جویی صنعتی

در کنار ارزیابی‌های فنی، توجیه اقتصادی طرح بومی‌سازی از مؤلفه‌های اساسی ارزیابی پروژه محسوب می‌شود. در شکل ۷، مقایسه هزینه تمام‌شده و بازدهی فیلتراسیون دو نمونه ارائه شده است.



شکل ۷. مقایسه شاخص‌های فنی و اقتصادی فیلتر بومی با نمونه مرجع خارجی.

نتایج نشان می‌دهد هزینه تأمین هر کارتریج مرجع خارجی بالغ بر ۶۵ میلیون ریال است، در حالی که نمونه بومی با هزینه تمام‌شده ۴۲ میلیون ریال (کاهش حدود ۳۵ درصدی) به مرحله تولید رسیده است. این کاهش هزینه بدون هیچ‌گونه مصالحه‌ای در راندمان عملکردی و ایمنی مکانیکی حاصل شده است. بومی‌سازی این قطعه مصرفی ضمن کاهش مستقیم هزینه‌های جاری تعمیرات

و نگهداری واحدهای پتروشیمی، مخاطرات ناشی از توقف خطوط تولید به دلیل چالش‌های زنجیره تأمین بین‌المللی را رفع می‌سازد. این صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از حذف هزینه‌های واسطه‌گری، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل بین‌المللی و بهره‌گیری از توانمندی‌های ساخت داخلی است. با توجه به مصرفی بودن این قطعه در صنایع پتروشیمی، بومی‌سازی آن نه تنها منجر به کاهش هزینه‌های جاری نگهداری می‌شود، بلکه ریسک توقف واحدها به دلیل عدم تأمین به موقع قطعات خارجی را نیز به حداقل می‌رساند.

۶-۴ جمع‌بندی فرآیند بومی‌سازی

بر اساس نتایج ارائه‌شده، فیلتر بومی‌سازی‌شده توانسته است پارامترهای کلیدی طراحی و عملکردی فیلتر مرجع را با دقت مناسبی بازتولید کند. تطابق کامل ابعادی، افت فشار مشابه، راندمان فیلتراسیون معادل و مقاومت مکانیکی قابل قبول، نشان‌دهنده موفقیت مهندسی معکوس در این پژوهش است.

افزایش جزئی سطح فیلتراسیون در نمونه بومی نیز می‌تواند در برخی شرایط عملیاتی به بهبود توزیع جریان و کاهش سرعت سطحی کمک کند. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرآیند مهندسی معکوس می‌تواند راهکاری مؤثر برای توسعه و تولید داخلی فیلترهای صنعتی مورد استفاده در سیستم‌های روانکاری توربین باشد و زمینه کاهش وابستگی به نمونه‌های وارداتی را فراهم سازد.

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با رویکرد مهندسی معکوس و متناسب‌سازی فرآیندی، موفق به طراحی، ساخت و اعتبارسنجی عملیاتی فیلتر کوآلیسر جایگزین برای سیستم‌های روغن‌کاری توربوماشین‌های پتروشیمی گردید. ارزیابی‌های تجربی صورت‌گرفته بر اساس الزامات استاندارد ISO 12500-1 و با بهره‌گیری از متدولوژی شمارش ذرات ISO 12500-3 نشان داد که نمونه بومی ضمن دستیابی به انطباق کامل ابعادی و ساختاری با قطعه مرجع، عملکرد هیدرودینامیکی و بازدهی جداسازی رقابتی ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از سه تکرار مستقل آزمون تجربی در شرایط مرجع، راندمان فیلتراسیون متوسط 99.95%±0.04% را برای آئروسل‌های روغنی با اندازه اسمی ۱ میکرومتر و افت فشار اولیه هیدرودینامیکی ۰٫۰۱ مگاپاسکال (معادل ۱۰۰ میلی‌بار) به ثبت رساند. این داده‌ها مؤید آن است که مدیا و هندسه چین‌خوردگی بهینه‌سازی‌شده در نمونه بومی توانسته‌اند بدون تحمیل افت فشار مازاد بر سیستم، الزامات کیفی جداسازی آئروسل‌ها را مطابق استانداردهای سخت‌گیرانه صنعتی برآورده سازند.

از منظر کاربرد صنعتی و ارزیابی‌های اقتصادی، بومی‌سازی این کارتریج مصرفی منجر به کاهش ۳۵ درصدی هزینه‌های تأمین در مقایسه با نمونه‌های وارداتی شده است. دستیابی به این صرفه‌جویی اقتصادی، در کنار کاهش مخاطرات ناشی از وابستگی به زنجیره تأمین بین‌المللی و ریسک توقف خطوط تولید، توجیه فنی و اقتصادی استفاده گسترده از این تجهیز را در صنایع فرآیندی و پتروشیمی تثبیت می‌نماید.

با وجود دستاوردهای تجربی مطلوب، این مطالعه با محدودیت‌های عملیاتی همراه بوده است. ارزیابی‌های هیدرودینامیکی حاضر عمدتاً بر فاز اولیه عملکرد فیلتر متمرکز بوده و به دلیل محدودیت‌های زمانی تجهیزات آزمایشگاهی، ثبت پیوسته رفتار بلندمدت فیلتر تا رسیدن به رژیم اشباع کامل و تعادل تخلیه (جایی که تغییرات افت فشار اشباع به کمتر از ۱ درصد در ساعت کاهش می‌یابد) میسر نگردید؛ از این رو، تعمیم دقیق طول عمر کارکرد کارتریج مستلزم پایش میدانی مداوم در بازه‌های ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ ساعت کاری در شرایط واقعی سایت خواهد بود.

در راستای تکمیل این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تحلیل رفتار دوفازی و اثرات توأم دما و ویسکوزیته سیال روان‌کننده بر دینامیک برخورد و پدیده کوآلیسنس ذرات با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در مقیاس حفرات مدیا بررسی گردد. همچنین، به‌کارگیری بسترهای

کامپوزیتی نانوالیاف برای بهبود نفوذپذیری و کاهش افت فشار در رژیم اشباع و نیز طراحی بسترهای پایش مجهز به سیستم بازچرخانی پیوسته سیال جهت ثبت دقیق‌تر رفتار بلندمدت فیلتر، از مهم‌ترین افق‌های توسعه این فناوری به شمار می‌روند.

منابع

[1] Hinds WC. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience; 1999.

[2] Baron PA, Willeke K. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2011.

[3] Totten GE. Handbook of Lubrication and Tribology. Vol. 1, Application and Maintenance. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2006.

[4] Walsh D. Mist filtration applications in industrial environments. Filtration & Separation. 2018.

[5] Cooper CD, Alley FC. Air Pollution Control: A Design Approach. 4th ed. Long Grove: Waveland Press; 2010.

[6] Sutherland K. Filters and Filtration Handbook. 5th ed. Oxford: Elsevier; 2008.

[7] Brown RC. Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters. Oxford: Pergamon Press; 1993.

[8] Davies CN. Air Filtration. London: Academic Press; 1973.

[9] Lee KW, Liu BY. Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters. Aerosol Sci Technol. 1982;1(2):147-161.

[10] Hutten IM. Handbook of Nonwoven Filter Media. 2nd ed. Oxford: Elsevier Science; 2015.

[11] Thomas D, Penicot P, Contal P, et al. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles. Filtration & Separation. 2001.

[12] Mullins BJ, Kasper G. Visualisation of oil mist loading in fibrous filters. J Aerosol Sci. 2006.

[13] Payet S, Boulaud D, Madelaine G, et al. Penetration and pressure drop of a fibrous filter as a function of the oil mist loading. J Aerosol Sci. 1992.

[14] Zhang Y, Wang S, et al. Experimental study on pressure drop and efficiency of coalescing filters for oil mist removal. Sep Purif Technol. 2017; 186:14-22.

[15] Kampa D, Wurster S, et al. Pressure drop model for oily aerosol filtration. J Aerosol Sci. 2014; 69:106-116.

[16] Xu C, Wang Y, Yu Y, et al. Coalescence performance of Janus filter for the removal of oil mist. Chem Eng Res Des. 2024; 212:185-195. doi: 10.1016/j.cherd.2024.11.002.

[17] Starnoni M. Multiphase flow and coalescence filtration in fibrous filters: A review of numerical and machine learning approaches. Ind Eng Chem Res. 2025;64. doi: 10.1021/acs.iecr.5c03439.

[18] Fink-Metzmacher A, et al. Vibration-induced droplet drainage on filter fleeces for compressed air filtration. Phys Fluids. 2025. doi:10.1063/5.0281639.

[19] Chen S, et al. Pressure drops reduction of filter media for oily aerosol: A review of recent strategies. Sci Total Environ. 2025; 910:15282.

[20] Zhao X, et al. Investigation of oil mist filtration performance of surface-modified fibrous coalescers. Sep Purif Technol. 2024; 315:123730.

[21] ISO 12500-1:2007, Filters for compressed air — Test methods — Part 1: Oil aerosols; and ISO 12500-3:2009, Part 3: Particulates. International Organization for Standardization.