



Research



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2074684.2023



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Review of Standards, Localization and Performance Improvement of Pulse Air Inlet Filters for Gas Turbines

Alireza Rahimi^{1*}

¹ MSc in Mechanical Engineering, Reverse engineering and manufacturing unit, Bushehr, Iran petrochemical company, asaluyeh

Received: 13 Aug 2025 Accepted: 23 Oct 2025

Abstract

This study investigates the standards, design principles, and localization process of a pulse air inlet filter for gas turbines, focusing on a successful case at Bushehr Petrochemical Complex. The main objective was to develop a domestically manufactured filter with performance equivalent to the Camfil reference while reducing operational costs. Localization involved extracting the technical specifications of the original filter and applying an electrospun nanofiber coating onto commercial filter media. Experimental results showed that the localized filter achieved the F9 filtration class while reducing total pressure drop from 422 Pa to 121 Pa—approximately a 71% improvement in airflow resistance. This reduction directly decreases power consumption and enhances turbine efficiency. The nanofiber layer improved surface filtration, preventing deep clogging within the media. The localized filter demonstrated stable, economical, and reliable performance, offering lower manufacturing costs and easier accessibility, making it a suitable replacement for the original imported unit.

Keyword: Gas Turbine Pulse Air Intake Filter, Localization, Filtration Efficiency, Nanofiber Coating, Self-Cleaning

* Al.Rahimi@Bupc.ir

Please Cite This Article Using:

Rahimi, A., "Review of Standards, Localization and Performance Improvement of Pulse Air Inlet Filters for Gas Turbines", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 91, pp. 73-86, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2074684.2023



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

بررسی استاندارد، بومی سازی و بهسازی عملکرد فیلتر ورودی هوای پالس توربین گاز

علیرضا رحیمی^{*1}

¹ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، واحد مهندسی معکوس و ساخت کالا، پتروشیمی بوشهر، عسلویه، ایران

دریافت: 1404/05/22 پذیرش: 1404/08/01

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی استانداردها، اصول طراحی و فرآیند بومی سازی فیلتر ورودی هوای پالس توربین گاز، با تمرکز بر نمونه ای موفق در پتروشیمی بوشهر می پردازد. هدف اصلی، ساخت نمونه داخلی با عملکرد معادل فیلتر مرجع شرکت Camfil و کاهش هزینه های عملیاتی است. فرآیند بومی سازی با استخراج مشخصه های فنی فیلتر اصلی و به کارگیری پوشش نانوالیاف بر بستر تجاری بازار انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد فیلتر بومی سازی شده ضمن دستیابی به کلاس فیلتراسیون F9، افت فشار را از 422 به 121 پاسکال کاهش داده و حدود 71 درصد بهبود در مقاومت جریان هوا ایجاد کرده است. این ویژگی موجب کاهش مصرف توان و افزایش بازدهی توربین می شود. لایه نانوالیاف با تقویت فیلتراسیون سطحی، مانع انسداد داخلی بستر شده است. فیلتر بومی سازی شده با عملکردی پایدار، اقتصادی و قابل اتکا، ضمن کاهش هزینه ساخت و فراهم سازی دسترسی آسان تر به محصول، جایگزینی مناسب برای نمونه اصلی محسوب می شود.

کلمات کلیدی: فیلتر ورودی هوای پالس توربین گاز، بومی سازی، بازدهی فیلتراسیون، پوشش نانوالیاف، پاک سازی خودکار

* Al.Rahimi@Bupc.ir

1- مقدمه

توربین گازی یکی از حساس‌ترین تجهیزات در واحدهای صنعتی محسوب می‌شود که نگهداری صحیح آن همواره از اولویت بالایی برخوردار است. سیستم فیلتراسیون هوای ورودی به عنوان اولین خط دفاعی، نقش تعیین کننده‌ای در حفظ کارایی و طول عمر این ماشین‌های دوار دارد [1]. عملکرد بهینه این سیستم مستلزم انتخاب فیلترهایی است که بتوانند در شرایط محیطی نصب توربین، توازن مناسبی بین بازدهی فیلتراسیون و افت فشار ایجاد کنند [2]. متناسب با منطقه عملیاتی توربین گاز، آلاینده‌ها می‌توانند شامل ذرات جامد، گازها، مایع‌ها، نمک‌های دریا، گرد و غبار، بخارهای سوخت و هرگونه محصول جانبی صنعتی باشند. پژوهش‌های گسترده‌ای به بررسی اثرات این آلاینده‌ها بر عملکرد توربین‌های گاز پرداخته‌اند. برای مثال الحدیک¹ به بررسی تأثیر دما، رطوبت نسبی، نسبت کسر حجمی دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن و ذرات گرد و غبار بر عملکرد توربین گاز پرداخته است [3]. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که افزایش رطوبت و گرد و غبار تأثیر چشم‌گیری بر عملکرد فیلتر هوا داشته و می‌تواند با به صفر رساندن عملکرد آن‌ها، بازدهی انرژی در توربین گازی را بطور جدی کاهش دهد [4، 5]. با ورود این آلاینده‌ها به توربین، ریسک وقوع عوامل مخربی مانند فرسایش، رسوب ذرات و خوردگی در توربین و خصوصاً پره‌های آن، افزایش می‌یابد. ذرات جامد و مایع می‌توانند با سرعت بالا به سطوح فلزی توربین برخورد کرده و موجب آسیب‌های میکروسکوپی، زبری سطح و از بین رفتن تدریجی آن‌ها شوند. آلاینده‌های کوچک می‌توانند با تجمع و رسوب در مناطق کم جریان مسیر هوای ورودی، عملکرد توربین را کاهش دهند. رسوب آلاینده‌هایی که امکان ایجاد واکنش‌های خوردگی با فلز را دارند، موجب ایجاد خوردگی و گسترش آن می‌شود [2]. الکالاف² همکاران به بررسی فرآیند فرسایش ناشی از ذرات شن و گرد و غبار و تخریب قطعات توربین گاز، کاهش بازدهی و کاهش عمر آن پرداخته‌اند [6].

مطالعات متعددی نیز بر روی بهینه‌سازی بستر فیلتر³ صورت گرفته است. برای مثال اکدومن⁴ همکاران طی پژوهشی نشان دادند که با افزودن یک لایه پوششی نانوالیاف، آلاینده‌ها به جای نفوذ عمیق در بستر، روی سطح بستر فیلتر جمع شده و می‌توان آن را به راحتی با یک پالس بازگشتی هوا⁵ تمیز کرد. این امر منجر به عمر طولانی‌تر، افت فشار کم‌تر و افزایش بازدهی فیلتر می‌شود [7].

بیشتر تحقیقات موجود بر روی بهره‌برداری و انتخاب فیلترها متناسب با منطقه عملیاتی توربین متمرکز بوده است و این در حالی است که در شرایط تحریمی کشور عزیزمان، مسئله اصلی بومی‌سازی فیلتر و کاهش وابستگی به منابع خارجی است. لذا با وجود حجم گسترده‌ای از دانش پایه، پژوهشی مکتوب در زمینه مهندسی معکوس و بومی‌سازی این فیلترها انجام نشده است. در این پژوهش، استانداردها و برخی اصول طراحی فیلترهای هوای ورودی بررسی شده است و سپس به مستندسازی فرآیند بومی‌سازی فیلتر ورودی هوای پالس توربین گاز ساخت شرکت سوئدی Camfil مربوط به واحد شیرین‌سازی پتروشیمی بوشهر، به عنوان یک الگوی تجربی موفق، پرداخته شده است.

¹ El-Hadik

² Alqallaf

³ Filter Media

⁴ Akduman

⁵ Reverse Pulse Jet

2- اصول طراحی فیلتر هوای ورودی

انتخاب و طراحی بهینه سیستم‌های فیلتراسیون هوای ورودی برای توربین‌های گازی نیازمند تحلیل دقیق مجموعه‌ای از پارامترهای عملیاتی و اقتصادی است. پارامترهای فنی کلیدی که مستقیماً بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند عبارتند از میانگین میزان جذب⁶، ظرفیت نگهداری گرد و غبار⁷، افت فشار اولیه⁸ و بازدهی متوسط⁹ [4]. اما فراتر از این شاخص‌های فنی، تصمیم‌گیری نهایی در پروژه‌های عملیاتی به شدت تحت تأثیر ملاحظات اقتصادی چرخه عمر¹⁰ قرار می‌گیرد. در این بخش به مروری مختصر بر این موارد پرداخته شده است.

2-1- پارامترهای فنی

در طراحی سیستم فیلتر هوای ورودی توربین گاز، اصلی‌ترین چالش، دستیابی به تعادل میان افت فشار و بازدهی فیلتراسیون است. فیلترهای با بازدهی بالا، با حذف بخش عمده‌ای از ذرات و رطوبت، کیفیت هوای ورودی را به طور چشم‌گیری بهبود می‌بخشند و از سایش و رسوب‌گذاری در اجزای داخلی می‌کاهند؛ اما این عملکرد به‌ناگزیر با ایجاد محدودیت در مسیر جریان هوا و افزایش افت فشار همراه است که موجب کاهش توان خروجی توربین خواهد شد. مطالعات نشان می‌دهد که اثرات منفی ناشی از افت فشار معمولاً کمتر از خسارات بلندمدتی است که بر اثر ورود هوای آلوده به توربین ایجاد می‌شود [2]. بر این اساس، فرآیند طراحی فیلتر هوای ورودی را می‌توان یک مسئله بهینه‌سازی چندمعیاره قلمداد کرد که در آن، هدف اصلی، کاهش حداکثری افت فشار در شرایط عملیاتی در کنار حذف مؤثر بخش عمده‌ای از آلاینده‌ها می‌باشد.

به‌طور کلی، بازدهی فیلتر درصد نسبت وزن، حجم، مساحت یا تعداد ذرات ورودی به فیلتر به وزن، حجم، مساحت یا تعداد ذرات جذب شده در فیلتر است. برای مثال، بازدهی وزنی به صورت رابطه 1 محاسبه می‌شود [2].

$$\eta = \frac{W_{entering} - W_{leaving}}{W_{entering}} * 100 \% \quad (1)$$

در این رابطه η بازدهی وزنی فیلتر، $W_{entering}$ وزن آلاینده‌های ورودی به فیلتر، $W_{leaving}$ وزن آلاینده‌های خروجی از فیلتر می‌باشد.

بازدهی را می‌توان به چندین روش شامل حداکثر، حداقل یا میانگین طول عمر بیان کرد. بسیاری از فیلترها در ابتدای عمر خود عملکرد ضعیفی در برابر ذرات کوچک دارند، اما با پر شدن بستر فیلتر از ذرات، قادر به جذب ذرات کوچک‌تر می‌شوند. در این حالت، بازدهی متوسط در واقع بالاتر از بازدهی اولیه خواهد بود [2].

2-2- ملاحظات اقتصادی

در تعیین بهترین سیستم فیلتراسیون باید ضمن محوریت قرار دادن شاخص‌های فنی، ملاحظات اقتصادی چرخه عمر، مانند هزینه اولیه (فیلترها، سیستم فیلتراسیون، فیلترهای یدکی، ابزار دقیق)، نصب و راه‌اندازی، حمل و نقل، انرژی، عملیاتی، نگهداری و تعمیرات، تخریب و افت عملکرد توربین گاز را لحاظ نمود [2].

⁶ Average Arrestance

⁷ Dust Holding Capacity

⁸ Initial Pressure Drop

⁹ Average Efficiency

¹⁰ Life Cycle Cost

افت فشار سیستم فیلتراسیون به طور مستقیم با مصرف انرژی کمپرسور توربین گازی مرتبط است. افزایش اندک در افت فشار منجر به کاهش توان خروجی توربین می شود و این خود به معنای افزایش هزینه های سوخت برای دستیابی به توان نامی است که افزایش هزینه های عملیاتی را در پی دارد. این هزینه ها را می توان با استفاده از روابط 2 و 3 تخمین زد. رابطه 2 هزینه ناشی از افت فشار را در طول عمر فیلتر محاسبه می کند و رابطه 3 هزینه سوخت اضافی ناشی از این افت فشار را تخمین می زند. این هزینه ها تکرار شونده هستند و باید برای هر بار تعویض یا تمیز کردن فیلترها در تحلیل لحاظ شوند [2]. فشار سیستم فیلتراسیون به طور مستقیم با مصرف انرژی کمپرسور توربین گازی مرتبط است. افزایش اندک در افت فشار منجر به کاهش توان خروجی توربین می شود و این خود به معنای افزایش هزینه های سوخت برای دستیابی به توان نامی است که افزایش هزینه های عملیاتی را در پی دارد. این هزینه ها را می توان با استفاده از رابطه های 2 و 3 تخمین زد. رابطه 2 هزینه ناشی از افت فشار را در طول عمر فیلتر محاسبه می کند و رابطه 3 هزینه سوخت اضافی ناشی از این افت فشار را تخمین می زند. این هزینه های تکرار شونده هستند و باید برای هر بار تعویض یا تمیز کردن فیلترها در تحلیل لحاظ شوند [2].

$$A = 0.0025 * P * C_{kWh} * (dp_2 + dp_1) * t_{filter} \quad (2)$$

$$A = \frac{0.0005}{LHV} * HR * P * C_{scf} * (dp_2 + dp_1) * t_{filter} \quad (3)$$

رابطه 2 و 3 افت فشار در طول زمان را خطی فرض می کنند. عبارت های dp_1 و dp_2 به ترتیب افت فشار در انتها و ابتدای عمر فیلترها و t_{filter} طول عمر فیلتر است. P فشار و C_{kwh} هزینه برق برای هر کیلووات ساعت است. LHV کمترین ارزش حرارتی سوخت، HR نرخ حرارتی توربین گازی و C_{scf} هزینه سوخت برای هر فوت مکعب است.

3- معرفی استانداردهای کاربردی

استفاده از دو استاندارد بسیار متفاوت EN-779:2012 اروپایی [8] و ANSI/ASHRAE 52.2-2017 آمریکایی [9] برای بررسی عملکرد فیلترهای هوا در جهان رایج است. هرچند هدف این استانداردها سنجش معیارهای عملکردی مشابه است، تفاوت در روش های آزمون، مقایسه نتایج را غیرممکن می سازد. به منظور ایجاد قابلیت مقایسه پذیری جهانی، سازمان بین المللی استاندارد، استاندارد واحد ISO 16890 [10] را تدوین کرده است که نحوه انجام آزمایش ها و رتبه بندی محصولات را تغییر داده است.

ISO 16890 فیلترها را با ذرات معلق دارای قطرهای متفاوت مورد بررسی قرار داده و سپس میانگین جذب را در سه محدوده خاص اندازه گیری و به صورت ePM1، ePM2/5 یا ePM10 گزارش می دهد. فیلترها تنها در صورتی که به طور متوسط حداقل 50% بازدهی را نشان دهند، در یکی از این سه دسته قرار گرفته و در غیر این صورت به عنوان درشت¹ شناخته می شوند. با توجه به جدید بودن ISO 16890 و نیاز شرکت ها به زمان برای به روزرسانی تجهیزات، همچنان استفاده از استانداردهای گذشته رایج تر است.

از آنجا که فیلتر مورد بررسی در این مقاله مطابق الزامات استاندارد EN-779:2012 ساخت و تست شده است، جهت ساخت نمونه بومی سازی شده نیز از همین استاندارد بهره گرفته شده است. این استاندارد به طور مشروح به معرفی

¹ Course

آزمون‌های عملکردی فیلتر هوای ورودی توربین گاز و روش‌های انجام آن‌ها می‌پردازد و شامل الزام‌ها، روش‌های آزمون و مشخصه‌های دستگاه آزمون برای اندازه‌گیری عملکرد فیلتر است. در این استاندارد، فیلترهای هوا باید در برابر دو آئروسول مصنوعی شامل آئروسول ریز، برای اندازه‌گیری بازده فیلتراسیون، به عنوان تابعی از اندازه ذرات در محدوده $0/2 \mu\text{m}$ تا $0/3 \mu\text{m}$ و یک آئروسول با اندازه درشت، برای به دست آوردن اطلاعات در مورد ظرفیت گرد و غبار آزمایشی و بازدهی فیلتراسیون نسبت به گرد و غبار بارگذاری شده، مورد ارزیابی قرار گیرند.

این استاندارد برای فیلترهای هوا با بازده اولیه کمتر از 98% نسبت به ذرات $0/4 \mu\text{m}$ انجام می‌شود. طبقه‌بندی در این استاندارد بر اساس بازده متوسط صورت می‌گیرد. فیلترهایی که دارای بازده متوسط کمتر از 40% هستند، در گروه G دسته‌بندی می‌شوند. فیلترهایی که دارای بازده متوسط بین 40% تا 80% هستند به گروه M اختصاص داده می‌شوند. فیلترهایی که دارای بازده متوسط 80% یا بیشتر هستند در گروه F قرار داده می‌شوند و طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس دو فاکتور بازدهی متوسط و بازدهی حداقل¹² در طول آزمون صورت می‌گیرد.

4- مشخصات فیلتر اصلی

با توجه به تنوع آلاینده‌های موجود در هوای ورودی به توربین و همچنین جهت جلوگیری از افت فشار سریع فیلترها، از سیستم‌های فیلتراسیون چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. در این طرح‌ها، ابتدا می‌توان از یک پیش‌فیلتر یا دریچه هوا برای حذف ذرات فرسایشی، باران و برف استفاده کرد. فیلتر دوم، یک فیلتر با کارایی متوسط برای حذف ذرات ریزتر یا یک فیلتر کوالسر برای حذف مایعات است و فیلتر سوم معمولاً یک فیلتر با کارایی بالاتر است. المنت فیلترهای ورودی هوای پالس توربین گاز مورد بررسی در این مقاله به عنوان مرحله سوم یک سیستم فیلتراسیون هستند که خود متشکل از دو فیلتر کارتریجی (استوانه‌ای و مخروطی) مطابق شکل 1 و از سری CamPulse ساخت شرکت سوئدی Camfil می‌باشند [11].



شکل 1- فیلتر اصلی شرکت Camfil

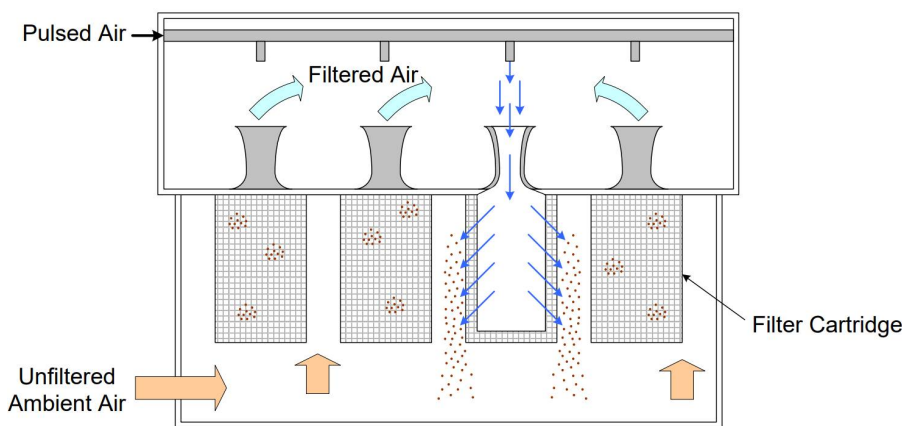
فیلترهای سری CamPulse جهت محافظت از ماشین‌های دوار در محیط‌های با گرد و غبار بالا طراحی شده‌اند و عملکرد مداوم و فشار پایدار را در این شرایط عملیاتی فراهم می‌کنند. چین‌خوردگی یکنواخت بستر باعث می‌شود که حداکثر سطح بستر در معرض جریان هوا قرار گرفته و ظرفیت نگهداری گرد و غبار افزایش یابد و همچنین حداقل

¹² Minimum Efficiency

مقاومت در مسیر جریان ایجاد شود. راندمان بالا و آب‌بندی عالی بین فلز و بستر از دیگر ویژگی‌های مثبت این سری از تولیدهای شرکت Camfil است [11].

4-1- ویژگی پاک‌سازی خودکار فیلتر

فیلترها به دو روش متفاوت، بارگذاری سطحی³ و بارگذاری عمقی⁴ ذرات آلاینده را از هوا جدا می‌کنند. در بارگذاری عمقی ذرات آلاینده به داخل بستر فیلتر نفوذ کرده و به دام می‌افتند و روند پر شدن فیلتر بر اساس افت فشار کنترل می‌شود. برای بازیابی افت فشار به شرایط اولیه، المنت فیلتر باید تعویض شود [2]. در بارگذاری سطحی که معمولاً در سیستم‌های پاک‌سازی خودکار⁵ استفاده می‌شوند، ذرات آلاینده روی سطح بستر فیلتر جمع شده و پس از رسیدن اختلاف فشار به مقدار مشخصی، با پالس بازگشتی هوا تمیز می‌شوند. بارگذاری سطحی نخستین بار در دهه 1970، برای شرایط کاری در خاورمیانه توسعه داده شد، جایی که توربین‌های گازی با چالش طوفان‌های مکرر گرد و غبار مواجه بودند و این سیستم استفاده از فیلترهای با راندمان بالا را بدون نیاز به تعویض‌های مکرر امکان‌پذیر می‌ساخت. در این روش، هوا از طریق المنت فیلترهای کارتریجی با راندمان بالا وارد یک محفظه هوای پاک می‌شود و آلاینده‌های موجود در هوا روی سطح بستر فیلتر به دام می‌افتد [12]. افت فشار در فیلتر به طور مداوم کنترل می‌شود و هنگامی که به آستانه از پیش تعیین‌شده‌ای برسد، عملیات تمیزکاری به‌صورت خودکار فعال شده و نازل‌های پاک‌کننده که توسط هوای فشرده (خروجی از کمپرسور توربین یا منبع خارجی دیگر) تحت فشار قرار گرفته‌اند، فعال می‌شوند. چگونگی فرآیند در شکل 2 نشان داده شده است [2].



شکل 2- فرآیند پاک‌سازی خودکار در فیلترهای سطحی

پالس بازگشتی هوای فشرده برای مدت زمانی 100 تا 200 میلی‌ثانیه اعمال می‌شود. برای بهینه‌سازی مصرف هوای فشرده و جلوگیری از ایجاد اختلال در جریان هوای ورودی به توربین، معمولاً فقط 10% از المنت‌ها به‌طور همزمان پالس می‌شوند. این فرآیند امکان بازگرداندن عملکرد فیلتر به نزدیکی شرایط اولیه تمیز را فراهم می‌کند [2]. نکته قابل توجه این است که برخلاف فیلترهای عمقی، راندمان فیلترسیون سطحی با پر شدن سطح از گرد و غبار افزایش می‌یابد، زیرا لایه گرد و غبار ایجاد شده روی سطح بستر مانند یک لایه اضافی عمل می‌کند [2].

¹ Surface Loading Filtration

3

¹ Depth Loading Filtration

4

¹ Self - cleaning

5

المنت فیلترها در این روش، زمانی تعویض می‌شوند که چرخه تمیز کردن دیگر نتواند افت فشار را جبران کند یا علائم فرسودگی ناشی از اثرات ذرات جذب شده، اشعه ماوراء بنفش، گرما و عمر فیلتر نشان داده شود. اگرچه این دوره را نمی‌توان برای همه محیط‌ها تعیین کرد، اما تجربه نشان می‌دهد که در بیابان‌های خاورمیانه حدود دو سال دوام می‌آورد [2].

4-2- مشخصات بستر فیلتر اصلی

بستر فیلتر بستر متخلخل و قابل نفوذ در ساختار فیلتر محسوب می‌شود که ذرات آلاینده در آن به دام می‌افتند. هرچه بازدهی بالاتر و افت فشار کمتر باشد، بستر مطلوب‌تر است. مطابق اطلاعات سازنده، بستر بکار رفته در هر دو فیلتر اصلی از جنس سلولز - الیاف مصنوعی⁶ و با کلاس فیلتراسیون F9 مطابق استاندارد EN-779: 2012 است. این بستر از مخلوطی آغشته به رزین از سلولز و الیاف مصنوعی تشکیل شده است و عملکرد بهبود یافته‌ای را در شرایط رطوبت بالا و آب فراوان ارائه می‌دهد [11]. بستر به منظور افزایش سطح مقطع، چین‌داده شده است [12]. فیلترها همراه با محافظ داخلی و خارجی ساخته شده‌است.

4-3- مشخصات فنی و عملکردی فیلتر اصلی

فیلتر اصلی از یک فیلتر مخروطی با کد CO-2612 و یک فیلتر استوانه‌ای با کد CY-2612 مطابق شکل 3 تشکیل شده‌است.



شکل 3- المنت CO-2612 در سمت راست و المنت CY-2612 در سمت چپ

مشخصات فنی و عملکردی فیلتر اصلی در جدول 1 آورده شده‌است [11].

جدول 1- مشخصات فنی و عملکردی فیلتر اصلی

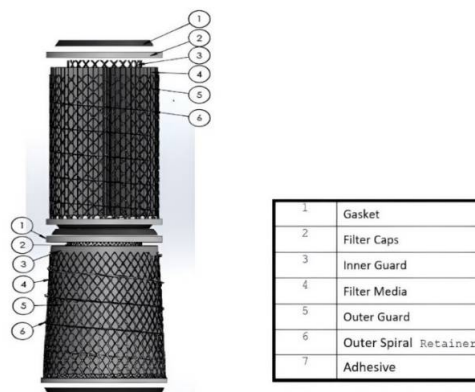
پارامتر	مقدار
شرکت سازنده	Camfil
مدل فیلتر	Campulse
نوع فیلتر	فیلتر کارتریجی با قابیت پاک‌سازی خودکار توسط پالس بازگشتی هوا
سیال	هوا
مقاومت به رطوبت	100%
بازدهی	99/95%

¹ Cellulose-Synthetic

جهت چریان در فیلتر	خارج به داخل
دمای عملیاتی (درجه سانتی گراد)	80
کلاس فیلتراسیون فیلتر استوانه‌ای	F9
کلاس فیلتراسیون فیلتر مخروطی	F9
ابعاد فیلتر استوانه‌ای (میلی متر)	قطر خارجی 324 و ارتفاع 660
ابعاد فیلتر مخروطی (میلی متر)	قطر خارجی 445/324 و ارتفاع 660
دبی هوا در فیلتر استوانه‌ای (مترمکعب بر ساعت)	1062
دبی هوا در فیلتر مخروطی (مترمکعب بر ساعت)	1261
افت فشار اولیه در فیلتر استوانه‌ای (پاسکال)	211
افت فشار اولیه در فیلتر مخروطی (پاسکال)	211
سطح فیلتراسیون در فیلتر استوانه‌ای (متر مربع)	21/4
سطح فیلتراسیون در فیلتر مخروطی (متر مربع)	25/41
بستر فیلتر	سلولز - الیاف مصنوعی

5- دمونتاز فیلتر جهت صحت‌سنجی و مهندسی معکوس

با توجه به عدم ارائه اطلاعات دقیق ساختی از طرف سازنده و همچنین جهت صحت‌سنجی اطلاعات موجود در دفترچه فنی، فیلتر شکافته و اطلاعات لازم استخراج گردید. پس از شکافت فیلتر مشخص شد که بستر فیلتر از نوع ترکیبی سلولز - الیاف مصنوعی مقاوم به رطوبت است. محافظ‌های داخلی و خارجی از جنس کربن استیل گالوانیزه منبسط‌شونده¹⁷ با ضخامت 0/5 میلی‌متر ساخته شده و ضمن پشتیبانی از بستر فیلتر، موجب افزایش تحمل فیلتر نسبت به فشارهای وارده می‌شود. کپ‌های بالایی و پایینی از کربن استیل گالوانیزه ساخته شده‌اند و آب‌بندهایی از جنس لاستیک نیتریل¹⁸ به‌طور دائمی روی آنها چسبانده شده تا آب‌بندی بهینه در هنگام نصب تضمین شود. نگهدارنده‌ای از جنس چسب حرارتی به‌صورت مارپیچ به دور محافظ بیرونی المنت پیچیده شده و موجب اتصال آن با بستر شده است. اجزای مختلف فیلتر به‌وسیله چسب پلی‌اورتان به یکدیگر متصل شده‌اند. نقشه دمونتازی فیلتر در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 4- نقشه دمونتازی فیلتر

¹ Expanded Galvanized Steel
¹ NBR (nitrile butadiene rubber)

7
8

6- مشخصات فیلتر بومی سازی شده

پس از استخراج اطلاعات لازم، فیلتر جایگزین مناسب، مطابق با استانداردهای ساخت فیلتر و با استفاده از دانش و تجربه سازندگان داخل کشور تعیین شد و مراحل ساخت صورت گرفت. کلیه قسمت‌های فیلتر بومی سازی شده مطابق نمونه اصلی و با ابعاد و جنس یکسان ساخته شده‌اند. تصویر فیلتر مخروطی بومی سازی شده به عنوان نمونه در شکل 5 نشان داده شده است.



شکل 5- فیلتر مخروطی بومی سازی شده

6-1- مشخصات بستر جایگزین

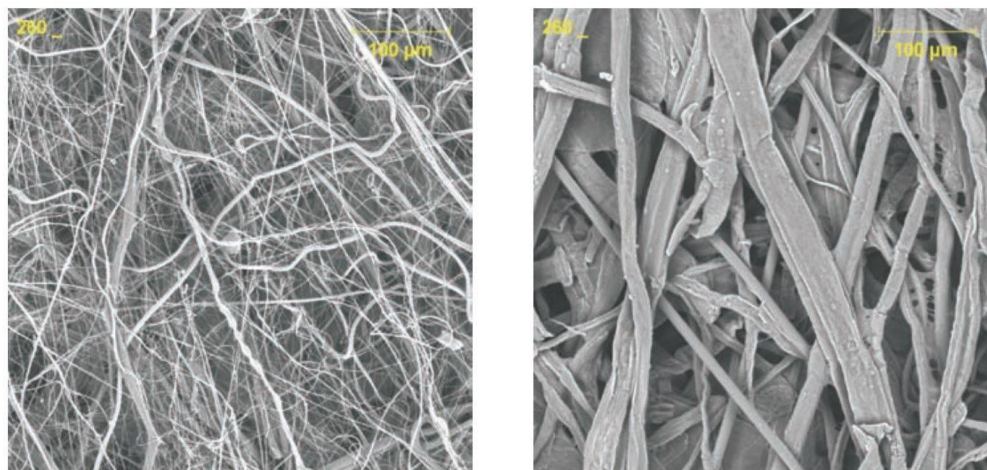
بستر جایگزین مورد استفاده در نمونه بومی سازی شده نیز مانند نمونه اصلی از جنس سلولز - الیاف مصنوعی و با کلاس فیلتراسیون F9 مطابق استاندارد EN-779: 2012 است. این بستر از جنس سلولز آغشته به رزین و مقاوم در برابر آب و الیاف مصنوعی تشکیل شده است. ترکیب بستر Ahlstrom 90/40 E PE K WB2-G مورد استفاده شامل 80 درصد سلولز و 20 درصد الیاف مصنوعی است. سایر اطلاعات بستر در جدول 2 آورده شده است [13]. در فیلتر بومی سازی شده، جهت بهبود عملکرد بستر معرفی شده، یک لایه نانوالیاف به بستر فوق افزوده شده است.

جدول 2- مشخصات بستر مورد استفاده در فیلتر بومی سازی شده

پارامتر	مقدار
شرکت سازنده	AHLSTROM
محل کاربرد	توربین‌های گازی با قابلیت پاک‌سازی خودکار توسط پالس برگشتی هوا
گروه کاری	مرطوب - سلولز آغشته شده + الیاف مصنوعی با ترکیب (80/20)
درجه بندی	G626120
بازدهی	F9
ضخامت (@ 100 kPa) (بر حسب میکرون)	320
سفتی (mg)	3500
نفوذپذیری هوا (لیتر بر ثانیه)	120
حداکثر اندازه منافذ در بستر (بر حسب میکرون)	42

6-2- اعمال پوشش نانوالیاف روی بستر

استفاده از پوشش نانوالیاف روی بستر فیلتر، یک راهکار پیشرفته برای افزایش ظرفیت نگهداری گرد و غبار، بهبود بازدهی اولیه، کاهش افت فشار عملیاتی و در نهایت افزایش طول عمر فیلتر است [14]. در کاربردهای حساس مانند توربین‌های گازی، این فناوری محافظت بیشتری نسبت به بسترهای سنتی ارائه می‌دهد [15]. افزودن پوشش نانوالیاف باعث ایجاد یک ساختار سطحی بسیار ظریف‌تر با اندازه منافذ کوچک‌تر در مقایسه با بسترهای سلولزی معمولی می‌شود. تصویر گرفته شده از بستر با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی¹⁹ مطابق شکل 6، تفاوت سطح بستر را قبل و بعد از افزودن پوشش نانو نشان می‌دهد [16].



شکل 6- سمت راست، تصویر بستر پیش از افزودن پوشش نانو و سمت چپ، پس از آن (بزرگنمایی 260 برابر)

مقایسه صورت گرفته در جدول 3 به خوبی نشان می‌دهد که کلیه مشخصه‌های عملکردی بستر معمولی، پس از افزودن نانوالیاف بهبود یافته است [16].

جدول 3- مقایسه بستر با پوشش نانوالیاف و بدون آن

سلولز با پوشش نانو	سلولز بدون پوشش نانو	پارامتر
90	89	نفوذپذیری هوا (فوت مکعب بر دقیقه)
40	14	بازدهی در برابر آئروسول سدیم کلرید (در اندازه ذرات 0/3 میکرومتر)
77	68	بازدهی اولیه در برابر گرد و غبار ریز استاندارد (AC Fine)
139	112	ظرفیت نگهداری گرد و غبار ریز استاندارد (بر حسب گرم بر متر مربع)
52	51	زمان عملکرد تا رسیدن به افت فشار نهایی 1800 پاسکال (بر حسب دقیقه)
99	95	درصد بازدهی اولیه کل پنل (فیلتر مونتاز شده)
236	210	ظرفیت نگهداری گرد و غبار کل پنل فیلتر (بر حسب گرم بر متر مربع)

ساختار صاف سطح نانوالیاف، از چسبندگی و نفوذ ذرات گرد و غبار به عمق بستر در تمامی چرخه‌های فیلتراسیون جلوگیری کرده و آزادسازی کیک غبار در فرآیند تمیزکاری با پالس بازگشتی را تسهیل می‌کند [15].

¹ SEM

7- نتایج آزمون عملکردی فیلتر بومی سازی شده

فیلتر بومی سازی مطابق استاندارد EN-779:2012 و در آزمایشگاه فیلتراسیون شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان تحت آزمون های عملکردی قرار گرفته است. نتایج این آزمون ها به همراه مشخصه های تجمیعی المنت فیلترها در جدول 4 آورده شده است.

جدول 4- مشخصات فنی و عملکردی فیلترهای بومی سازی شده

پارامتر	مقدار
نوع فیلتر	فیلتر کارتریجی با قابیت پاک سازی خودکار توسط پالس بازگشتی هوا
سیال	هوا
مقاومت به رطوبت	100%
بازدهی	96/30%
جهت جریان در فیلتر	خارج به داخل
دمای عملیاتی (درجه سانتی گراد)	80
کلاس فیلتراسیون فیلتر استوانه ای	F9
کلاس فیلتراسیون فیلتر مخروطی	F9
ابعاد فیلتر استوانه ای (میلی متر)	قطر خارجی 324 و ارتفاع 660
ابعاد فیلتر مخروطی (میلی متر)	قطر خارجی 445/324 و ارتفاع 660
مجموع دبی هوای دو فیلتر (مترمکعب بر ساعت)	2500
مجموع افت فشار اولیه دو فیلتر (پاسکال)	121
مجموع سطح فیلتراسیون دو فیلتر (متر مربع)	43/10
بستر فیلتر	Ahlstrom 90/40 E PE K WB2-G با پوشش نانوالیاف

8- نتایج و بحث

جدول 5 مقایسه ای از ویژگی های کلیدی فیلتر اصلی (جدول 1) و فیلتر بومی سازی شده (جدول 4) را ارائه می دهد.

جدول 5- مقایسه فیلتر بومی سازی شده و اصلی

پارامتر	فیلتر اصلی	فیلتر بومی سازی شده	درصد نسبی تغییرات (بومی به اصلی)
کلاس فیلتراسیون	F9	F9	بدون تغییر
مجموع افت فشار اولیه (پاسکال)	422	121	71/33 درصد کاهش
مجموع سطح فیلتراسیون (مترمربع)	46/81	43/10	7/93 درصد کاهش
بازدهی در 1 میکرومتر	99/95%	96/30%	3/65 درصد کاهش
دبی هوا (مترمکعب بر ساعت)	2323	2500	7/62 درصد افزایش
مقاومت به رطوبت	100%	100%	بدون تغییر
دمای عملیاتی (درجه سانتی گراد)	80	80	بدون تغییر
برآورد نهایی هزینه هر مجموعه (میلیون تومان)	12	8	33/33 درصد کاهش

هدف این پژوهش، مهندسی معکوس و بومی‌سازی فیلترهای با کارایی بالا برای سیستم هوای ورودی به توربین‌های گازی بود که پیش‌تر به فناوری انحصاری شرکت Camfil سوئد وابسته بودند.

نتایج جدول 5 نشان می‌دهد که با وجود کاهش مساحت سطح فیلتراسیون (43/10 در برابر 46/81 مترمربع)، فیلتر بومی‌سازی شده توانسته است به کلاس فیلتراسیون مشابه (F9) دست یابد و مهم‌تر از آن، افت فشار اولیه را به طرز چشمگیری کاهش دهد. مقدار افت فشار اولیه فیلتر بومی‌سازی شده 121 پاسکال اندازه‌گیری شده، در حالی که مقدار مشابه برای فیلتر مرجع 422 پاسکال است؛ این تفاوت معادل کاهش حدود 71/3% در مقاومت اولیه جریان هوا است. این کاهش شدید در افت فشار اولیه شاهدهی قاطع بر موفقیت پوشش نانوالیاف مهندسی شده است. از آنجا که این عدد نشان‌دهنده مقاومت سیستم در حالت تمیز است، کاهش آن مستقیماً به معنای حداقل استرس اولیه بر تجهیزات، کاهش فوری توان مصرفی فن‌ها و افزایش بازدهی اولیه توربین از لحظه تعویض فیلتر می‌باشد. مکانیسم فیلتراسیون به سمت بارگذاری سطحی سوق یافته و مانع از انسداد عمیق و مقاومت ذاتی بالای بستر اصلی شده است. استفاده از متراژ کمتر بستر فیلتر در عین حفظ کلاس فیلتراسیون (F9) و دستیابی به افت فشار اولیه پایین‌تر، مزایای عمده‌ای مانند، کاهش هزینه خرید و تأمین بستر فیلتر به دلیل کاهش حجم مواد مصرفی، بهبود بازدهی تجهیز از همان ابتدا به دلیل افت فشار اولیه کمتر، و افزایش عمر عملیاتی فیلتر به واسطه کندتر شدن فرآیند اشباع و افزایش ظرفیت نگهداری آلاینده به دلیل تمرکز فیلتراسیون در سطح را به همراه دارد. این موضوع با در نظر گرفتن اینکه در هر ورودی توربین 96 ست از این المنت‌ها قرار می‌گیرند، اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند؛ در نتیجه، جمع شدن این صرفه‌جویی‌ها و بهره‌وری‌های کوچک روی هم در مقیاس کل سیستم، تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های عملیاتی کلان خواهد داشت. لازم به ذکر است که هر دو فیلتر تحمل شرایط دمایی و رطوبتی یکسانی دارند. با وجود برتری فیلتر بومی در کاهش مقاومت، فیلتر اصلی همچنان در بازدهی ذرات با قطر 1 میکرومتر با 99/95% برتری جزئی نسبت به فیلتر بومی با 96/30% دارد که این تفاوت احتمالاً ناشی از ماهیت انحصاری الیاف به کاررفته در فیلتر Camfil است. با این حال، حفظ کلاس F9 در دبی بالاتر هوا و افت فشار اولیه بسیار پایین‌تر، نشان‌دهنده عملکرد بسیار موفق در بومی‌سازی است.

9- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف معرفی استاندارد، اصول طراحی و فرآیند بومی‌سازی فیلترهای ورودی هوای توربین گاز با بازدهی بالا، انجام شد. جهت نیل به این هدف، پس از معرفی مختصر استانداردها و نکات طراحی به شرح فرآیند مهندسی معکوس و بومی‌سازی فیلتر پرداخته شد. پس از استخراج اطلاعات فنی و عملکردی فیلتر اصلی، با بهره‌گیری از استانداردهای ساخت فیلتر و دانش و تجربه سازندگان داخلی اقدام به ساخت نمونه اولیه و بهسازی آن در نمونه‌های بعدی گردید. نتایج آزمایشگاهی نمونه ساخته‌شده با موفقیت در آزمون میدانی یک ماهه در شرایط عملیاتی واحد تأیید شد که نشان‌دهنده کارایی ایمن و موثر نمونه ساخته شده در محیط واقعی است.

این مطالعه نشان داد که با استفاده از رویکردهای نوآورانه مانند استفاده از پوشش نانوالیاف روی بسترهای تجاری موجود، می‌توان فیلتر مناسبی ساخت که ضمن برآورده کردن الزامات استاندارد، جایگزینی مطمئن جهت کار در شرایط عملیاتی واحد باشد و حتی در برخی پارامترها، عملکرد بهینه‌تری را ثبت کند.

این دستاورد نه تنها منجر به کاهش هزینه ساخت و دسترسی آسان‌تر به فیلترهای یدکی شد، بلکه موجب استقلال فنی و اقتصادی کشور در تأمین این قطعات صنعتی گردید. با توجه به شباهت فرآیند مهندسی معکوس و بهسازی فیلترهای صنعتی، یافته‌های این پژوهش پتانسیل کاربرد گسترده در صنایع مختلف و بویژه نفت، گاز، پتروشیمی و دیگر بخش‌هایی که نیازمند فیلتراسیون با دقت بالا هستند، را دارا می‌باشد.

10- منابع

- [1] M. P. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [2] M. Wilcox, R. Baldwin, A. G. Hernandez, K. Brun, *Guideline for Gas Turbine Inlet Air Filtration Systems*. Texas, USA: Southwest Research Institute, 2010.
- [3] A. El-Hadik, "On the Effect of Polluted Environment on the Gas Turbine Performance", *Mansoura Engineering Journal*, vol. 17, pp. 14-31, Sep 2021.
- [4] S. Effiom, F. Abam, O. Ohunakin, "Performance modeling of industrial gas turbines with inlet air filtration system", *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 5, pp. 160-167, Mar 2015.
- [5] T. Zhang, Z. Fu, H. Zhou, "Experimental Study of the Effect of Humidity on Air Filter Material Performance", *Energies*, vol. 16, no. 9, pp. 3626, Apr 2023.
- [6] J. Alqallaf, N. Ali, J. Teixeira, A. Addali, "Solid Particle Erosion Behaviour and Protective Coatings for Gas Turbine Compressor Blades—A Review", *Processes*, vol. 8, pp. 984, Aug 2020.
- [7] C. Akduman, V. Demirel, F. Tezcan, "Filter life comparison of different levels of nanofiber coated cleanable-surface filter for gas turbine", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, pp. 33, Apr 2021.
- [8] European Committee for Standardization (CEN), Particulate air filters for general ventilation—Determination of the performance. EN 779:2012, 2012.
- [9] ANSI/ASHRAE, "Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Effectiveness," ASHRAE Std. 52.2-2017, 2017.
- [10] ISO, Air filters for use in general ventilation — Particulate air filter performance classification (ISO 16890 series), ISO 16890-1:2016, ISO 16890-2:2016, ISO 16890-3:2016, ISO 16890-4:2016, 2016.
- [11] Camfil, "CAMPulse Filter Catalogue,"
- [12] R. L. Loud and A. A. Slaterpryce, "Gas Turbine Inlet Air Treatment," General Electric Company, Schenectady, NY, Tech. Rep. GER-3419A, 1991.
- [13] Ahlstrom Italy S.p.A., "90/40 E PE K WB2-G," Technical Datasheet, Mathi (Torino), Italy, Apr. 2012.
- [14] R. S. Barhate, S. Ramakrishna, "Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials", *Journal of Membrane Science*, vol. 296, no. 1–2, pp. 1–8, Jun 2007.
- [15] C. Akduman, V. Demirel, and F. Tezcan, "Filter life comparison of different levels of nanofiber coated cleanable-surface filter for gas turbine," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 138, no. 33, art. 50820, 2021.
- [16] J. Wertz and I. Schnieders, "Advantages of A New and Advanced Nanofiber Coating Technology for Filtration Media Compared to The Electrospinning Process," Hollingsworth & Vose Company Technical Brochure, Nov. 2008.