Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

The University of Tehran Press

Assessment of Airborne Contaminants and the Washing Through Effect on Performance Degradation and Corrosion of V94.2 Gas Turbines in Behbahan CCPP

Masoud Dorfeshan[1*] | Hamid Reza Samipour[2] | Mahdi Elyasi Kojabad[3]

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khatam Al-Anbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: m.dorfeshan@gmail.com
2. Msc. Student, Mechanical Engineering, Khatam Al-Anbia University of Technology, Behbahan, Iran; Senior Engineer of the Engineering Unit at Behbahan Combined Cycle Power Plant. Email: Samipour_h@mapnaom.com
3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Khatam Al-Anbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: m.elyasi@bkatu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 20 July 2024
Revised 20 August 2024
Accepted 21 October 2024
Published Online 04 January 2025

Keywords:
Gas turbine,
Filtration,
Inlet air pollution,
Washing Through Effect,
Hot corrosion.

ABSTRACT

Power plants in the southern regions of the country face significant challenges due to specific environmental conditions, leading to air pollution entering the gas turbines, which negatively impacts equipment performance and lifespan. In V94.2 gas turbines, the incoming air is passed through filters before being directed to the compressor. However, under conditions such as sudden rainfall or increased humidity, filter performance is disrupted, allowing pollutants to infiltrate the turbine. One of the main consequences of this phenomenon is the entry of salt pollutants into the combustion system. These pollutants dissolve in rainwater and eventually reach the combustion chamber, mixing with the air-fuel mixture. These pollutants disrupt the combustion process and accelerate the corrosion and degradation of protective oxide layers on hot-section alloys. This phenomenon, known as the Washing Through Effect (WTE), causes corrosive substances to penetrate sensitive turbine components, such as blades and combustion chamber walls, resulting in reduced efficiency, increased fuel consumption, and premature failure of components. This study examines the effects of inlet air pollution on the performance and material integrity of V94.2 turbines, focusing on the types and levels of pollutants. It also provides solutions to improve filtration processes and reduce WTE-related damage. The results of this study can help extend equipment life and reduce maintenance costs in power plants located in humid and polluted areas.

Cite this article: Dorfeshan, M.; Samipour, H. R. & Elyasi Kojabad, M. (2025). Assessment of Airborne Contaminants and the Washing Through Effect on Performance Degradation and Corrosion of V94.2 Gas Turbines in Behbahan CCPP. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (1), 107-122. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.388581.1114

© Masoud Dorfeshan, Hamid Reza Samipour, Mahdi Elyasi Kojabad
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.388581.1114

Introduction

The inlet air system of gas turbines is critical for optimal performance and equipment lifespan. This system is designed to remove pollutants and particulate matter, optimize airflow, reduce pressure drop, and regulate temperature and humidity. In humid and polluted areas, such as the Behbahan Combined Cycle Power Plant, dust and environmental pollutants increase the pressure drop across the filters and reduce the efficiency of the filtration system. With the onset of the rainy season or increased humidity, the filters become disrupted, allowing water-soluble particles to pass through and enter the compressor and turbine. These particles, which are often water-soluble pollutants, cause deposits to form on the turbine blades and other sensitive components. A phenomenon known as Washing Through Effect

(WTE) occurs in these conditions, where pollutant particles pass through the filters and enter the system. This phenomenon can lead to reduced turbine efficiency, increased fuel consumption, and premature failure of turbine components.

Materials and methods

This study investigates the effects of dust and pollutants entering gas turbines, focusing on erosion and deposition caused by dissolved salt particles in airborne dust. Case studies were conducted at combined-cycle power plants in desert and semi-desert regions with humid and polluted conditions, particularly using V94.2 model gas turbines. Data was collected through site visits, maintenance reports, and operational documentation to assess the filtration system's performance, pollutants' composition, and their impact on turbine components like blades and cooling systems. Samples of deposits from turbine blades and filters were analyzed to identify the pollutants' chemical properties. Additionally, airflow, deposition, and blade wear were modeled to predict the effect of various pollutants on turbine performance and lifespan. The study also examined the Washing Through Effect (WTE) during rainy or humid conditions, which allows soluble particles to pass through filters into the turbine. Based on findings, practical solutions were proposed to enhance filtration systems, improve filter efficiency, and reduce the damage caused by dust. These measures aim to lower maintenance costs and extend turbine service life, particularly in regions with high pollution levels.

Results

This research presents operational solutions to improve gas turbine intake air systems in areas with high humidity and dust pollution. The first proposal was changing the filtration class from F7 to F8 at the Behshehan combined cycle power plant, enhancing filtration efficiency and reducing dust entering the turbines. Despite this, cumulative dust effects still appeared gradually over time. To address this, an offline pulse jet system was designed to clean filters by directing compressed air from active to inactive units, reducing dust entry and improving performance, especially during high humidity periods.An anti-icing system was implemented to prevent filter freezing in humid regions by directing hot compressed air from the compressor. In Behshehan, this system is manually activated if necessary to prevent ice formation and maintain turbine performance. Additionally, the replacement interval for G3 static filters was increased before cold seasons to reduce humidity entering the compressor, thereby improving turbine performance and reducing WTE phenomena. The use of coalescer filters and droplet separators was suggested to remove moisture from intake air, particularly effective during rainy conditions. Finally, installing gutters beneath the intake front panel was recommended to prevent water droplets and moisture from entering the system, improving turbine performance in humid conditions.These measures, especially at the Neka plant, have effectively eliminated the WTE phenomenon, improving turbine lifespan and performance in challenging climates through regular maintenance and moisture control systems.

Discussion and Conclusion

Gas turbines in southern regions, especially in combined cycle power plants, are impacted by pollution and humidity, leading to the WTE phenomenon, which reduces turbine performance and lifespan. This occurs when soluble salts bypass filters during high humidity, causing erosion, clogging, and corrosion of turbine components. Optimization strategies at Behshehan power plant, such as changing filtration classes, using an offline pulse jet system, and implementing anti-icing measures, have reduced WTE, though not entirely eliminated it. Effective moisture control, optimized filtration, and regular maintenance improve turbine performance, reduce fuel consumption, and increase equipment lifespan. Developing a predictive model for WTE can further enhance efficiency in challenging environmental conditions.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

بررسی تأثیر آلودگی هوا و پدیدهٔ Washing Through Effect بر عملکرد و خوردگی توربین گازی V94.2 در نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان

مسعود درفشان[۱*] | حمیدرضا سامی‌پور[۲] | مهدی الیاسی کجاباد[۳]

۱. نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا، بهبهان، ایران. رایانامه: m.dorfeshan@gmail.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا، بهبهان، ایران؛ مهندس ارشد واحد مهندسی نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان. رایانامه: Samipour_h@mapnaom.com

۳. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا، بهبهان، ایران. رایانامه: m.elyasi@bkatu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

کلیدواژه:
توربین گاز،
فیلتراسیون،
آلودگی هوای ورودی،
Washing Through Effect،
خوردگی داغ.

چکیده

نیروگاه‌های مناطق جنوبی کشور به دلیل شرایط خاص محیطی، با مشکلات زیادی در زمینهٔ آلودگی هوای ورودی به توربین‌های گازی مواجه هستند که اثرات مخربی بر عملکرد و عمر تجهیزات دارند. در توربین‌های گازی مدل V94.2، هوای ورودی پس از عبور از فیلترها به کمپرسور منتقل می‌شود، اما در شرایطی مانند بارش‌های ناگهانی یا افزایش رطوبت، عملکرد فیلترها مختل می‌شود و آلودگی به داخل توربین نفوذ می‌کند. یکی از پیامدهای اصلی این پدیده، ورود آلودگی‌های نمکی به سیستم احتراق است که پس از حل شدن در آب باران، به محفظهٔ احتراق و در نهایت، به مخلوط هوا و سوخت راه می‌یابد. این آلودگی‌ها موجب اختلال در فرایند احتراق و تسریع خوردگی و تخریب لایه‌های محافظ روی آلیاژهای داغ می‌شوند. این پدیده که به نام Washing Through Effect (WTE) شناخته می‌شود، به ورود مواد خورنده به اجزای حساس توربین، مانند پره‌ها و دیواره‌های محفظهٔ احتراق، منجر شده و باعث کاهش کارایی، افزایش مصرف سوخت و خرابی زودهنگام قطعات می‌شود. تحقیق حاضر به بررسی اثرات آلودگی هوای ورودی بر عملکرد و یکپارچگی مواد توربین‌های V94.2 با تمرکز بر نوع و میزان آلاینده‌ها می‌پردازد و راهکارهایی برای بهبود فرایند فیلتراسیون و کاهش آسیب‌های ناشی از WTE ارائه می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند به افزایش طول عمر تجهیزات و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری در نیروگاه‌های مناطق مرطوب و آلوده کمک کند.

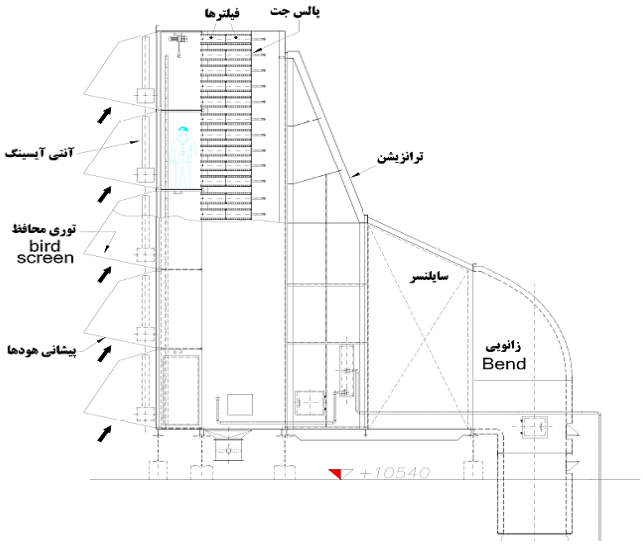
استناد: درفشان، مسعود؛ سامی‌پور، حمیدرضا و الیاسی کجاباد، مهدی (۱۴۰۳). بررسی تأثیر آلودگی هوا و پدیدهٔ Washing Through Effect بر عملکرد و خوردگی توربین گازی V94.2 در نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۴ (۱) ۱۰۷-۱۲۲.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.388581.1114

© مسعود درفشان، حمیدرضا سامی‌پور، مهدی الیاسی کجاباد **ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.388581.1114

۱. مقدمه

سیستم هوای ورودی توربین‌های گازی یکی از اجزای مهم توربو کمپرسور است که نقش قابل توجهی در عمر مفید توربین و توان تولیدی آن دارد. هر توربین گازی به دلیل طراحی ذاتی و نیاز به حجم بالای هوای مصرفی، به‌شدت به کیفیت هوای ورودی حساس است. این سیستم با هدف حذف آلاینده‌ها و ذرات معلق برای جلوگیری از آسیب به پره‌های کمپرسور و سایر اجزا، بهینه‌سازی جریان هوا طراحی شده تا موجب کاهش افت فشار، افزایش بازدهی، تنظیم دما و رطوبت برای تضمین پایداری عملکرد و پیشگیری از خوردگی یا تشکیل یخ شود. عملکرد صحیح سیستم هوای ورودی، به‌ویژه در مناطق با شرایط خاص آب‌وهوایی نظیر مناطق مرطوب و آلوده، نقش اساسی در حفظ کارایی و طول عمر توربین دارد. در شکل ۱ نمایی از سیستم هوای ورودی[1] واحدهای گازی نشان داده شده است. تعداد و کلاس فیلترها بسته به مدل توربین متفاوت است، اما به طور معمول جریان هوای ورودی پس از عبور از یک توری محافظ معروف به توری محافظ پرندگان[2] وارد سیستم فیلتراسیون می‌شود. ابتدا، هوا از یک سری فیلترهای فلزی قابل شست‌وشو عبور می‌کند. سپس، از ۵۴۰ عدد فیلتر استاتیکی با کلاس فیلتراسیون G3، که معمولاً سه بار در سال تعویض می‌شوند، عبور می‌کند و در نهایت، از ۱۲۰۰ عدد فیلتر کاتریجی با کلاس فیلتراسیون F8 می‌گذرد و به کمپرسور وارد می‌شود [۱].



شکل ۱. نمایی از سیستم هوای ورودی واحد گازی

گردوغبار محلی در نیروگاه‌های جنوب کشور، از جمله نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان، به دلیل شرایط آب‌وهوایی باعث افزایش اختلاف فشار فیلترهای اصلی و سیستم هوای ورودی می شود. با وجود سیستم پالس جت آنلاین، این اختلاف فشار بسته به کارکرد توربین در یک بازهٔ مشخص تغییر می‌کند. با شروع فصل بارندگی یا افزایش رطوبت، کاهش قابل توجه اختلاف فشار مشاهده می‌شود. در شکل ۲ که ترند مربوط به سیستم DCS[3] نیروگاه نمایش داده شده است، این کاهش به‌وضوح مشخص است. پس از اولین خروج واحدهای گازی از چرخهٔ کاری، آثار مخرب ورود گردوغبار به صورت رسوب روی پره‌های توربو کمپرسور آشکار شد. نمونه‌ای از رسوب همراه با آلاینده‌های موجود روی فیلتر جمع‌آوری و به آزمایشگاه خاک ارسال شد. نتایج آنالیز دو نمونه نشان داد رسوب روی پره‌ها از جنس آلاینده‌های ورودی است و بخش عمدهٔ این آلاینده‌ها از مواد قابل حل در آب تشکیل شده‌اند. برخورد رطوبت با این آلاینده‌ها باعث عبور آن‌ها از فیلترهای کلاس F۸ و ایجاد رسوب روی پره‌ها شده

1. Air Intake
2. Bird Screen
3. Distributed Control System

که اثرات مخربی بر عملکرد توربین داشته است. در جدول ۱، نتایج آزمایشگاه خاک نشان می‌دهد تمام عناصر موجود در نمونه‌ها از نمک‌های قابل حل در آب تشکیل شده‌اند.

بروز پدیدهٔ WTE[1] هنگام بارندگی به این دلیل نام‌گذاری شده است که در این پدیده با افزایش رطوبت هوا و بارندگی، ذرات محلول در آب از روی فیلتر عبور می‌کنند و در قطرات آب و رطوبت هوا حل می‌شوند. این ذرات سپس از فیلتر می‌گذرند و وارد کمپرسور و توربین می‌شوند. در نتیجه، افت فشار فیلترها کاهش می‌یابد، به طوری که اختلاف فشار آن‌ها پس از حدود یک سال کارکرد به میزان فیلترهای نو می‌رسد. این موضوع در ترند نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان نیز قابل مشاهده است؛ جایی که افزایش رطوبت محیط (رنگ زرد) موجب کاهش چشمگیر اختلاف فشار سیستم هوای ورودی (رنگ صورتی) شده است.

جدول ۱. نتیجهٔ آنالیز خاک ورودی به توربین گاز نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان

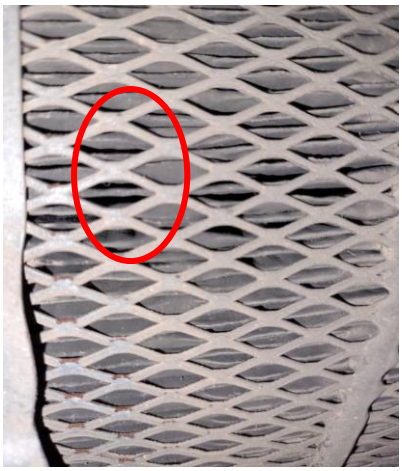
آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF				استاندارد مرجع آزمون ASME E1621-13			
ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی
SiO2	35.4	TiO2	1.52	Al2O3	13.03	MgO	7.39
CaO	31.87	K2O	0.2	Fe2O3	9.7	L.O.I	0.7
Mg=4.46%	Ti=0.91%	P&Na=0.13%	K=0.16%	Si=16.55%	Ca=22.79%	Al=6.9%	Fe=6.79%
-	-	-	-	Na2O	0.18	P2O5	0.31

شکل ۲. ترند DCS نیروگاه و افزایش رطوبت و هم‌زمان کاهش اختلاف فشار فیلترهای ورودی

بررسی‌ها نشان می‌دهد نوع آلاینده‌های موجود در محیط و تشکیل مواد خورنده می‌تواند به تخریب تدریجی کاغذ فیلتر منجر شود. این تخریب به مرور زمان، عملکرد فیلترها را مختل می‌کند و موجب کاهش کارایی آن‌ها می‌شود. به طور معمول، بر اساس مستندات ارائه‌شده توسط کارخانهٔ سازنده، دورهٔ کارکرد این فیلترها حدود ۸ هزار ساعت (تقریباً معادل دو سال) تخمین زده شده است. با این‌حال، شرایط نامطلوب محیطی و تأثیر مستقیم آلاینده‌ها باعث شده است که این دوره به حدود ۱/۵ سال کاهش یابد. کاهش طول عمر فیلترها علاوه بر افزایش هزینه‌های مربوط به تعمیر و تعویض، خطرات جدی برای عملکرد کلی سیستم ایجاد می‌کند. این موضوع می‌تواند به کاهش بازدهی، افزایش مصرف انرژی، و حتی آسیب به تجهیزات حیاتی مانند کمپرسور و توربین منجر شود؛ بنابراین، مدیریت صحیح آلاینده‌ها و برنامه‌ریزی برای تعویض به‌موقع فیلترها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شکل ۳ نمونه‌ای از یک فیلتر آسیب‌دیده به تصویر کشیده شده که نشان‌دهندهٔ تخریب مدیای آن بر اثر شرایط یادشده است. در این تصویر، محل‌هایی که مدیای فیلتر به طور کامل از بین رفته‌اند، به‌وضوح قابل مشاهده است. این تخریب ناشی از ترکیب

1. Washing Through Effect

رطوبت هوا و آلاینده‌های خورنده است که به مرور زمان موجب کاهش کیفیت و مقاومت ساختاری فیلتر می‌شود. بررسی دقیق این آسیب‌ها و اتخاذ تدابیر پیشگیرانه، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد سیستم و افزایش عمر مفید فیلترها داشته باشد.



شکل ۳. نمایی از اثرات تخریب کاغذ فیلترهای ورودی

ورود گردوخاک ناشی از بروز پدیده‌های جوی و معیوب شدن فیلترها، پیامدهای جدی برای عملکرد توربین‌های گازی دارد. این گردوخاک می‌تواند موجب بروز اثرات سایشی و خوردگی داغ در محفظهٔ احتراق شود و در نتیجه، عمر مفید این بخش‌ها را کاهش دهد. علاوه بر این، رسوب گردوغبار روی پره‌ها، مسیرهای هوای ورودی و همچنین، گرفتگی مسیرهای خنک‌کاری پره‌ها، باعث افت راندمان سیستم و حتی در برخی موارد، اختلال در عملکرد صحیح تجهیزات می‌شود. این شرایط، به‌خصوص در نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی که نیازمند کارکرد بهینه و طولانی‌مدت هستند، مشکلات جدی ایجاد می‌کند که می‌تواند هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

مطالعهٔ حاضر، با تمرکز بر نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان که به عنوان نمونه‌ای از نیروگاه‌های واقع در مناطق با شرایط آب‌وهوایی مشابه شناخته می‌شود، به بررسی جامع پدیدهٔ WTE و اثرات منفی آن روی توربین‌های گازی پرداخته است. این پژوهش با استفاده از تحلیل دقیق داده‌های عملیاتی، نتایج آزمایشگاهی و مطالعات میدانی، تلاش کرده است تا مکانیزم دقیق این پدیده و عوامل مؤثر بر شدت آن را شناسایی کند. همچنین، اثرات مخرب ناشی از ورود گردوغبار به سیستم‌های توربینی در این شرایط، به طور کامل بررسی و تحلیل شده است. نوآوری اصلی این تحقیق در ارائهٔ یک مدل جامع برای پیش‌بینی و کنترل پدیدهٔ WTE نهفته است. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های به‌دست‌آمده از سنسورهای مختلف و سیستم DCS (سیستم کنترل توزیع‌شده)، قادر به پیش‌بینی دقیق میزان وقوع پدیدهٔ گردوغبار و ارزیابی اثرات مخرب آن بر توربین‌های گازی است. مدل یادشده نه‌تنها می‌تواند شدت پدیده و تأثیرات آن بر کارکرد سیستم را تخمین بزند، بلکه با تجزیه‌وتحلیل پیش‌بینی‌های مختلف، به مهندسان و اپراتورها این امکان را می‌دهد که اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی را به‌موقع انجام دهند. به این‌ترتیب، این مدل می‌تواند ابزاری کارآمد برای مدیریت بهینهٔ نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و دیگر واحدهای تولید برق در شرایط مشابه فراهم آورد و از هزینه‌های ناشی از تعمیرات و نگهداری پیشگیری کند. این تحقیق، با تأکید بر شبیه‌سازی و مدل‌سازی دقیق، گامی مؤثر در جهت ارتقای کارایی و کاهش خسارت‌های ناشی از پدیدهٔ WTE در نیروگاه‌ها و صنایع مشابه برداشته است و می‌تواند به عنوان مرجع علمی برای پژوهش‌های آینده در این زمینه مورد استفاده قرار گیرد. مستندات ارائه‌شده توسط شرکت جنرال‌الکتریک در توربین‌های ساخت این شرکت طیف گسترده‌ای از تجهیزات تصفیهٔ هوای ورودی را با توجه به شرایط و منطقه‌ای که با ماشین‌آلات ساخت آن شرکت مطابقت دارند، ارائه کرده است. به ترتیبی که کاربران توربین گاز بتوانند نیازهای احتمالی به تصفیهٔ هوا را شناسایی کرده و گزینه‌ها را با آگاهی بیشتری بررسی کنند [۲].

همچنین، در مقاله‌ای دیگر، شرکت GE تأکید کرده است که توربین‌های گازی، به دلیل طراحی ذاتی و مصرف زیاد هوا، نسبت به کیفیت هوای ورودی بسیار حساس هستند. فیلتراسیون برای محافظت در برابر اثرات منفی هوای آلوده، مانند فرسایش،

آلودگی، خوردگی و انسداد مجاری خنک‌کننده، ضروری است؛ چرا که این عوامل می‌توانند عملکرد و عمر مفید توربین گازی را کاهش دهند. با توجه به طراحی پیچیده و فناوری پیشرفتهٔ توربین‌های مدل F۷ و F۹، اهمیت استفاده از سیستم‌های فیلتراسیون مناسب بیش از پیش افزایش یافته است. با پیشرفت مهندسی مواد و طراحی توربین‌های گازی، عملکرد و قابلیت نگهداری آن‌ها بهبود یافته است؛ اما نیاز به محافظت بیشتر از اجزای داخلی در برابر فرسایش و خوردگی همچنان وجود دارد. برای حفظ فواصل نگهداری مطلوب، باید ذرات و مایعات مضر از مسیر جریان کمپرسور و توربین حذف شوند. فناوری‌های نوین فیلتراسیون قادر به حذف اکثر آلاینده‌های طبیعی هستند، اما انتشار آلاینده‌ها از منابع محلی ممکن است غلظت آن‌ها را پس از فیلترها افزایش دهد. با برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت منابع آلاینده می‌توان تأثیر این عوامل را کاهش داد؛ در غیر این صورت، هزینه‌های سنگین تعمیر و کاهش درآمد اجتناب‌ناپذیر خواهد بود [۳].

کیفیت هوای ورودی نقش کلیدی در عملکرد و هزینه‌های نگهداری توربین گازی دارد. تحقیقات نشان می‌دهند رسوب ذرات معلق روی تیغه‌های کمپرسور باعث کاهش بازده و افزایش هزینه‌های تعمیرات می‌شود. برای مقابله با این مشکل، OEM[1]ها از فیلترهای هوای با کارایی بالا استفاده می‌کنند که عملکرد بلندمدت کمپرسور و عمر قطعات را بهبود می‌بخشند. با این‌حال، هزینهٔ زیاد این فیلترها و افت فشار ورودی، بر کارایی چرخهٔ ترکیبی تأثیر می‌گذارد. پژوهش‌ها با تحلیل هزینه‌های چرخهٔ عمر نشان داده‌اند که استفاده از فیلترهای بهینه می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌ها، نقش مؤثری در کاهش آلاینده‌ها و بهبود پایداری عملکرد ایفا کند [۴].

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند به‌کارگیری فناوری‌های نوین می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد نیروگاه‌ها داشته باشد. از جملهٔ این فناوری‌ها، مدولاسیون پره‌های راهنمای ورودی و فیلتر هوای ذرات با راندمان بالا است که در توربین‌های گازی سری F نیروگاه مورا کارانگ استفاده شده‌اند. با تنظیم زاویهٔ باز شدن پره‌ها در بار جزئی، به افزایش راندمان و کاهش تولید CO_2 کمک می‌کند و هزینه‌های اجرایی آن در مدت کوتاهی جبران می‌شود. همچنین، با حفظ کیفیت هوای ورودی به کمپرسور، از افت راندمان جلوگیری می‌کند و در بلندمدت هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند ترکیب این دو فناوری می‌تواند به بهبود راندمان، کاهش آلایندگی و افزایش پایداری عملکرد نیروگاه‌ها کمک شایانی کند [۵]. به‌روزرسانی نیروگاه‌های توربین گازی فرصت‌های جدیدی برای تعمیرات پیش‌بینی‌کننده فراهم کرده است. استفاده از ابزارهای دیجیتال برای شناسایی ناهنجاری‌ها و پیشگیری از خرابی‌ها، به بهبود برنامه‌ریزی تعمیرات کمک می‌کند. تطبیق عملکرد گذشته توربین با کیفیت هوای ورودی و شرایط جوی، پیش‌بینی دقیق‌تری از افت فشار ورودی و کاهش راندمان کمپرسور ارائه می‌دهد [۶]. این پیش‌بینی‌ها امکان برنامه‌ریزی بهینهٔ تعمیرات و کاهش هزینه‌های نگهداری را فراهم می‌کنند و به بهبود عملکرد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی منجر می‌شوند.

نگهداری صحیح و پایش وضعیت توربین‌های گازی می‌تواند به طور قابل توجهی افت عملکرد را کاهش داده و فاصلهٔ زمانی بین تعمیرات را افزایش دهد. آگاهی از ویژگی‌های عملکردی توربین‌ها و حفظ کیفیت هوای ورودی، سوخت، و روغن روانکار، به کاهش فرسایش و تخریب کمک می‌کند. همچنین، استفاده از روش‌های بهینهٔ شست‌وشوی توربین، مانند شست‌وشوی آبی، می‌تواند از افت عملکرد جلوگیری کند. این تحقیقات بر اهمیت پایش پارامترهای عملکرد توربین و به‌کارگیری تعمیرات مبتنی بر شرایط تأکید دارند [۷]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند سیستم‌های فیلتراسیون ورودی برای محافظت از توربین‌های گازی در برابر ذرات معلق و اشیای خارجی طراحی شده‌اند که کیفیت هوای احتراق را بهبود می‌بخشند و آلودگی قطعات را کاهش می‌دهند. نتایج بررسی دو مدل توربین با پیکربندی‌های مختلف و سیستم‌های فیلتراسیون دو و سه مرحله‌ای نشان می‌دهد توربین‌های دو اسپولی نسبت به توربین‌های تک‌اسپولی کمی حساس‌تر به افت فشار ورودی هستند. همچنین، در حالت توان ثابت، جریان سوخت و دمای ورودی توربین افزایش‌یافته و عمر مفید کاهش می‌یابد. سیستم فیلتراسیون سه‌مرحله‌ای به طور جزئی زودتر از سیستم دومرحله‌ای به خرابی می‌رسد، اما سیستم دومرحله‌ای به دلیل آلودگی بیشتر ناشی از فاولینگ، عملکرد ضعیف‌تری دارد [۸].

پژوهش‌ها نشان می‌دهند سیستم‌های فیلتراسیون هوای ورودی برای نیروگاه‌های توربین گازی ضروری است، زیرا کیفیت پایین هوا می‌تواند تأثیر منفی زیادی بر عملکرد توربین گازی داشته باشد. با این‌حال، افت فشار بالاتر ناشی از سیستم فیلتراسیون

1. Original Equipment Manufacturers

می‌تواند عملکرد نیروگاه را تحت‌تأثیر قرار دهد. در این مقاله، تجربهٔ میدانی از یک سیستم فیلتراسیون هوای ورودی در یک نیروگاه سیکل ترکیبی ۱۰۰ مگاواتی (نیروگاه HKW Hafen در مونیستر، آلمان) بررسی شده است. مشاهدات بلندمدت اهمیت بالای سیستم فیلتراسیون را نشان داده و عملکرد ضعیف سیستم اولیه شناسایی شده که به بازطراحی آن منجر شده است. استفاده از ابزارهای مهندسی مبتنی بر کامپیوتر در این بازطراحی مؤثر واقع شده و امکان یافتن راه‌حل‌های سفارشی برای نیروگاه با دقت زیاد را فراهم کرده است. همچنین، مشخص شده که راهنمایی‌های معمول و اطلاعات تأمین‌کنندگان برای محاسبات دقیق صرفه‌جویی هزینه‌ها کافی نیستند [۹].

پژوهش‌ها نشان داده‌اند استفاده از رطوبت‌ساز هوا در چرخه‌های توربین گازی خنک‌شده می‌تواند عملکرد نیروگاه را بهبود دهد. به‌ویژه، خنک‌سازی با تعرق هوا به عنوان یک تکنیک مؤثر برای خنک‌سازی پره‌های توربین گازی معرفی شده است. مطالعه‌ای در این زمینه نشان داد استفاده از این روش می‌تواند به میزان قابل توجهی کارایی نیروگاه و کار خاص نیروگاه را افزایش دهد، به‌ویژه در شرایط محیطی با دمای بالا و رطوبت نسبی کم. همچنین، تغییرات پارامترهای محیطی، مانند دمای ورودی توربین و نسبت فشار کمپرسور، تأثیر زیادی بر عملکرد چرخه دارد. افزایش نسبت فشار کمپرسور تا یک حد بهینه باعث افزایش نسبت کار و بهبود کارایی نیروگاه می‌شود، اما پس از آن، با افزایش بیشتر، عملکرد کاهش می‌یابد. در مجموع، این تحقیقات بر اهمیت بهینه‌سازی پارامترهای محیطی و طراحی سیستم‌های خنک‌سازی هوا برای دستیابی به عملکرد بهتر نیروگاه‌ها تأکید دارند [۱۰].

یاماموتو و همکاران [۱۱] تأثیر جریان هوای مرطوب با و بدون در نظر گرفتن رطوبت ورودی و با فرض وجود مه را در یک کمپرسور ترنسونیک توربین گاز صنعتی بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد شوک ایجادشده در گذرگاه روتور مرحلهٔ اول عامل اصلی در تبخیر هوای مرطوب است که دمای آن را کاهش می‌دهد، در حالی که رطوبت به‌شدت به رسوب قطرات آب روی سطح تیغه‌ها وابسته بود. همچنین، رسوب قطرات آب تحت تأثیر عواملی همچون اندازه و تعداد ذرات آئروسل، رطوبت و طول وتر تیغه‌ها قرار داشت. این مطالعه نشان داد رطوبت و رسوب به طور متقابل بر عملکرد توربین‌های گاز تأثیرگذارند. هو و همکاران [۱۲] به بررسی تأثیر گردوغبار بر عملکرد خنک‌سازی با مه در کانال‌های داخلی تیغه‌های توربین پرداختند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی حرکت ذرات مه و گردوغبار پس از برخورد به دیواره، اثرات گردوغبار را بر کارایی خنک‌سازی ناپایدار مه تحلیل کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد ذرات گردوغبار کوچک‌تر و با غلظت بیشتر، خنک‌سازی با مه را کاهش می‌دهند، در حالی که بارگذاری بیشتر گردوغبار موجب بهبود یکنواختی حرارتی در کانال می‌شود. ژیانگ وانگ و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای نشان دادند رسوب گردوغبار گرافیتی می‌تواند چالش‌های مهمی برای توربین‌های هلیومی در رآکتورهای گاز خنک‌شده با دمای بالا ایجاد کند. در این پژوهش، از نرم‌افزار فلوئنت به عنوان یک ابزار دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. این برنامه با بهره‌گیری از مدل فاز گسسته و مدل راه‌پیمایی تصادفی برای تحلیل مسیر ذرات (که کروی فرض شده‌اند)، به بررسی نحوهٔ رسوب‌گذاری پرداخت. در این فرایند، تعامل بین ذرات و دیواره و همچنین، بازگشت دوبارهٔ ذرات به جریان سیال در نظر گرفته شد. با توسعهٔ مدل رسوب ذره‌ای و اتصال آن به محاسبات میدان جریان تیغه‌ها با خنک‌کاری فیلمی، تحلیل‌ها از طریق توابع تعریف‌شده توسط کاربر انجام شد. پژوهشگران تأثیر مدل‌های مختلف رسوب، قطر ذرات و نسبت دمش را بر فرایند رسوب‌گذاری بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد برخورد ذرات به دیواره و معلق شدن مجدد آن‌ها، نقش قابل توجهی در نرخ و توزیع رسوب دارد. همچنین، افزایش قطر ذرات به افزایش نرخ رسوب تا یک نقطهٔ مشخص و سپس کاهش آن منجر می‌شود. تأثیر نسبت دمش پیچیده‌تر است؛ به طوری که با افزایش این نسبت، نرخ رسوب ذرات کوچک بیشتر می‌شود، اما نرخ رسوب ذرات بزرگ کاهش می‌یابد.

جهانگیری و همکاران [۱۴] در پژوهشی دریافتند که کمپرسور یکی از توربین‌های گازی یک نیروگاه تحت شرایط اضطراری متوقف شد و بررسی‌های اولیه نشان داد تقریباً تمام تیغه‌های مرحلهٔ اول و برخی از مراحل بعدی به‌شدت آسیب دیده‌اند. در این مطالعه، شکست یکی از تیغه‌های شکستهٔ مرحلهٔ اول مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد حفره‌های خوردگی موجود بر سطح تیغه‌ها ناشی از حضور عناصر کلر و گوگرد در هوای ورودی کمپرسور بوده است. موقعیت نیروگاه در نزدیکی یک

کارخانهٔ سیمان و یک پالایشگاه نفت موجب افزایش غلظت ترکیبات کلر و گوگرد در هوای ورودی شده بود. این حفره‌های خوردگی به نقاط تمرکز تنش تبدیل شدند و به عنوان عامل تسهیل‌کنندهٔ شروع و گسترش ترک‌های خستگی عمل کردند که در نهایت به شکست کامل تیغه‌ها منجر شد. عملکرد حرارتی یک واحد توربین گاز تحت شرایط جوی واقعی ارزیابی شد و تأثیر تمیزی فیلترهای هوا با استفاده از شبیه‌سازی بررسی شد. نتایج نشان داد بالاترین کارایی در دماهای معتدل و پایین‌ترین کارایی در دماهای بسیار زیاد مشاهده شد. همچنین، تعویض فیلترها در فصل پاییز موجب بهبود قابل توجهی در کارایی توربین و جریان هوای ورودی شد [۱۵]. برخی از پژوهش‌های جدید نیز جنبه‌های دیگری از آنالیز انرژی در نیروگاه‌ها را مورد تحلیل قرار داده‌اند که بررسی آن‌ها زوایای قابل توجهی از مسئله را روشن می‌سازد [۱۶ـ ۱۹].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند خصوصیات هوای ورودی به توربین‌های گازی، از جمله دما، رطوبت و آلودگی، بارها مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر این عوامل بر عملکرد و راندمان توربین تحلیل شده است. این پژوهش‌ها نقش مهمی در بهبود طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های نیروگاهی ایفا کرده‌اند. با این‌حال، تا کنون هیچ مطالعه‌ای، چه در ایران و چه در سطح بین‌المللی، به طور خاص به ترکیبات شیمیایی و فیزیکی غبار موجود در هوای محیط و تأثیر مستقیم آن‌ها بر فرسایش و تخریب قطعات توربین نپرداخته است. این موضوع به‌ویژه در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی که ذرات گردوغبار مدام در هوا معلق هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر، برای نخستین‌بار، به صورت عملی و جامع پدیدهٔ WTE را تحلیل می‌کند و به ابعاد مختلف آن می‌پردازد. این مطالعه در صدد پر کردن خلأ تحقیقاتی موجود و ارائهٔ راهکارهایی برای کاهش اثرات مخرب این پدیده در صنایع نیروگاهی است. از وجوه تمایز این تحقیق می‌توان به بررسی جامع و چندبعدی پدیده اشاره کرد که به تحلیل دقیق ترکیبات شیمیایی و فیزیکی غبار و اثرات آن بر تخریب قطعات توربین پرداخته است. قابلیت انجام تحلیل هزینه و فایده در موارد پیشنهادی نیز یکی از جنبه‌های نوآورانهٔ این مطالعه است که به بهینه‌سازی تصمیمات مدیریتی در نیروگاه‌ها منجر می‌شود. بررسی اثرات این پدیده بر هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و همچنین، کاهش راندمان نیروگاه نشان می‌دهد ورود گردوغبار نه‌تنها باعث افزایش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری می‌شود، بلکه موجب کاهش بازده کلی نیروگاه نیز خواهد شد. تحلیل جامع این اثرات می‌تواند راهگشای طراحی سیستم‌های کارآمدتر باشد.

اهداف مشخص این تحقیق عبارت‌اند از:

الف) بررسی اثرات مخرب حاصل از ورود گردوغبار ناشی از وقوع پدیدهٔ WTE

ب) مدل‌سازی وقوع پدیدهٔ WTE با استفاده از نمونهٔ واقعی نیروگاهی و تحلیل آثار آن بر یک نمونهٔ فیلتر کارتریجی، میزان رسوب گردوغبار روی پره‌ها و تأثیر آن بر گرفتگی مسیرهای خنک‌کاری

ت) پیشنهاد راهکارهای عملی برای کنترل پدیدهٔ WTE، شامل بهبود طراحی سیستم فیلتراسیون و بهینه‌سازی برنامه‌های تعمیراتی

این پژوهش، با تمرکز بر ارائهٔ راه‌حل‌های کاربردی و نوآورانه، می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگهداری، افزایش طول عمر توربین‌ها و بهبود بازده نیروگاه‌های گازی در مناطق مستعد آلودگی‌های محیطی کمک کند. همچنین، نتایج حاصل می‌تواند مبنای طراحی سیستم‌های جدید و کارآمدتر برای مقابله با چالش‌های ناشی از گردوغبار در صنعت نیروگاهی باشد.

۲. روش تحقیق

۲–۱. ارزیابی وضعیت موجود

این پژوهش بر شناسایی و کاهش اثرات ورود گردوغبار به توربین‌های گازی، به‌ویژه پدیدهٔ فرسایش ناشی از حل شدن و رسوب مواد نمکی موجود در ذرات معلق در هوا تمرکز دارد. اگرچه در مطالعات پیشین تأثیر عواملی مانند دما، رطوبت، و کیفیت کلی هوا بر عملکرد توربین بررسی شده، اما ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی ذرات گردوغبار و نقش مستقیم آن‌ها در تخریب قطعات توربین، به‌ویژه در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که چنین مناطقی به دلیل تراکم بالای ذرات معلق، خطرات جدی برای عملکرد و طول عمر توربین‌ها ایجاد می‌کنند. برای دستیابی به اهداف پژوهش، رویکرد این مطالعه بر پایهٔ جمع‌آوری داده‌های میدانی و انجام بررسی‌های تجربی است. در این راستا، نیروگاه سیکل ترکیبی به

عنوان مطالعهٔ موردی انتخاب شده و داده‌های مرتبط با سیستم فیلتراسیون، آلودگی‌های ورودی و اثرات آن بر اجزای توربین، شامل فرسایش پره‌ها، رسوب‌گذاری و گرفتگی مسیرهای خنک‌کاری، مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌ها از طریق بازدیدهای دوره‌ای، گزارش‌های تعمیر و نگهداری، و تحلیل اثرات عملیاتی گردآوری شده‌اند. هدف این پژوهش، ارائهٔ راهکارهای عملی برای بهبود سیستم‌های فیلتراسیون و کاهش آسیب‌های ناشی از گردوغبار است. این اقدامات می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگهداری، افزایش عمر مفید توربین‌ها، و بهبود بهره‌وری نیروگاه‌های گازی در مناطق مستعد آلودگی‌های محیطی منجر شود.

۲-۱-۱. اثرات مخرب ایجادشده از ورود گردوغبار ناشی از وقوع پدیدهٔ WTE

ورود گردوغبار به توربین‌های گازی یکی از چالش‌های مهم و تأثیرگذار در عملکرد و طول عمر این تجهیزات به شمار می‌رود. توربین‌های گازی به دلیل ماهیت عملکرد خود، هوای ورودی را به صورت مستقیم از محیط جذب می‌کنند و در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی، این هوا معمولاً حاوی مقادیر قابل توجهی از ذرات گردوغبار است. این ذرات هنگام ورود به محفظهٔ احتراق و برخورد با پره‌های اولیهٔ توربین و سایر اجزای داخلی، اثرات مخربی به جا می‌گذارند. از جمله اثرات مخرب این پدیده می‌توان به سایش شدید و کنده شدن پوشش محافظتی TBC[1] از سطح پره‌ها و مسیر گاز داغ ورودی به توربین اشاره کرد که در بررسی‌های انجام‌شده، کاملاً مشهود بوده است. ذرات ساینده موجود در گردوغبار، با ضربهٔ مداوم به سطح پره‌ها، موجب فرسایش و کاهش ضخامت آن‌ها می‌شوند. این سایش تدریجی باعث تخریب پوشش‌های حرارتی و حفاظتی پره‌ها می‌شود و آن‌ها را در برابر دماهای بالا و تنش‌های حرارتی آسیب‌پذیرتر می‌کند. علاوه بر این، تجمع و رسوب‌گذاری این ذرات در محفظهٔ احتراق، مسیرهای خنک‌کاری پره‌ها و همچنین، چمبرهای ورودی توربین، موجب گرفتگی مسیرهای جریان خنک‌کننده و کاهش کارایی سیستم خنک‌کاری می‌شود. در بررسی‌های آزمایشگاهی، مقایسه بین رسوبات کنده‌شده از پره‌ها و سوراخ‌های خنک‌کاری با گردوغبار موجود روی فیلترهای هوای ورودی، وقوع و اثرات مخرب این پدیده را تأیید کرده است.

در نهایت، این فرایندهای تخریبی علاوه بر کاهش راندمان و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، می‌توانند به ایجاد ترک‌ها و خوردگی‌های داغ در چمبرها و اجزای ورودی توربین منجر شوند که تأثیرات جدی و خطرناکی بر عملکرد کلی سیستم خواهند داشت. از این‌رو، بررسی دقیق، نظارت مستمر و به‌کارگیری راهکارهای مؤثر برای کاهش ورود گردوغبار و جلوگیری از سایش و تخریب اجزای حیاتی توربین، از اهمیت بالایی برخوردار است [۲۰]. این مسئله علاوه بر کاهش راندمان توربین، هزینه‌های سنگین تعمیر و نگهداری را نیز به همراه دارد. شکل ۴ نمونه‌ای از فرسایش و کنده شدن پوشش TBC از پره‌های ردیف اول توربین را نشان می‌دهد. علاوه بر فرسایش، گردوغبار می‌تواند رسوب‌گذاری را نیز در مسیرهای داخلی توربین تسریع کند. این رسوبات، مسیرهای خنک‌کاری پره‌ها را مسدود کرده و انتقال حرارت را مختل می‌کنند. نتیجهٔ این امر، افزایش دمای اجزای توربین و کاهش عمر مفید آن‌ها خواهد بود. همچنین، در صورت ورود رطوبت همراه با ذرات گردوغبار، خطر خوردگی داغ نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند موجب ایجاد ترک‌های ریز و تخریب ساختاری پره‌های ثابت و متحرک شود.

یکی از عوامل مهم بروز رسوب‌گذاری در توربین‌های گازی، ورود خاک‌های نمکین و تشکیل رسوبات آب‌نمک روی قطعات، به‌ویژه در روزهای بارانی یا مرطوب است. این مشکل بیشتر در محیط‌های ساحلی یا مناطقی که خاک آن‌ها حاوی درصد بالایی از نمک است، رخ می‌دهد. در چنین شرایطی، رطوبت هوا و بارش باران، ذرات نمکی موجود در خاک را حل کرده و به همراه جریان هوا به داخل سیستم مکش توربین وارد می‌کند. ذرات نمکی حل‌شده در آب، به دلیل خاصیت خورنده به سطوح داغ پره‌های توربین می‌چسبند و به‌سرعت تبخیر می‌شوند. این فرایند تبخیر، رسوبات سخت و کریستالی نمکی را به جا می‌گذارد که به مرور زمان ضخیم‌تر و چسبنده‌تر می‌شوند. یکی از دلایل اصلی شدت گرفتن این فرایند در روزهای بارانی، افزایش قابلیت انتقال ذرات نمک در حضور رطوبت است. در چنین شرایطی، حتی اگر سیستم فیلتر هوا عملکرد خوبی داشته باشد، ریزذرات نمکی به شکل محلول در آب از فیلتر عبور می‌کنند و به توربین می‌رسند. این رسوبات نمکی می‌توانند به طور مستقیم باعث کاهش بازدهی جریان هوا، افزایش اصطکاک و بسته شدن مسیرهای خنک‌کاری پره‌ها شوند.

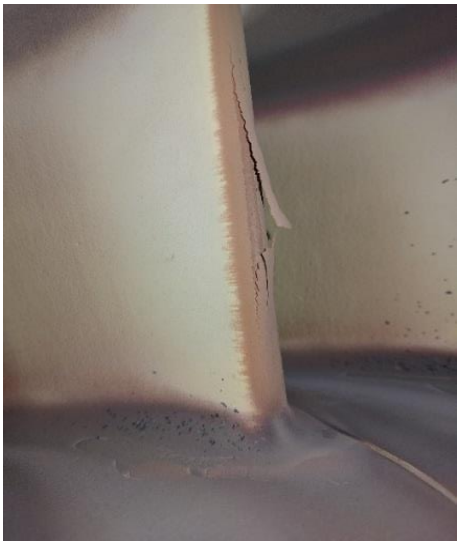
1. Thermal Barrier Coating

شکل ۴. نمایی از اثرات سایش و کنده شدن پوشش پرهٔ ردیف اول توربین

عامل دیگر، اثر دمای بالا بر واکنش‌های شیمیایی بین رسوبات نمکی و سطح فلزی پره‌هاست. در دماهای بالا، نمک می‌تواند وارد واکنش‌هایی شود که به تشکیل ترکیبات شیمیایی پایدارتر و مقاوم‌تر در برابر شست‌وشو منجر می‌شوند. این رسوبات علاوه بر اختلال در انتقال حرارت، به مرور زمان باعث فرسایش سطح پره‌ها نیز خواهند شد؛ بنابراین، ورود خاک‌های نمکین و رسوب‌گذاری آب‌نمک در شرایط بارانی یکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد توربین گازی است که به دلیل ماهیت شیمیایی و شرایط محیطی خاص، چالش‌های زیادی را برای بهره‌برداران ایجاد می‌کند. شکل ۵ نمایی از سایش در پره‌ها را به تصویر می‌کشد و به‌وضوح نشان می‌دهد وجود رسوبات مختلف روی پره‌ها، به‌ویژه گرد و غبار ورودی، عامل اصلی بروز این سایش‌ها و تخریب سطحی آن‌ها است. این رسوبات که بر اثر تماس پره‌ها با محیط بیرونی و جریان هوای آلوده وارد سیستم می‌شوند، باعث ایجاد خوردگی و سایش مکانیکی در سطح پره‌ها می‌شوند. علاوه بر این، شکل ۵ همچنین به طور دقیق رسوب‌گذاری و گرفتگی مسیرهای خنک‌کاری پره‌ها را نیز به نمایش می‌گذارد. این رسوب‌ها در مسیرهای خنک‌کاری باعث کاهش جریان هوای خنک‌کننده و افت عملکرد سیستم خنک‌سازی می‌شوند. گرفتگی این مسیرها می‌تواند به دمای بالاتر پره‌ها و افزایش خطر آسیب‌های حرارتی منجر شود. در نتیجه، این پدیده‌ها علاوه بر کاهش کارایی سیستم، موجب کاهش عمر مفید پره‌ها و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خواهند شد. همچنین، ترک‌ها و ایجاد خوردگی‌های داغ در چمبرها و ورودی توربین که تأثیرات جدی و خطرناک روی پره‌ها می‌گذارند، در نمایی از شکل ۶ به‌وضوح قابل مشاهده است. این ترک‌ها و خوردگی‌ها معمولاً بر اثر دماهای بسیار زیاد و شرایط غیرمناسب جریان گازهای داغ به وجود می‌آیند. این مشکلات می‌توانند باعث کاهش استحکام ساختاری پره‌ها شوند و در نهایت، به ایجاد خرابی‌های جدی در عملکرد توربین منجر شوند. این نوع آسیب‌ها نه تنها موجب کاهش عمر مفید پره‌ها و اجزای مرتبط می‌شود، بلکه می‌توانند به تغییرات دمایی ناخواسته در قسمت‌های مختلف سیستم نیز منتهی شوند که این امر احتمال ایجاد مشکلات پیچیده‌تری را طی زمان به دنبال خواهد داشت. بنابراین، این نوع خوردگی و ترک‌ها باید به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد و اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی اتخاذ شود.

سایش پره‌های توربین یکی از مشکلات جدی ناشی از ورود گردوغبار به داخل سیستم است. این گردوغبار، به‌خصوص ذرات سخت و ساینده مثل شن و خاک، با سرعت زیاد به سطح پره‌ها برخورد می‌کند و به‌مرور باعث خراشیدگی و ناهمواری سطح می‌شود. این موضوع باعث افت راندمان توربین و کاهش توان خروجی می‌شود. در مناطق کویری یا ساحلی، این مشکل شدیدتر است، چون ذرات نمک همراه با رطوبت روی پره‌ها می‌نشینند و با برخورد ذرات دیگر، مثل سمباده، سطح را سریع‌تر فرسوده می‌کنند. نتیجهٔ این سایش، نازک شدن پره‌ها و در موارد شدید، ترک یا حتی شکست آن‌هاست که می‌تواند باعث توقف توربین و افزایش هزینه‌های تعمیر شود. برای کاهش این مشکل، توجه به کیفیت فیلترها و بررسی منظم وضعیت پره‌ها ضروری است. شکل ۷ گواه این موضوع است. ذرات سایندهٔ گردوغبار با برخورد به پره‌های توربین، باعث سایش و کاهش ضخامت آن‌ها می‌شوند.

شکل ۵. نمایی از وجود رسوب در مسیر خنک‌کاری پره‌های متحرک توربین



شکل ۶. وجود آثار ضربه و همچنین ترک‌های ریز ایجادشده روی پرهٔ ثابت توربین

شکل ۷. سایش در پره‌های ورودی توربین گاز و کاهش ضخامت پوشش و یا حذف آن

۳. ارائهٔ راهکارهای عملیاتی

۳–۱. تغییر کلاس فیلتراسیون

در نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان، بررسی‌های انجام‌شده بر اساس مدارک مربوط به فیلترهای مورد استفاده نشان داد با تغییر کلاس فیلتراسیون از F7 به F8 می‌توان کارایی سیستم فیلتراسیون را بهبود بخشید. این تغییر باعث شد که افت فشار فیلتر سریع‌تر افزایش یابد و در نتیجه، سیستم پالس جت آنلاین با سرعت بیشتری وارد مدار شود. این عملکرد به کاهش میزان گردوغبار تجمع‌یافته روی فیلترها کمک کرد و درصد ورود گردوغبار به داخل توربین را کاهش داد. با این‌حال، وقوع پدیدهٔ رسوب‌گذاری و سایش به طور کامل قابل‌حذف نبود، زیرا اثرات تجمعی این ذرات طی زمان، به‌ویژه تا موعد اورهال یا بازدیدهای سالانه، به صورت تدریجی بروز می‌کرد. این تغییر در کلاس فیلتراسیون اگرچه مانع از ورود بخش عمده‌ای از گردوغبار می‌شد، اما همچنان تأثیرات تجمعی گردوغبار باقی می‌ماند و در درازمدت می‌توانست بر عملکرد توربین اثرگذار باشد.

۳–۲. استفاده از سیستم پالس جت آفلاین

سیستم پالس جت برای پاک‌سازی گردوغبار از روی فیلترهای کارتریجی ورودی به توربین طراحی شده است. در این روش، هوای فشرده از استپ ۱۰ کمپرسور گازی گرفته می‌شود و پس از عبور از رادیاتور ورودی، دمای آن از ۳۰۰ درجه به ۶۰ درجه

کاهش می‌یابد. این هوای خنک‌شده از طریق ۶۰۰ نازل به پشت فیلترها هدایت می‌شود. این سیستم به صورت آنلاین هنگام بهره‌برداری واحدهای گازی فعال است، اما به دلیل حجم بالای مکش هوای ورودی، کارایی قابل توجهی در حذف گردوغبار حین عملیات ندارد. به همین دلیل، در نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان یک ابتکار عملی اجرا شد؛ یک مسیر ارتباطی بین دو واحد گازی ایجاد شد تا هنگام بازدیدهای سالیانه، هوای فشرده از واحد فعال به پشت فیلترهای واحدی که از مدار خارج شده است هدایت شود. این روش امکان تمیز کردن کامل فیلترها و حذف گردوغبار انباشته‌شده را فراهم می‌کند. به‌ویژه هنگام بارندگی، که رطوبت هوا افزایش می‌یابد، این سیستم به کاهش ورود گردوغبار به توربوکمپرسور کمک می‌کند و موجب افزایش عمر و عملکرد بهتر تجهیزات می‌شود.

۳-۳. برقرار کردن سیستم آنتی آیسینگ

دمای هوای ورودی به سیستم ورودی هوا تأثیر مستقیمی بر راندمان توربین دارد. در مناطق با رطوبت کم، هرچه هوای محیط خنک‌تر باشد، راندمان توربین افزایش می‌یابد. اما در مناطق مرطوب، کاهش دما به زیر صفر درجه می‌تواند به یخ‌زدگی فیلترها منجر شود که این امر جریان هوای ورودی به کمپرسور را محدود می‌کند و باعث افت راندمان توربین می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل، از سیستم آنتی‌آیسینگ استفاده می‌شود که با هدایت هوای فشرده و داغ (حدود ۳۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد) از آخرین مرحلهٔ کمپرسور به سیستم ورودی هوا، از تشکیل یخ روی فیلترها جلوگیری می‌کند. این سیستم به طور خودکار در بازهٔ دمایی ۵+ تا ۵- درجهٔ سانتی‌گراد وارد مدار می‌شود. در نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان، با افزایش رطوبت، حتی اگر دما هنوز به بازهٔ فعال‌سازی اتوماتیک آنتی‌آیسینگ نرسیده باشد، اپراتورها ولو این سیستم را به صورت دستی درصدی باز می‌کنند. این اقدام به کاهش رطوبت ورودی و جلوگیری از تشکیل یخ و پدیدهٔ WTE کمک می‌کند و مانع از افت راندمان توربین می‌شود.

۳-۴. افزایش بازهٔ تعویض فیلترهای استاتیکی

سیستم هوای ورودی نیروگاه چندین مرحله فیلتر دارد که یکی از این مراحل، فیلترهای استاتیکی با کلاس G3 است. طبق توسعه‌های شرکت GE، این فیلترها قابلیت تعویض دارند، حتی هنگام در مدار بودن توربین. با تعویض این فیلترها قبل از شروع فصل سرد سال یا وقوع مه و افزایش رطوبت، فیلترهای جدید می‌توانند رطوبت بیشتری را جذب کنند و به این‌ترتیب، میزان رطوبت ورودی به کمپرسور کاهش می‌یابد. این اقدام باعث کاهش پدیدهٔ WTE می‌شود و به بهبود عملکرد توربین کمک می‌کند.

۳-۵. استفاده از فیلترهای کوالاسر و سیستم جداکنندهٔ قطرات[1]

با توجه به موارد مطرح‌شده، پیشنهاد شده از سیستم رطوبت‌گیر در ورودی سیستم هوا استفاده شود. در این سیستم ابتدا هوا وارد سیستم جداکنندهٔ قطرات می‌شود و ذرات آب موجود در هوا هنگام بارندگی و افزایش رطوبت گرفته می‌شود. جداکنندهٔ قطرات از صفحات فلزی تشکیل شده که با تغییر مسیر جریان هوای ورودی، باعث جدا شدن قطرات آب از هوا می‌شود. این فرایند به دلیل اینرسی حرکتی و وزن قطرات آب اتفاق می‌افتد. پس از این مرحله، یک فیلتر کوالسِر (معمولاً باکلاس G2) قرار می‌گیرد که وظیفهٔ جذب رطوبت هوا و جلوگیری از ورود آن به داخل سیستم را به عهده دارد. در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی جنوب کشور، پس از فیلترهای متالیکی قابل شست‌وشو، یک مرحلهٔ فیلتر استاتیکی با الیاف مصنوعی (کلاس G3) قرار دارد که با اختلاف فشار ۲۵ میلی‌بار تعویض می‌شود. پس از آن، فیلترهای کارتریجی باکلاس F7 نصب می‌شوند. سیستم هوای ورودی واحدهای گازی اغلب چندین ورودی دارد که بعد از نصب جداکنندهٔ قطرات، فیلتر کوالسِر نیز در مسیر جریان هوا قرار می‌گیرد. زیر این بخش، داکت تخلیه طراحی شده که رطوبت و قطرات جمع‌شده را از طریق لوله به پایین تخلیه می‌کند. جداکننده‌های قطرات به صورت ثابت نصب می‌شوند و قابل‌جدا کردن نیستند، اما فیلترهای کوالسِر که به شکل زیگزاگ روی جداکننده‌ها قرار می‌گیرند، به‌راحتی قابل جداسازی و تعویض هستند. شکل ۸ نمایی از نصب این فیلترها در نیروگاه نکا را نشان می‌دهد.

1. Droplet Separator

شکل ۸. نصب سیستم قطره‌گیر و فیلترهای کوالاسر در نیروگاه نکا

در سیستم رطوبت‌گیر با توجه به شرایط آب‌وهوایی و تمیزی نسبی هوای ورودی، نیاز به شست‌وشوی قطره‌گیرها هر سه سال یک‌بار و هنگام اورهال واحد وجود دارد. از آنجا که این بخش قابل جداسازی نیست، شست‌وشو باید با کارواش و فشار کم انجام شود تا آسیبی به آن وارد نشود. در بخش کوالسِر، تمیزکاری و شست‌وشو معمولاً پس از ۱۰ هزار ساعت کارکرد واحد انجام می‌گیرد. یکی از مزایای این سیستم این است که مش‌های کوالسر بدون نیاز به خروج واحد و هنگام کار قابل جداسازی و تمیزکاری هستند. این فرایند حدود یک روز و نیم زمان می‌برد. به طور کلی، تجربهٔ عملیاتی نیروگاه نکا نشان داده است استفاده از این نوع سیستم، پدیدهٔ WTE را به طور کامل از بین برده است. این کاهش مشکلات ناشی از رطوبت در ترندهای سیستم DCSپس از بارندگی و افزایش رطوبت نیز به‌وضوح قابل مشاهده است.

۳-۶. نصب مسیر ناودانی انتقال آب باران[1]

پیشانی سیستم ورودی هوا نیروگاه‌ها به گونه‌ای طراحی شده که هوا یا قطرات باران از یک مسیر مستقیم وارد این سیستم نشوند؛ لذا می‌توان با نصب ناودانی در زیر پیشانی‌های سیستم ایرینتک ورودی هوا میزان قطرات آب و یا رطوبت ورودی را به نرخ زیادی کاهش داد (شکل ۹).

شکل ۹. نصب مسیر ناودانی انتقال آب باران (نیروگاه شیراز)

1. Anti Rain

۴. نتیجه‌گیری

توربین‌های گازی مستقر در مناطق جنوبی کشور، به‌ویژه در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، به طور قابل توجهی تحت تأثیر شرایط محیطی خاصی همچون آلودگی هوای ورودی و تغییرات رطوبتی قرار دارند. بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان داد پدیدهٔ WTEیکی از عوامل کلیدی در کاهش عملکرد و عمر تجهیزات توربین محسوب می‌شود. در شرایط بارندگی یا افزایش رطوبت، این پدیده به عبور آلودگی‌های نمکی محلول از سیستم فیلتراسیون و رسوب‌گذاری در بخش‌های داخلی توربین منجر می‌شود. این رسوبات و آلاینده‌ها باعث فرسایش پره‌ها، کاهش ضخامت و تخریب پوشش‌های محافظ، گرفتگی مسیرهای خنک‌کاری و افزایش دمای اجزا می‌شوند. علاوه بر این، خوردگی داغ به عنوان یکی دیگر از پیامدهای این پدیده، موجب تخریب شیمیایی اجزای حساس، از جمله پره‌های ثابت و متحرک، می‌شود و در نتیجه هزینه‌های تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهد، ضمن آنکه بازده و طول عمر تجهیزات نیز کاهش می‌یابد. اجرای راهکارهای بهینه‌سازی در نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان، شامل تغییر کلاس فیلتراسیون، بازنگری در بازهٔ تعویض فیلترهای استاتیکی، استفاده از سیستم پالس جت آفلاین و به‌کارگیری سیستم آنتی‌آیسینگ، میزان وقوع این پدیده را کاهش داده است؛ هرچند هنوز به طور کامل برطرف نشده است. داده‌های ثبت‌شده در سیستم DCS پس از بارندگی و افزایش رطوبت، بهبود شرایط عملکردی را تأیید می‌کند. به طور کلی، اتخاذ راهکارهای مناسب می‌تواند اثرات مخرب آلودگی و رطوبت بر توربین‌های گازی را به طور چشمگیری کاهش دهد. بهره‌گیری از سیستم‌های رطوبت‌گیر پیشرفته، طراحی بهینهٔ سیستم فیلتراسیون و اجرای برنامه‌های منظم تعمیر و نگهداری، تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد توربین، کاهش مصرف سوخت و افزایش طول عمر تجهیزات دارد. در نهایت، توسعهٔ یک مدل جامع پیش‌بینی و کنترل پدیدهٔ WTE، مبتنی بر داده‌های عملیاتی و تحلیل‌های میدانی، می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت این چالش مورد استفاده قرار گیرد و بهره‌وری نیروگاه‌ها را در شرایط محیطی سخت به میزان قابل توجهی افزایش دهد. همچنین، انجام تحلیل هزینه و فایده در مورد راهکارهای پیشنهادی و بررسی اثرات این پدیده بر هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و کاهش راندمان نیروگاه، از جمله نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود که می‌تواند نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌های راهبردی و بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌های گازی ایفا کند.

منابع

[1] General Electric. Gas Turbine Operation Manual. General Electric Company, related to the Irintec input of the Bahban Combined Cycle Power Plant 2010.

[2] Loud RL, Slaterpryce AA. Gas Turbine Inlet Treatment. GER-3419A, GE Reference Library. 1991.

[3] Wilkes C. Power Plant Layout Planning–Gas Turbine Inlet Air Quality Considerations. New York. GE Energy. 2007.

[4] Kamboj P, Nandagopal P, Duerr M, Fahrendorf O. Inlet Air Filtration Effects on Degradation and Life Cycle Costs in Gas Turbine Combined Cycle Power Plants: A Comparative Study. InGas Turbine India Conference 2023 Dec 7 (Vol. 87721, p. V001T08A002). American Society of Mechanical Engineers.

[5] Purba O, Apriyanto AE. HEPAF and IGVM Combination Technology to Control the Industrial Gas Turbine Performance, Excess Air and CO2 Production. In2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy 2019 Oct 21 (pp. 1-6). IEEE.

[6] Marwaha G, Kohn J. Predictive maintenance of gas turbine air inlet systems for enhanced profitability as a function of environmental conditions. InAbu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2019 Nov 11 (pp. SPE-197814). SPE.

[7] Kurz R, Meher-Homji C, Brun K, Moore JJ, Gonzalez F. Gas turbine performance and maintenance. InProceedings of the 42nd Turbomachinery Symposium 2013. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories.

[8] Igie U, Minervino O. Impact of inlet filter pressure loss on single and two-spool gas turbine engines for different control modes. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2014 Sep 1;136(9):091201.

[9] Dorschel M, aus der Wiesche S. Re-Engineering of an Inlet Air Filtration System for a 100MW Combined Cycle Cogeneration Power Plant. InASME Power Conference 2011 Jan 1 (Vol. 44595, pp. 701-711).

[10] Mohapatra AK, Sanjay. Analysis of Combined Effects of Air Transpiration Cooling and Evaporative Inlet Air Cooling on the Performance Parameters of a Simple Gas Turbine Cycle. Journal of Energy Engineering. 2015 Sep 1;141(3):04014015.

[11] Yamamoto S, Araki K, Moriguchi S, Miyazawa H, Furusawa T, Yonezawa K, Umezawa S, Ohmori S, Suzuki T. Effects of wetness and humidity on transonic compressor of gas turbine. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021 Oct 1;178:121649.

[12] Hu C, Yang X, Huang Y, Feng Z. Contaminant dust effects on mist cooling in ribbed U-shaped channels of gas turbine blades. Applied Thermal Engineering. 2025 Jan 1;258:124618.

[13] Wang X, Sun Q, Yang X, Zhu Y, Jiang P, Peng W. Study of the behavior of dust particles in helium turbines considering the effects of particle deposition and resuspension. Powder Technology. 2024 Jun 20:120030.

[14] Jahangiri MR, Fallah AA, Ghiasipour A. Cement kiln dust induced corrosion fatigue damage of gas turbine compressor blades–A failure analysis. Materials & Design (1980-2015). 2014 Oct 1;62:288-95.

[15] Auda SA, Ali OM. Effect of operating conditions and air filters maintenance on the performance and efficiency of gas turbine power plant. Materials Today: Proceedings. 2023 Feb 6.

[16] Ghodrati A, Bahmanyar S, Orouji S, Zahedi R, Ahmadi A. Modeling of 1 MW Solar Power Plant in Chabahar Using RETScreen Software. 2024: 139-150.

[17] Zahedi R, Mohseni E, Sadeghitabar E, Ahmadi A, Ranjbar N, Shaghaghi A, Tahooneh M. Optimum planning of hybrid microgrid system connected to the grid using Homer software for Ahvaz city. 2023: 183-197.

[18] Zahedi R, Alipour A, Salehi Y, Seyfi S, Ahmadi M, Ahmadi A, Shaghaghi A, Zahedi A. Sustainable energy supply for medical plant growth using geothermal energy and heat pump. 2023: 67-85.

[19] Zahedi R, Gitifar A, Ahmadi A. Case study and modeling of energy consumption of buildings on an urban scale using MATLAB software. 2022: 265-282.

[20] Ogiriki EA, Li YG, Nikolaidis T, Isaiah TE, Sule G. Effect of fouling, thermal barrier coating degradation and film cooling holes blockage on gas turbine engine creep life. Procedia Cirp. 2015 Jan 1;38:228-33.