

نانوفناوری در نیروگاه‌ها: یک مرور چندوجهی برای عملکرد و پایداری بهتر

مجید میرزایی^۱، نرگس اسماعیلی^{۲*}، مریم نظری^۳

^۱ گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

^۲ دانشگاه تهران شمال، دانشکده شیمی، تهران، ایران.

^۳ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران.

چکیده: نانوفناوری با ایجاد راهکارهای پیشرفته در مقیاس نانو، فرصت‌های مهمی برای افزایش بازده، پایداری و عمر تجهیزات واحدهای نیروگاهی فراهم کرده است. این مقاله مروری، نقش نانومواد را در ارتقای زیرسامانه‌های اصلی نیروگاه بررسی می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه ادغام این فناوری می‌تواند منجر به تحول عملکردی در صنعت برق شود. در بخش احتراق، استفاده از نانوافزودنی‌ها در سوخت مازوت، فرآیند گوگردزدایی و بهسوزی را بهبود داده و کاهش قابل توجهی در انتشار آلاینده‌ها ایجاد می‌کند. در حوزه حفاظت تجهیزات، پوشش‌های نانومتری روی پره‌های توربین گازی و بخار، مقاومت در برابر خوردگی، خزش و خستگی حرارتی را افزایش داده و طول عمر آن‌ها را بالا می‌برند. همچنین، فیلترهای هوای نانوالیافی با بازده بالا در جذب ذرات ریز، از آسیب به کمپرسورها و افت کارایی جلوگیری می‌کنند. در زمینه مدیریت حرارتی، عایق‌های نوین مبتنی بر آئروژل‌های نانو ساختار با رسانایی گرمایی بسیار پایین، تلفات حرارتی در خطوط لوله و تجهیزات را کاهش می‌دهند. در بخش مدیریت آب، نانومواد با ارتقای فرآیندهای تصفیه و امکان بازیافت پساب، مصرف آب نیروگاه را به شکل معناداری کم می‌کنند. افزون بر این، استفاده از نانوکامپوزیت‌ها در هسته ژنراتورها و ترانسفورماتورها موجب کاهش تلفات هیستریزیس و گردابی و افزایش بازده تبدیل انرژی می‌شود. همچنین روانکارها و نانوسیالات حاوی نانوذرات، با کاهش اصطکاک و سایش، بهره‌وری تجهیزات دوار و برنامه‌ریزی نگهداری را بهبود می‌بخشند. در مجموع، این مرور نشان می‌دهد که کاربرد نظام‌مند نانوفناوری در نیروگاه‌ها مسیری موثر برای افزایش کارایی، قابلیت اطمینان و حرکت به سوی تولید انرژی پاک‌تر و پایدارتر است.

واژگان کلیدی: نانوفناوری، نیروگاه، بازدهی، پایداری زیست‌محیطی، نانومواد.

narges.esmaeli52@gmail.com

جلوگیری کرده و از تجهیزات حساس در برابر سایش محافظت می‌کنند [۲-۴]. همزمان، پوشش‌های نانو ساختار بر روی پره‌های توربین، سد نفوذناپذیری در برابر عوامل مخرب مانند خوردگی، اکسیداسیون و خزش در دماهای بالا ایجاد می‌نمایند و عمر عملیاتی این قطعات را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند [۵]. مدیریت بهینه انرژی حرارتی با به کارگیری عایق‌های نوینی مانند آئروژل‌ها محقق می‌شود که با رسانایی گرمایی بسیار پایین، تلفات حرارتی را در قسمت توربین و خطوط لوله به حداقل

۱- مقدمه

قابلیت مهندسی مواد در مقیاس اتمی، پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای ارائه راه‌حل‌های بنیادین در این زمینه دارد [۱]. این مقاله مروری، نقش تحول‌آفرین نانومواد را در ارتقای بخش‌های حیاتی یک نیروگاه بررسی می‌کند. در ورودی نیروگاه، فیلترهای هوای مبتنی بر نانوالیاف با کارایی فوق‌العاده، از نفوذ ذرات ریز به کمپرسورها

سیاست‌گذاری برای نیروگاه‌ها را نسبت به مرورهای صرفاً فناورانه افزایش می‌دهد.

این مرور جامع، با نگاهی یکپارچه به این کاربردهای کلیدی، در پی تبیین نقش نانوفناوری به عنوان عاملی راهبردی برای حرکت به سمت نیروگاه‌های نسل آینده، با عملکردی برتر و پیامدهای زیست‌محیطی کم‌رنگ‌تر است.

۲- سامانه‌های فیلتر هوای ورودی

سامانه‌های فیلتر هوای ورودی در نیروگاه‌های حرارتی، به‌ویژه نیروگاه‌های گازی، نقشی حیاتی در حفظ بازده عملکردی توربین و جلوگیری از سایش و خوردگی پرها دارند. ورود ذرات معلق، آئروسول‌ها، و آلاینده‌های میکرونی از طریق جریان هوای ورودی موجب ایجاد رسوب، سایش و تغییر پروفیل پرها می‌شود که در نهایت باعث افت بازده حرارتی، افزایش مصرف سوخت و هزینه‌های نگهداری می‌گردد [۱۱]. در سال‌های اخیر، استفاده از نانوفناوری در طراحی و ساخت فیلترهای هوای نیروگاهی به‌عنوان یک رویکرد نوین برای بهبود بازده فیلتراسیون و افزایش عمر مفید تجهیزات مورد توجه قرار گرفته است. فیلترهای متداول مورد استفاده در سامانه‌های ورودی نیروگاه معمولاً از الیاف سلولزی، شیشه‌ای یا پلی‌استری با ساختار میکرومتری ساخته می‌شوند. این فیلترها به‌دلیل اندازه نسبتاً بزرگ حفرات، توان محدودی در جداسازی ذرات ریزتر از ۱ میکرومتر دارند. علاوه بر آن، در شرایط کاری مناطق با گردوغبار زیاد (نظیر مناطق بیابانی)، فیلترهای سنتی سریعاً دچار گرفتگی شده و افت فشار قابل‌توجهی در جریان هوای ورودی ایجاد می‌کنند. این افت فشار می‌تواند موجب کاهش توان خروجی توربین تا چند درصد شود [۱۲]. همچنین، در فیلترهای معمولی تعادل بین بازده فیلتراسیون و افت فشار دشوار است؛ افزایش چگالی فیلتر گرچه جذب ذرات را بهبود می‌دهد، اما در عوض جریان هوا را مختل و انرژی مورد نیاز کمپرسور را افزایش می‌دهد.

۲-۱- فیلترهای نانوساختار و مکانیزم عملکرد آن‌ها

در فیلترهای نانوساختار، استفاده از نانوالیاف (عموماً از جنس پلی‌آمید، نایلون ۶، پلی‌اکریلونیتریل یا TiO_2 و SiO_2) موجب

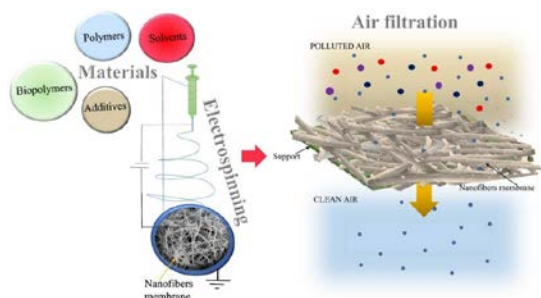
می‌رسانند [۶]. در خروجی نیروگاه نیز، فناوری‌های نانومقیاس با کارایی بالا در تصفیه پساب‌های صنعتی، امکان بازیابی و استفاده مجدد از آب را فراهم می‌سازند [۷]. یکی از چالش‌های بزرگ نیروگاه‌های حرارتی، سوخت مازوت است که نانوافزودنی‌ها با بهبود فرآیند گوگردزدایی و بهسوزی، راهکاری مؤثر برای کاهش آلاینده‌هایی مانند SO_x و ذرات معلق ارائه می‌دهند [۸]. در بخش تولید و انتقال برق، به کارگیری نانومواد در هسته ژنراتورها و ترانسفورماتورها منجر به کاهش تلفات مغناطیسی و افزایش بازده نهایی می‌شود [۹]. در نهایت، روانکارها و نانوسیالات پیشرفته با کاهش اصطکاک و سایش در تجهیزات دوار، نقش کلیدی در صرفه‌جویی انرژی و قابلیت اطمینان ایفا می‌کنند [۱۰].

ارزش افزوده اصلی این مقاله مروری نسبت به مرورهای قبلی در چند محور مشخص قابل توضیح است:

نگاه هدفمند و جامع به کل نیروگاه: برخلاف بسیاری از مرورهای گذشته که عمدتاً روی یک بخش خاص (مثلاً فقط پوشش‌های توربین یا نانوسیالات) تمرکز داشته‌اند، این مقاله به‌صورت هم‌زمان بخش‌های مختلف نیروگاه را پوشش می‌دهد. این گستره موضوعی امکان درک همزمان تأثیر فناوری‌های مختلف بر کارایی، مصرف آب، آلاینده‌گی و عمر تجهیزات را فراهم می‌کند. تمرکز بر کاربرد صنعتی و داده‌های کمی: برخلاف مرورهای صرفاً نظری یا شبیه‌سازی محور، در این مقاله بخش‌هایی مانند پوشش‌های توربین و فیلترهای نانوالیاف داده‌های کمی واقعی و نتایج نزدیک به شرایط بهره‌برداری نیروگاه ارائه شده است. این ویژگی باعث شده مقاله نه تنها جمع‌بندی ادبیات باشد، بلکه بتواند راهنمای عملیاتی برای استفاده صنعتی نیز ارائه دهد.

تحلیل ساختاریافته نقاط قوت، ضعف و محدودیت‌ها: مرورهای پیشین اغلب به ذکر فناوری‌ها و نتایج محدود می‌شدند، اما این مقاله جدول‌های مقایسه‌ای ساختاریافته با معیارهای مشخص (داده، دقت، کاربرد، هزینه، پیچیدگی و محدودیت‌ها) ارائه کرده است. این امر امکان مقایسه روشن و شفاف فناوری‌ها و تصمیم‌گیری برای کاربرد صنعتی یا پژوهشی را فراهم می‌کند.

توجه به صرفه‌جویی منابع و مسائل زیست‌محیطی: مقاله به‌طور ویژه به کاهش مصرف آب، بهینه‌سازی انرژی و کاهش آلاینده‌گی توجه کرده است. این نگاه تلفیقی، ارزش افزوده عملیاتی و

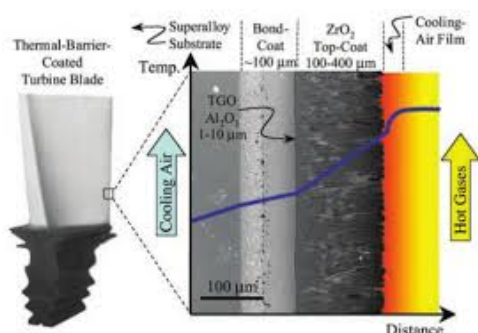


شکل ۱. نحوه عملکرد فیلتر نانوساختار [۱۴].

جدول ۱. مقایسه عملکردی فیلترهای نانویی و سنتی [۱۳-۱۵].

ویژگی	فیلترهای سنتی	فیلترهای نانوساختار
اندازه الیاف	۵-۲۰ میکرومتر	۵۰-۳۰۰ نانومتر
بازده حذف ذرات $> 1\mu m$	۴۰-۷۰٪	۹۵-۹۹٪
افت فشار اولیه (Pa)	۲۵۰-۳۵۰	۱۵۰-۲۰۰
دوام در شرایط رطوبتی	پایین تا متوسط	بالا (در صورت استفاده از نانوپوشش‌های آب‌گریز)
قابلیت خودتمیزشوندگی	ندارد	دارد (در نمونه‌های TiO_2 و SiO_2)
عمر مفید	۶-۱۲ ماه	تا ۲۴ ماه

توربین گاز شامل دو دسته‌اند (شکل ۲) [۱۷]. دسته اول، پوشش‌های ممانعتی فلزی (MCrAlY coatings)، که در آن M معمولاً نیکل یا کبالت است. این پوشش‌ها از تشکیل لایه اکسیدی محافظ Al_2O_3 حمایت می‌کنند. دسته دوم پوشش‌های سد حرارتی (TBCs) می‌باشند که متشکل از زیرلایه MCrAlY و لایه سرامیکی ($ZrO_2-Y_2O_3$) YSZ است. در ساختارهای سنتی، مشکل اصلی رشد ناپایدار لایه اکسیدی بین‌فاز (TGO) و پوسته شدن^۳ پوشش در طی چرخه‌های حرارتی است.



شکل ۲. پوشش‌های سنتی در توربین گاز نیروگاهی [۱۸].

شکل‌گیری شبکه‌ای با تداخل بالا و قطر الیاف بین ۵۰ تا ۳۰۰ نانومتر می‌شود. این شبکه نانوالیافی، به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا، قادر است ذرات معلق را از طریق مکانیزم‌های پراکندگی، گیر افتادن، و جذب الکترواستاتیکی حذف کند، بدون آنکه افت فشار قابل‌توجهی در جریان هوا ایجاد کند (شکل ۱). یکی از ویژگی‌های کلیدی این فیلترها، پوشش‌دهی چندلایه است که در آن نانوالیاف روی بسترهای میکرونی تثبیت می‌شوند تا ضمن افزایش بازده جداسازی، پایداری مکانیکی نیز حفظ گردد [۱۳]. همچنین استفاده از نانوذرات فوتوکاتالیزگری مانند TiO_2 در ساختار فیلتر باعث تخریب ترکیبات آلی فرار و خاصیت خودتمیزشوندگی در محیط‌های مرطوب می‌شود که برای نیروگاه‌های واقع در مناطق صنعتی و مرطوب بسیار مفید است. جدول ۱ مقایسه عملکردی فیلترهای نانویی و سنتی را نشان می‌دهد. این مقایسه نشان می‌دهد که فیلترهای نانویی، با حفظ دبی هوای ورودی، ذرات بسیار ریزتر را نیز حذف کرده و از آلودگی سطح پرها و افت بازده حرارتی جلوگیری می‌کنند. توسعه روش‌های الکتروروسی صنعتی در مقیاس بالا، استفاده از نانوالیاف هیبریدی و طراحی ساختارهای گرادیانی می‌تواند مسیر تجاری‌سازی گسترده این فیلترها در نیروگاه‌ها را هموار سازد.

۳- پوشش پره توربین گازی

پره‌های توربین در نیروگاه‌های حرارتی، به‌ویژه در بخش‌های فشار بالا، تحت شرایط بسیار سخت شامل دماهای بالا، خوردگی، سایش ذرات، اکسیداسیون، و شوک حرارتی قرار دارند. این عوامل موجب تخریب تدریجی سطح پرها، کاهش بازده چرخه و افزایش هزینه تعمیرات می‌شوند. در دهه اخیر، توسعه پوشش‌های نانوساختار و چندلایه توانسته است پایداری حرارتی، مقاومت به خوردگی و چسبندگی لایه‌های محافظ را به‌طور چشمگیری ارتقا دهد. پره‌های توربین گاز در معرض دمایی بین ۹۰۰ تا ۱۲۰۰°C قرار دارند و معمولاً از سوپراآلیاژهای پایه نیکل یا کبالت ساخته می‌شوند [۱۶]. مهم‌ترین مکانیزم‌های تخریب در این توربین‌ها عبارت‌اند از اکسیداسیون داغ، خوردگی سولفیدی به دلیل ناخالصی سوخت و هوای ورودی، سایش ناشی از ذرات معلق در جریان گاز داغ، شوک حرارتی ناشی از چرخه‌های روشن و خاموش و نفوذ عناصر از پوشش به زیرلایه و بالعکس. پوشش‌های سنتی در

^۱ Thermal Barrier Coatings

^۲ Thermally Grown Oxide

^۳ Spallation

۳-۱- نقش نانوفناوری در بهبود پوشش‌های توربین گاز

ورود نانوفناوری در حوزه‌ی مهندسی سطح و مواد پیشرفته، تحولی بنیادین در افزایش دوام و کارایی پوشش‌های حرارتی توربین‌های گازی ایجاد کرده است. در توربین‌های گاز، اجزایی مانند پره‌ها، محفظه احتراق و دیفیوزر در معرض دماهای بیش از 1200°C تا 1400°C و اتمسفرهای خورنده قرار دارند [۱۹]. در چنین شرایطی، پوشش‌های سد حرارتی با ساختارهای نانوساختار، نقش حیاتی در افزایش عمر خستگی حرارتی، پایداری اکسیداسیونی و کاهش نرخ تخریب ایفا می‌کنند. پیشرفت‌های نانویی به‌ویژه در طراحی و مهندسی پوشش‌هایی مانند YSZ (Yttria-Stabilized Zirconia)، $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (لانتانیم زیرکونات) و Al_2TiO_5 (آلومینیوم تیتانات) منجر به دستیابی به ترکیب‌هایی با مقاومت بالاتر در برابر شوک حرارتی، کاهش هدایت حرارتی و پایداری ساختاری در دماهای بالا شده است [۲۰]. ویژگی‌های کلیدی این پوشش‌های نانوساختار در ادامه آورده می‌شود. (۱) ریزدانه‌گی و افزایش مرز دانه‌ها که مسیر رشد ترک‌ها را منحرف و انرژی تخریب را پراکنده می‌کند. (۲) افزایش چسبندگی بین لایه‌های پوشش و زیرلایه به‌دلیل سطح ویژه‌ی بالا و بهبود تخلخل کنترل‌شده در مقیاس نانو. (۳) کاهش ضریب هدایت حرارتی تا حدود ۳۰٪ نسبت به پوشش‌های میکرونی، که موجب افت مؤثر دمای سطح زیرین فلز پایه می‌شود. (۴) قابلیت ترمیم خودبه‌خودی ترک‌های سطحی از طریق نفوذ مجدد اکسیدها یا تبلور مجدد فازهای نانوساختار در دماهای بالا.

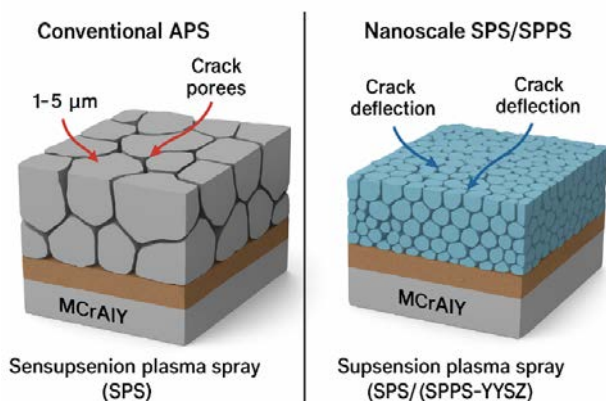
از میان فناوری‌های نوین اعمال پوشش، روش‌های SPS^1 و SPPS^2 در مقایسه با روش سنتی APS^3 ، توانسته‌اند پوشش‌هایی با ریزساختار متخلخل نانویی، چسبندگی بیشتر و مقاومت حرارتی دو برابر ایجاد کنند (شکل ۳) [۲۲]. این پوشش‌ها در آزمون‌های شوک حرارتی تا بیش از ۱۲۰۰ چرخه پایداری نشان داده‌اند که نسبت به پوشش‌های APS پیشرفت قابل‌توجهی محسوب می‌شود. همچنین، استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)

¹ Suspension Plasma Spray

² Solution Precursor Plasma Spray

³ Air plasma spray

یا اسپینل MgAl_2O_4 در لایه‌ی پیوندی (bond coat) از نوع MCrAlY ($\text{M}=\text{Ni}, \text{Co}$) باعث کاهش نرخ رشد لایه‌ی اکسیدی TGO و در نتیجه افزایش عمر سرویس پوشش تا حدود ۱/۵ تا ۲ برابر شده است. نانوساختار بودن فازهای آلومینایی موجب می‌شود نفوذ اکسیژن به لایه‌های زیرین دشوارتر گردد و تشکیل فاز $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ پایدارتر انجام شود. از دیدگاه عملکردی، پوشش‌های نانوساختار علاوه بر بهبود پایداری حرارتی، موجب کاهش نرخ مصرف سوخت و افزایش بازده کلی توربین نیز می‌شوند، زیرا اجازه می‌دهند دمای ورودی به توربین بدون آسیب به اجزای فلزی افزایش یابد. این به معنای افزایش بازده حرارتی نیروگاه تا چند درصد است که در مقیاس صنعتی، صرفه‌جویی انرژی قابل‌توجهی ایجاد می‌کند [۲۳]. در جدول ۲ مقایسه‌ای میان ویژگی‌های پوشش‌های سنتی و نانوساختار ارائه شده است. به طور خلاصه، نانوفناوری با بهینه‌سازی ساختارهای پوشش و کنترل دقیق ریزساختار در مقیاس نانو، امکان طراحی پوشش‌هایی



شکل ۳. ساختار نانو پوشش‌های نوین با روش SPS/SPPS در مقایسه با پوشش‌های سنتی با روش APS.

جدول ۲. ویژگی و پارامترهای مقایسه‌ای بین پوشش نانوساختار و پوشش‌های سنتی در پره توربین‌های گازی [۲۳].

ویژگی	پوشش نانوساختار (SPS/SPPS-YSZ)	پوشش سنتی (APS-YSZ)
اندازه دانه	۵۰-۱۵۰ nm	۱-۵ μm
هدایت حرارتی	۰/۸-۱/۲ W/m·K	۱/۵-۲ W/m·K
مقاومت در برابر شوک حرارتی	بیش از ۱۲۰۰ چرخه	۶۰۰-۵۰۰ چرخه
پایداری اکسیداسیونی (TGO)	بالا (تا ۲ برابر)	متوسط
چسبندگی لایه‌ای	بسیار بالا	متوسط

⁴ Bond coat

با عملکرد چندمنظوره را فراهم کرده است. این دستاوردها مسیر حرکت صنعت توربین گازی را به سمت نسل جدیدی از پوشش‌های هوشمند و خودترمیم‌شونده هدایت می‌کند که می‌توانند به شکل مؤثری ناترازی انرژی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری در نیروگاه‌های حرارتی را کاهش دهند.

۴- پوشش‌های پره توربین بخار

پره‌های توربین بخار معمولاً در محدوده دمایی پایین‌تر (300°C تا 650°C) کار می‌کنند، اما در معرض خوردگی مرطوب، اکسیداسیون، سایش قطرات و حملات کلریدی و سولفیدی ناشی از بخار آلوده هستند. در نواحی فشار پایین پدیده تأثیرهمزمان خوردگی و سایش به‌ویژه در پره‌های انتهایی بسیار بحرانی است و به کاهش ضخامت و شکست پره منجر می‌شود. پوشش‌های متداول شامل آلیاژهای $\text{Stellite 6 (Co-Cr-W-C)}$ ، یا پوشش‌های Cr_2O_3 و NiCrAl هستند که عمدتاً از طریق روش‌های حرارتی یا HVOF اعمال می‌شوند. مشکل این پوشش‌ها تخلخل زیاد، چسبندگی محدود، و شکنندگی بالا در شرایط شوک مکانیکی بخار است.

۴-۱- پوشش‌های نانوساختار برای توربین بخار

در توربین‌های بخار، پره‌ها و اجزای در تماس با بخار فوق‌داغ در معرض سایش قطره‌ای^۱، خوردگی بخار و اکسیداسیون در دماهای بالا قرار دارند [۲۴]. این عوامل در طول زمان موجب کاهش بازده، افت تعادل دینامیکی پره‌ها، و نهایتاً کاهش طول عمر عملیاتی واحد می‌شوند. در این میان، پوشش‌های نانوساختار به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت سطحی و پایداری طولانی‌مدت معرفی شده‌اند. پوشش‌هایی با ترکیب‌های WC-Co ، $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ، $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ و Ni-P-SiC از جمله مهم‌ترین سامانه‌های مورد استفاده در این حوزه هستند [۲۴، ۲۵]. این پوشش‌ها، که اغلب با فرآیندهای HVOF ^۳، یا الکتروپلاسه^۴ و پاشش پلاسما^۵ تولید می‌شوند، با کنترل ساختار در مقیاس نانو

^۱ Superheated Steam

^۲ Droplet Erosion

^۳ Oxy-Fuel High Velocity

^۴ Electroless Plating

^۵ Plasma Spray

(دانه‌های ۳۰ تا ۸۰ نانومتر) خواص عملکردی فوق‌العاده‌ای نسبت به پوشش‌های میکرونی سنتی ارائه می‌کنند. ویژگی‌ها و مزایای کلیدی پوشش‌های نانوساختار توربین بخار شامل موارد زیر است [۲۶، ۲۷]. (۱) افزایش چگالی و کاهش تخلخل: در پوشش‌های نانوساختار، فاصله بین ذرات بسیار کمتر است و تخلخل کلی زیر ۱٪ حفظ می‌شود؛ این امر مانع نفوذ بخار و اکسیژن به زیرلایه شده و خوردگی را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد. (۲) افزایش سختی سطحی تا حدود ۱۲-۱۴ GPa: توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده‌ی کاربیدی (Cr_3C_2 ، WC) ماتریس نیکل یا کبالت، باعث افزایش استحکام پیوند بین‌دانه‌ای و مقاومت در برابر خمش موضعی می‌شود. (۳) افزایش مقاومت در برابر سایش قطره‌ای: اندازه‌ی کوچک دانه‌ها مسیر رشد ترک را منحرف کرده و مانع از تمرکز تنش می‌شود؛ این ویژگی عمر خستگی سطح را تا بیش از دو برابر افزایش داده است. (۴) پایداری ساختاری تا دمای 650°C ترکیب نانوساختارها از تشکیل فازهای ترد مانند $\eta\text{-Co}_3\text{W}_3\text{C}$ جلوگیری می‌کند و پایداری فازی و اکسیداسیونی را در بخار فوق‌داغ تضمین می‌کند.

مقایسه عملکردی پوشش‌های سنتی و نانوساختار در پره توربین بخار در جدول ۳ و شکل ۴ خلاصه شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که استفاده از پوشش‌های نانوساختار WC-Co در پره‌های توربین بخار با شرایط واقعی نیروگاهی، باعث کاهش نرخ سایش در آزمون‌های آزمایشگاهی شبیه‌ساز شرایط بخار مرطوب تا حدود ۶۰٪ و افزایش طول عمر پره‌ها تا بیش از ۱/۸ برابر مبتنی بر آزمون‌های شتاب‌یافته و تحلیل‌های تطبیقی بوده است. در محیط‌های خورنده‌ی بخار فوق‌داغ (بیش از 650°C)، پوشش‌های $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ نانوساختار نیز مقاومت بالایی در برابر اکسیداسیون بین‌دانه‌ای نشان داده‌اند [۲۸، ۲۹].

اگرچه پوشش‌های نانوساختار عملکرد قابل‌توجهی در افزایش دوام اجزای توربین نشان داده‌اند، اما چالش‌های فناورانه متعددی همچنان باقی است [۲۹، ۳۰]، از جمله کنترل دقیق اندازه و توزیع دانه‌ها در فرآیندهای پاشش حرارتی برای جلوگیری از رشد بیش از حد دانه‌ها در ناحیه حرارتی، پایداری فازی در دماهای بالا و جلوگیری از تبدیل فازهای تقویت‌کننده به فازهای ترد، هزینه بالای تجهیزات اعمال پوشش (مانند HVOF یا SPPS) که توسعه صنعتی در مقیاس انبوه را محدود می‌کند و نبود

جدول ۳. ویژگی و پارامترهای مقایسه ای بین پوشش نانوساختار و پوشش های سنتی در پره توربین های بخار [۲۶، ۲۷].

ویژگی	پوشش های نانوساختار (WC-Co / Cr ₃ C ₂ -NiCr)	پوشش های سنتی (Stellite, Cr ₂ O ₃)
سختی (HV)	۱۲۰۰-۱۰۰۰	۸۰۰-۶۵۰
مقاومت به سایش قطره ای	بسیار بالا	متوسط
مقاومت خوردگی بخار	بالا	متوسط
تخلخل (%)	کمتر از ۱	۳-۵
چسبندگی لایه	۴۵-۵۵ MPa	۲۵ MPa
طول عمر سرویس (سال)	۶-۸	۲-۴

۵- نانوسیالات نیروگاهی

مصرف آب در نیروگاه های حرارتی از مهم ترین چالش های زیست محیطی و اقتصادی در صنعت تولید برق به شمار می آید. در یک نیروگاه بخار، بیش از ۷۰ درصد از کل مصرف آب به سامانه های خنک کننده و چگالنده اختصاص دارد [۳۲]. افزایش تقاضای انرژی، کاهش منابع آب شیرین، و الزامات محیط زیستی سبب شده است به کارگیری فناوری های نوین برای کاهش وابستگی به آب در فرایندهای خنک سازی و چگالش در اولویت سیاست گذاری های صنعت برق قرار گیرد. در این میان، فناوری نانو با ارائه موادی در مقیاس نانومتری، به ویژه در قالب نانوسیالات، فرصت های جدیدی برای بهبود انتقال حرارت، کاهش تلفات آب، و افزایش بازده سامانه های خنک کاری ایجاد کرده است. نانوسیالات، سوسپانسیون های پایداری از نانوذرات با رسانایی حرارتی بالا (مانند Al_2O_3 ، CuO ، TiO_2 ، SiO_2 و نانولوله های کربنی) در مایعات پایه نظیر آب یا مخلوط های آبی-گلیکولی هستند. این سیالات نسل جدیدی از خنک کننده ها محسوب می شوند که با تغییر خواص فیزیکی و حرارتی خود، عملکرد سامانه های حرارتی نیروگاه ها را بهبود می بخشند و در نهایت منجر به مدیریت مؤثر مصرف آب می شوند [۳۳].

۵-۱- نقش نانوسیالات در بهبود انتقال حرارت و کاهش نیاز به آب خنک کننده

در نیروگاه های حرارتی، کندانسور بخار یکی از بخش های پرمصرف آب است. هرگونه افزایش در بازده انتقال حرارت در کندانسور، مستقیماً موجب کاهش دبی آب خنک کننده مورد نیاز می شود. نانوسیالات با افزایش رسانایی حرارتی و بهبود ضریب جابجایی، این هدف را محقق می سازند. مطالعات تجربی نشان داده اند که افزودن تنها ۱/۰ تا ۵/۰ درصد حجمی از نانوذرات Al_2O_3 یا CuO به آب خنک کننده، می تواند ضریب انتقال حرارت کلی کندانسور را تا ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش دهد. این افزایش موجب کاهش دمای چگالش و افزایش بازده چرخه



شکل ۴. مقایسه ریز ساختار مقاوم به فرسایش پوشش های نوین WC-Co در مقایسه با پوشش های سنتی استلایت [۲۸].

استانداردهای ارزیابی صنعتی برای آزمون های خوردگی بخار و سایش قطره ای در شرایط مشابه نیروگاه های واقعی.

با این حال، پیش بینی می شود نسل آینده ی پوشش ها به سمت پوشش های چندلایه ی نانوساختار و پوشش های خودترمیم شونده^۱ حرکت کند. در این ساختارها، لایه های متناوب با ترکیب های مختلف (مثلاً WC-Co / Ni-P-SiC) نه تنها مقاومت مکانیکی و حرارتی را افزایش می دهند، بلکه در برابر آسیب های موضعی نیز با بازتوزیع عناصر فعال (مانند Cr, Si, B) خاصیت ترمیمی از خود نشان می دهند [۳۱]. چنین رویکردهایی می توانند در آینده نزدیک مسیر حرکت صنعت نیروگاهی را به سوی پره های هوشمند با پوشش های واکنش پذیر و پایدار تغییر دهند که در

¹ Self-Healing Coatings

ترمودینامیکی نیروگاه می‌شود. در نتیجه، با همان مقدار بار حرارتی، حجم آب در گردش کاهش یافته و مصرف کل آب نیروگاه تا حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین در سامانه‌های خنک کننده هواکه برای مناطق کم‌آب طراحی می‌شوند، استفاده از نانوسیالات به جای هوا یا آب ساده باعث افزایش ظرفیت خنک‌کنندگی در حجم پایین‌تر سیال شده و می‌تواند نیاز به آب کمکی در دوره‌های اوج گرما را کاهش دهد [۳۴].

۵-۲- کاهش تبخیر و اتلاف آب در برج‌های خنک‌کننده

برج‌های خنک‌کننده یکی از نقاط بحرانی در اتلاف آب نیروگاه‌ها هستند. حدود ۲ تا ۳٪ از کل جریان آب در برج‌ها به صورت تبخیر از بین می‌رود. نانوسیالات از طریق تغییر خواص سطحی آب، نقش مؤثری در کاهش این تبخیر دارند. افزودن نانوذراتی مانند TiO_2 و SiO_2 باعث افزایش کشش سطحی و پایداری لایه آب روی سطوح تبادل حرارت می‌شود. در نتیجه، تبخیر سطحی کاهش یافته و بخار کمتری از برج خارج می‌شود. گزارش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از نانوسیال $\text{SiO}_2/\text{water}$ در برج‌های خنک‌کننده حلقه باز، موجب کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی نرخ تبخیر و افزایش ۵ تا ۸ درصدی بازده خنک‌سازی می‌گردد. از منظر طراحی، استفاده از نانوسیالات همچنین موجب بهبود توزیع یکنواخت جریان آب روی پکینگ‌های برج می‌شود و در نتیجه، عملکرد تبخیرکننده پایدارتر و قابل کنترل‌تر می‌شود. این ویژگی به‌ویژه در نیروگاه‌های حرارتی مناطق خشک ایران می‌تواند در کاهش وابستگی به آب جبرانی نقش چشمگیری داشته باشد [۳۵-۳۷].

۵-۳- کنترل رسوب‌گذاری و افزایش طول عمر آب در گردش

یکی از عوامل پنهان در افزایش مصرف آب نیروگاه‌ها، رسوب‌گذاری و آلودگی سامانه‌های خنک‌کننده است. تجمع رسوبات در کندانسورها و لوله‌های مبدل حرارتی، علاوه بر کاهش انتقال حرارت، نیاز به تخلیه و جایگزینی آب را افزایش می‌دهد. نانوسیالات از طریق مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف

می‌توانند تشکیل رسوب را مهار کنند. نانوذراتی مانند ZnO ، MgO و Ag خاصیت ضد رسوب و ضدباکتریایی دارند. آن‌ها با تغییر بار سطحی یون‌ها و جلوگیری از چسبندگی هسته‌های رسوب به سطح فلز، مانع از شکل‌گیری لایه‌های جامد می‌شوند. مطالعات انجام‌شده در نیروگاه‌های نمونه نشان داده است که در صورت استفاده از نانوسیال CuO/water ، ضخامت لایه رسوب در لوله‌های کندانسور کمتر از حالت عادی است و در نتیجه دوره‌های تخلیه و شست‌وشو از هر دو هفته به ماهی یک‌بار افزایش یافته است. کاهش دفعات تخلیه مستقیماً باعث صرفه‌جویی در آب تازه نیروگاه می‌شود. علاوه بر آن، کاهش رسوب‌گذاری منجر به کاهش افت فشار و مصرف انرژی پمپ‌ها نیز می‌شود [۳۸، ۳۹].

۵-۴- به کارگیری نانوسیالات در بویلرها و بازیافت آب تغذیه

در بویلرها، بخشی از مصرف آب به اتلاف ناشی از تخلیه و رسوب در خطوط تغذیه مربوط می‌شود. نانوسیالات با قابلیت انتقال حرارت بالا، دمای سطح لوله‌ها را یکنواخت‌تر کرده و از نقاط داغ که محل آغاز رسوب یا خوردگی هستند، جلوگیری می‌کنند. تحقیقات اخیر نشان داده است که در صورت استفاده از نانوسیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$ در مدار پیش‌گرم‌کن بویلر، بازده جذب حرارت افزایش یافته و میزان تخلیه اضطراری آب^۱ کاهش یافته است. همچنین، حضور نانوذرات دارای خاصیت فوتوکاتالیزگری (مثل TiO_2) موجب تجزیه مواد آلی محلول و بهبود کیفیت آب تغذیه در سیکل بسته می‌شود. این اثر می‌تواند در بلندمدت به کاهش نیاز به آب تصفیه‌شده تازه و افزایش نرخ بازیافت آب منجر شود [۴۰].

۵-۵- عملکرد نانوسیالات در سامانه‌های خنک‌کننده خشک و ترکیبی

در سال‌های اخیر، نیروگاه‌های مستقر در مناطق خشک و نیمه‌خشک به سمت استفاده از سامانه‌های خنک‌کننده خشک یا ترکیبی حرکت کرده‌اند. در این سامانه‌ها، خنک‌سازی عمدتاً از

¹ Blow-off

طریق جریان هوا انجام می‌شود و تنها در شرایط بحرانی از اسپری‌های آبی یا مه‌پاش استفاده می‌شود. استفاده از نانوسیالات به عنوان واسط انتقال حرارت در این سامانه‌ها، موجب افزایش چشمگیر ظرفیت دفع حرارت در حجم محدود سیال شده است. به عنوان مثال، در مطالعات شبیه‌سازی شده، استفاده از نانوسیال CuO/water در کولرهای خشک موجب کاهش دمای کندانسور و صرفه‌جویی در آب کمکی شد. این یافته‌ها بیانگر آن است که نانوسیالات می‌توانند جایگزینی کارآمد برای آب در بخش‌هایی از سیکل خنک‌سازی باشند، بدون آنکه بازده ترمودینامیکی افت محسوسی داشته باشد [۴۱، ۴۲].

۶-۵- چالش‌ها و الزامات اجرایی در مقیاس نیروگاهی

با وجود مزایای فراوان، استفاده صنعتی از نانوسیالات در نیروگاه‌ها هنوز در مرحله نیمه‌تجربی است. مهم‌ترین چالش‌ها عبارت‌اند از [۴۳، ۴۴]:

- پایداری نانوسیال در مدارهای طولانی مدت و جلوگیری از ته‌نشینی ذرات.
- هزینه بالای تولید و نگهداری نانوسیالات در مقیاس بزرگ.
- احتمال سایش مکانیکی لوله‌ها و پمپ‌ها در صورت غلظت زیاد نانوذرات.
- نیاز به ارزیابی زیست‌محیطی و ایمنی تخلیه نانوسیالات پس از دوره مصرف.
- برای غلبه بر این چالش‌ها، راهکارهایی نظیر استفاده از نانوذرات سطح‌اصلاح‌شده، افزودنی‌های پایدارکننده زیست‌سازگار و طراحی سامانه‌های بازیافت و بازچرخانی نانوسیال در حال بررسی است. همچنین، ترکیب این فناوری با سامانه‌های کنترل هوشمند دما و جریان مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند موجب تنظیم پویا و دقیق مصرف آب در واحدهای نیروگاهی شود. نانوسیالات با ویژگی‌های حرارتی و شیمیایی متحصربه‌فرد خود، ابزاری کارآمد برای مدیریت مصرف آب در نیروگاه‌ها محسوب می‌شوند. افزایش انتقال

حرارت، کاهش تبخیر، جلوگیری از رسوب و بهبود کیفیت آب در گردش، همگی منجر به صرفه‌جویی قابل توجه در منابع آبی نیروگاه‌ها می‌شوند. بر اساس داده‌های تجربی و شبیه‌سازی، به کارگیری نانوسیالات مناسب در بخش‌های خنک‌کننده و کندانسور می‌تواند کاهش مصرف آب را در مقیاس نیروگاهی به همراه داشته باشد. با پیشرفت در سنتز نانوذرات ارزان‌قیمت، طراحی نانوسیالات هیبریدی (مانند Al_2O_3 -Cu/water) و استفاده از سامانه‌های بسته بازیافتی، انتظار می‌رود در آینده نزدیک، نانوسیالات به یکی از اجزای کلیدی در مدیریت پایدار انرژی و آب در نیروگاه‌ها تبدیل شوند. در این مسیر، حمایت‌های تحقیق و توسعه و اجرای پروژه‌های پایلوت در نیروگاه‌های کشور، می‌تواند راه را برای تجاری‌سازی این فناوری بومی هموار سازد.

۶. نانوروانکارهای نیروگاهی

در سال‌های اخیر، فشارهای زیست‌محیطی، محدودیت منابع آبی و الزامات پایداری، توجه گسترده‌ای را به سمت فناوری‌های نوین از جمله فناوری نانو جلب کرده است. یکی از رویکردهای نوین و مؤثر در این زمینه، استفاده از نانوروانکارها است که با بهبود ویژگی‌های اصطکاکی، حرارتی و ترمودینامیکی سامانه‌های نیروگاهی، می‌توانند منجر به کاهش چشمگیر مصرف آب شوند. نانوروانکارها معمولاً از افزودن نانوذرات فلزی، اکسیدی یا کربنی به روغن‌های پایه تشکیل می‌شوند و از طریق بهبود خواص انتقال حرارت، کاهش سایش و اصطکاک، افزایش پایداری حرارتی و بهبود ضریب انتقال حرارت در تماس‌های فلزی، عملکرد تجهیزات را ارتقا می‌دهند (شکل ۵). این ویژگی‌ها به‌طور غیرمستقیم یا مستقیم باعث کاهش نیاز به روانکاری مکرر، کاهش اتلاف حرارتی و در نتیجه کاهش نیاز به خنک‌کاری با آب می‌شود [۴۵، ۴۶]. در نیروگاه‌های حرارتی، آب عمدتاً در دو حوزه مصرف می‌شود؛ خنک‌سازی سامانه‌های تولید توان (کندانسورها، برج‌های خنک‌کننده، مبدل‌های حرارتی و پمپ‌ها) و روانکاری تجهیزات دوار (توربین‌ها، پمپ‌ها، یاتاقان‌ها و کمپرسورها). در سامانه‌های دوار، افزایش دمای اصطکاکی ناشی از تماس سطوح

نواحی یاتاقان‌ها) دچار تخریب حرارتی می‌شوند و خواص خود را از دست می‌دهند. نانوذرات، به‌ویژه نانوذرات اکسیدی (ZnO , CeO_2) به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌های فعال عمل کرده و از تخریب زنجیره‌های هیدروکربنی جلوگیری می‌کنند. به این ترتیب، طول عمر روانکار افزایش یافته و فواصل تعویض و نیاز به روانکاری مجدد کمتر می‌شود. این موضوع به‌طور غیرمستقیم باعث صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش ضایعات شیمیایی ناشی از تعویض روغن می‌شود [۴۹].

۶-۱- نانوروانکارها در سامانه‌های نیروگاهی

۶-۱-۱- توربین‌ها

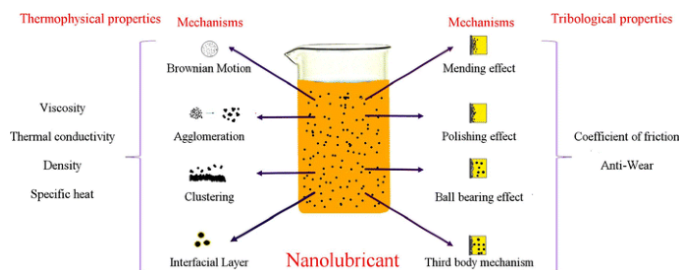
در توربین‌های بخار و گاز، یاتاقان‌ها و شافت‌ها در معرض فشار و حرارت بالا قرار دارند. نانوروانکارهای مبتنی بر گرافن و MoS_2 می‌توانند ضریب اصطکاک را نسبت به روانکارهای معدنی کاهش دهند. در مطالعه‌ای روی توربین‌های گاز با استفاده از روغن حاوی نانوذرات Al_2O_3 ، دمای خروجی سامانه روانکاری تا 12°C متر ثبت شد که باعث کاهش بار سامانه خنک‌کاری آبی گردید [۵۰، ۵۱].

۶-۱-۲- کمپرسورها و پمپ‌ها

در سامانه‌های کمپرسور هوای نیروگاهی، اتلاف انرژی اصطکاکی منجر به افزایش بار حرارتی می‌شود. نانوروانکارهای پایه پلی‌آلفا‌اولفین (PAO) حاوی نانوذرات TiO_2 و ZnO نشان داده‌اند که با کاهش اصطکاک و بهبود خنک‌کنندگی، امکان حذف بخشی از سامانه‌های خنک‌کاری آبی را فراهم می‌کنند. نتایج صنعتی گزارش شده در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نشان می‌دهد استفاده از این روانکارها تا ۱۵٪ کاهش در مصرف آب سامانه خنک‌کننده را موجب شده است [۵۲، ۵۳].

۶-۱-۳- سامانه‌های هیدرولیک و گیربکس

نانوروانکارها همچنین در روغن‌های هیدرولیک و انتقال قدرت کاربرد یافته‌اند. افزودن نانوذرات BN (نیتريد بور) و CNTs باعث افزایش ضریب رسانش حرارتی و کاهش افزایش دمای کاری در سیکل‌های طولانی شده است. در نتیجه، سامانه‌های



شکل ۵. ویژگی‌های برتر نانوروانکارها در کاربردهای نیروگاهی [۴۸].

فلزی موجب افزایش دمای روانکار و انتقال حرارت به محیط می‌شود. برای جلوگیری از تخریب روغن و سایش قطعات، معمولاً سامانه‌های خنک‌کاری آبی یا هوا-آب به کار گرفته می‌شوند. این فرآیند سهم قابل توجهی در مصرف غیرمستقیم آب دارد. هرچه روانکار بتواند انتقال حرارت مؤثرتری داشته باشد و اصطکاک کمتری ایجاد کند، نیاز به خنک‌کاری آبی کمتر می‌شود. این همان نقطه‌ای است که نانوروانکارها نقش کلیدی ایفا می‌کنند [۴۷]. افزودن نانوذرات به روانکارها چندین اثر کلیدی دارد که به‌طور مستقیم بر مصرف انرژی و آب در سامانه‌های نیروگاهی اثر می‌گذارد. این موارد شامل بهبود انتقال حرارت، کاهش اصطکاک و سایش و همچنین افزایش پایداری اکسیداسیونی و حرارتی روانکار است.

نانوذراتی نظیر SiO_2 ، TiO_2 ، CuO ، Al_2O_3 و نانوذرات کربنی مانند گرافن و نانولوله‌های کربنی (CNTs) دارای ضریب رسانش حرارتی بسیار بالاتری نسبت به روغن‌های پایه هستند. حضور این ذرات موجب افزایش ظرفیت انتقال حرارت روانکار می‌شود. در نتیجه، حرارت اصطکاکی سریع‌تر دفع شده و دمای سامانه در محدوده بهینه باقی می‌ماند، بدون آنکه نیاز به جریان بالای آب خنک‌کننده باشد [۴۹]. در مورد گزینه کاهش اصطکاک و سایش، نانوذرات با ایجاد یک لایه نازک محافظ بین سطوح تماس، از تماس مستقیم فلز با فلز جلوگیری کرده و به‌صورت مکانیکی یا شیمیایی سطح را ترمیم می‌کنند. این پدیده منجر به کاهش ضریب اصطکاک و در نتیجه کاهش تولید حرارت می‌شود. در توربین‌ها و کمپرسورهای نیروگاهی، این کاهش اصطکاک می‌تواند به میزان ۱۵-۳۰٪ کاهش حرارت اصطکاکی منجر شود که مستقیماً نیاز به خنک‌کاری را کاهش می‌دهد [۴۹].

افزودن نانوذرات به روانکارها همچنین می‌تواند باعث افزایش پایداری اکسیداسیونی و حرارتی روانکار شود. روغن‌های سنتی در دماهای بالای کاری نیروگاه (۲۰۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در

هیدرولیک کمتر به خنک کاری خارجی نیاز دارند و پایداری سیال بهبود می یابد [۵۴].

۶-۲- چالش ها و ملاحظات فنی

با وجود مزایای چشمگیر، به کارگیری نانوروانکارها در مقیاس صنعتی با چالش هایی همراه است [۵۵، ۵۶]:

- پایداری نانوذرات در محیط روغنی: تجمع یا ته نشینی نانوذرات باعث کاهش کارایی می شود و نیاز به استفاده از مواد فعال سطحی مناسب دارد.
- هزینه تولید و افزودن نانوذرات: استفاده از نانوذرات با کیفیت بالا مانند گرافن یا CNT ممکن است هزینه بر باشد
- سایش نانومقیاس: در غلظت های بالا، برخی نانوذرات می توانند خاصیت سایشی پیدا کنند
- ارزیابی زیست محیطی: در صورت نشت یا دفع نامناسب، نانوذرات ممکن است اثرات زیست محیطی نامطلوبی ایجاد کنند.

برای غلبه بر این چالش ها، تحقیقات در زمینه پوشش دهی سطحی نانوذرات، کنترل اندازه و توزیع ذرات و توسعه روانکارهای پایه زیستی در حال پیشرفت است.

با توجه به روند جهانی کاهش منابع آب و افزایش الزامات پایداری زیست محیطی، انتظار می رود نانوروانکارها نقش فزاینده ای در سامانه های نیروگاهی ایفا کنند. ترکیب نانوروانکارها با سامانه های هوشمند مانیتورینگ نیز افق جدیدی را در مدیریت هم زمان مصرف انرژی و آب می گشاید. برای مثال، استفاده از حسگرهای نانو در سامانه های روانکاری می تواند تغییرات دما، ویسکوزیته و غلظت نانوذرات را به صورت بلادرنگ پایش کند و مصرف آب خنک کننده را به صورت تطبیقی تنظیم نماید. به طور خلاصه، نانوروانکارها نه تنها عملکرد مکانیکی و حرارتی تجهیزات نیروگاهی را بهبود می دهند، بلکه به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت مصرف آب و افزایش بهره وری کل سامانه مطرح هستند. توسعه این فناوری در کنار سیاست های مدیریتی هوشمند، می تواند گامی اساسی در جهت تحقق نیروگاه های کم آب در آینده نزدیک باشد.

۷- نانوافزودنی برای گوگردزدایی و بهسوزی سوخت مازوت نیروگاه

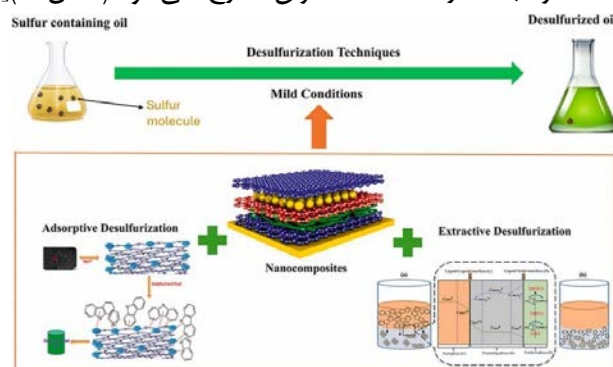
سوخت مازوت (HFO) یکی از مهم ترین سوخت های مورد استفاده در نیروگاه های حرارتی ایران و بسیاری از کشورهای در حال توسعه است. با وجود مزیت اقتصادی آن، استفاده گسترده از مازوت به دلیل میزان بالای گوگرد، فلزات سنگین و ترکیبات آروماتیک، چالش های زیست محیطی و عملیاتی متعددی ایجاد کرده است. احتراق ناقص و تشکیل ترکیبات اکسید گوگرد مانند SO_2 و SO_3 از مهم ترین منابع آلودگی هوا در نیروگاه های مازوت سوز به شمار می روند. در دهه اخیر، فناوری نانو با ورود به حوزه سوخت و احتراق، چشم انداز جدیدی برای بهبود کیفیت احتراق، افزایش بازده حرارتی و کاهش انتشار آلاینده ها گشوده است. یکی از مسیرهای کلیدی، استفاده از نانوافزودنی های سوختی است که در مقیاس نانو به عنوان کاتالیزگر درون سوختی عمل کرده و فرآیندهای اکسیداسیون، تبخیر و شکستن ترکیبات گوگردی را تسهیل می کنند. به ویژه در نیروگاه هایی که به علت محدودیت منابع گاز طبیعی، به مصرف مازوت با درصد گوگرد بالا (۲-۴٪ وزنی) ناچارند، به کارگیری نانوافزودنی های سوختی می تواند یک راهکار فنی و اقتصادی برای گوگردزدایی جزئی، افزایش بازده احتراق و کاهش مصرف آب در فرآیند شست و شوی دود یا خنک کاری باشد [۵۷، ۵۸].

مازوت دارای ترکیبات سنگین با وزن مولکولی بالا و پایداری شیمیایی زیاد است. وجود ترکیبات آلی گوگردی (مانند تیوفن ها، سولفیدها و دی سولفیدها) موجب می شود که گوگرد در طی احتراق به طور کامل به گاز SO_2 تبدیل شده و پس از تماس با بخار آب در گازهای خروجی، به H_2SO_4 تبدیل گردد. این فرآیند منجر به خوردگی شدید بویلرها و پره های توربین، افزایش نیاز به شست و شوی مرطوب گاز دودکش (که مصرف آب را بالا می برد)، افزایش ذرات معلق سولفات دار در هوا و افت بازده حرارتی احتراق می شود [۵۸]. بنابراین، کاهش گوگرد از سوخت پیش از احتراق یا در حین احتراق، یکی از محورهای کلیدی مدیریت زیست محیطی نیروگاه ها است. فناوری نانو از طریق اصلاح شیمی درون سوخت، راهکاری نوآورانه برای این معضل فراهم کرده است [۵۸].

¹ Heavy Fuel Oil

۷-۱- اصول عملکرد نانوافزودنی‌های سوختی

نانوافزودنی‌های سوختی ذراتی با ابعاد معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که به مقدار بسیار کم (معمولاً ۱۰-۱۰۰ ppm) به سوخت اضافه می‌شوند. این نانوذرات با دارا بودن سطح ویژه بالا و انرژی سطحی زیاد، به عنوان مراکز فعال برای واکنش‌های شیمیایی عمل می‌کنند. سازوکار عملکرد این نانوافزودنی‌ها در گوگردزدایی مازوت را می‌توان در سه مسیر اصلی خلاصه کرد [۵۹]. اولین مورد اکسیداسیون کاتالیزگری گوگرد آلی است. نانوذرات اکسیدی مانند CeO_2 ، TiO_2 ، ZnO ، Fe_2O_3 و MnO_2 باعث تسریع در اکسیداسیون ترکیبات آلی گوگرد به سولفون‌ها یا سولفات‌ها در دمای پایین‌تر می‌شوند. این فرآیند موجب تسهیل حذف گوگرد در مرحله گاز دودکش یا پیش از احتراق می‌گردد [۶۰، ۶۱]. عملکرد بعدی مربوط به بهبود احتراق از طریق افزایش انتقال حرارت است. نانوذرات با رسانش حرارتی بالا (مانند Al_2O_3 یا CuO) موجب افزایش دمای محلی شعله و احتراق کامل‌تر هیدروکربن‌ها می‌شوند. نتیجه، کاهش تشکیل دوده، گوگرد احیاشده (H_2S) و افزایش بازده حرارتی است [۶۱]. همچنین نانوذرات باعث جذب گوگرد و ترکیبات سنگین می‌شوند. برخی نانوذرات مانند MgO ، CaO و ZnO توانایی جذب فیزیکی یا شیمیایی ترکیبات سولفیدی را دارند و به‌صورت خاکستر جامد از محفظه احتراق خارج می‌شوند (شکل ۶) [۶۲].



شکل ۶ روش سولفوردایی با به کارگیری نانومواد کربنی [۶۳].

۷-۲- انواع نانوافزودنی‌های مؤثر در گوگردزدایی مازوت

۷-۲-۱- نانوذرات اکسید فلزی

نانوذرات CeO_2 ، Fe_2O_3 ، TiO_2 و MnO_2 از مهم‌ترین کاتالیزگرهای سوختی هستند که توانایی بالایی در اکسیداسیون ترکیبات گوگردی دارند [۶۰، ۶۴]. به عنوان مثال CeO_2 به‌عنوان "ذره اکسیژن‌دار" عمل کرده و بین $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ نوسان می‌کند. این ویژگی موجب آزادسازی اکسیژن فعال و تسریع اکسیداسیون گوگرد می‌شود. همچنین Fe_2O_3 و MnO_2 نیز با خاصیت انتقال الکترون، واکنش‌های رادیکالی را تسریع کرده و احتراق کامل‌تر گوگرد آلی را ممکن می‌سازند. در مطالعات انجام‌شده بر روی مازوت نیروگاهی، افزودن نانو CeO_2 باعث کاهش انتشار SO_2 و افزایش بازده حرارتی شده است.

۷-۲-۲- نانوذرات ترکیبی (کامپوزیتی)

ترکیب چند نانوذره (مثلاً $\text{CeO}_2\text{-ZnO}$ یا $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$) موجب هم‌افزایی بین خواص کاتالیزگری و جذب سطحی می‌شود. این نوع افزودنی‌ها علاوه بر گوگردزدایی، باعث کاهش دوده و CO نیز می‌شوند. استفاده از نانوکامپوزیت‌ها در مقیاس نیمه‌صنعتی در بویلرهای مازوت‌سوز نشان داده که میزان رسوب‌گذاری کمتر شده و نیاز به شست‌وشوی آبی لوله‌های بویلر تا نصف کاهش یافته است [۶۰، ۶۵].

۷-۲-۳- نانوافزودنی‌های کربنی

نانوگرافن، نانولوله‌های کربنی و نانوساختارهای کربنی عامل‌دار به‌عنوان بهبوددهنده شعله و افزایش‌دهنده دمای احتراق عمل می‌کنند. حضور آنها موجب شکست زودتر مولکول‌های سنگین و کاهش بخش نامحلول در مازوت می‌شود. علاوه بر این، CNT‌ها به عنوان ناقل حرارت درون سوخت، توزیع یکنواخت دما را در شعله فراهم کرده و از احتراق موضعی ناقص جلوگیری می‌کنند [۶۶، ۶۷].

۷-۳- اثرات عملی در نیروگاه‌ها

کاربرد نانوافزودنی‌های سوختی در نیروگاه‌های حرارتی منجر به چندین بهبود هم‌زمان می‌شود که در جدول ۴ آمده است. با وجود مزایای گسترده، استفاده از نانوافزودنی‌های سوختی با ملاحظات فنی خاصی همراه است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

جدول ۴. تاثیر نانوافزودنی های سوخت مازوت بر بهره‌وری، مدیریت مصرف آب و اثر عملکردی [۶۸، ۶۹].

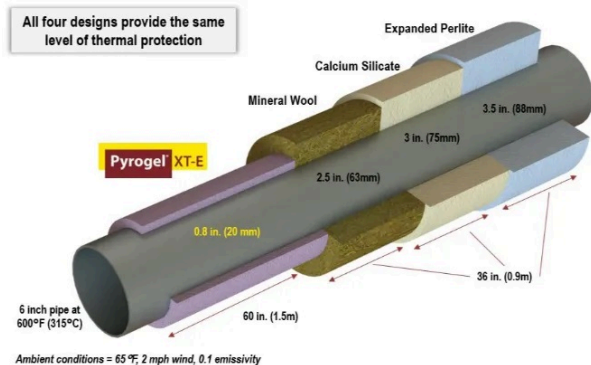
ارتباط با مدیریت مصرف آب	تأثیر بر بهره‌وری نیروگاه	اثر عملکردی
کاهش مصرف آب برج	کاهش نیاز به شست‌وشوی	کاهش تولید SO ₂ و شست‌وشو
کاهش تولید بخار اضافی	افزایش بازده حرارتی،	ذرات سولفات احتراق کامل‌تر
برای پیش‌گرمایش	کاهش مصرف سوخت	مازوت
کاهش آب مصرفی در	کاهش نیاز به شست‌وشوی	کاهش تشکیل
نگهداری	بویلر با آب	رسوبات و دوده
کاهش بار خنک‌کاری در	پایداری بهتر دمای کاری	افزایش رسانش
سامانه‌های جانبی		حرارتی شعله

(۱) پایداری در محیط سوخت سنگین: مازوت دارای ویسکوزیته بالا و ترکیبات آروماتیک است که پخش یکنواخت نانوذرات را دشوار می‌کند؛ نیاز به مواد فعال سطحی سازگار و روش‌های التراسونیک دارد. (۲) تشکیل خاکستر نانویی: بخشی از نانوذرات ممکن است به‌صورت جامد در خاکستر باقی بماند و نیاز به فیلتراسیون مناسب در گاز دودکش دارد. (۳) هزینه تولید صنعتی نانوکاتالیزورها: مقیاس تولید اقتصادی برای کاربرد گسترده در نیروگاه‌ها هنوز در حال توسعه است. (۴) ارزیابی اثرات زیست‌محیطی: باید اثر تجمع نانوذرات در پسماند یا آب شست‌وشوی دود بررسی شود تا از آلودگی ثانویه جلوگیری شود.

به دلیل ویسکوزیته بالا و ترکیبات آروماتیک سنگین مازوت، پایداری نانوافزودنی‌ها بدون اصلاح روش آماده‌سازی امکان‌پذیر نیست. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مواد فعال سطحی غیر یونی و آمفوتریک سازگار با سوخت‌های سنگین موجب افزایش پایداری کلوئیدی نانوذرات اکسیدی (مانند CeO₂ و Fe₂O₃) و کاهش تجمع و ته‌نشینی در بازه‌های زمانی ذخیره‌سازی می‌شود [۷۰-۷۶]. پیش‌پخش نانوافزودنی در یک حامل سبک‌تر (مانند گازوئیل) و سپس اختلاط مرحله‌ای با مازوت، یکی از روش‌های صنعتی توصیه‌شده برای افزایش یکنواختی توزیع ذرات است. اعمال هم‌زدن مکانیکی پیوسته یا امواج التراسونیک در مخازن روزانه سوخت، پایداری نانوافزودنی‌ها را تا چندین روز بدون ته‌نشینی محسوس حفظ می‌کند. مطالعات پایلوت و نیمه‌صنعتی در بویلرهای سوخت سنگین نشان می‌دهند

که افزودن نانو CeO₂ و Fe₂O₃ در غلظت‌های ۱۰-۱۰۰ ppm باعث کاهش معنی‌دار انتشار SO₂ و دوده شده و در عین حال رسوب‌گذاری روی نازل‌ها و لوله‌های بویلر افزایش نیافته است [۷۰-۷۶]. استفاده از نانوکامپوزیت‌های اکسیدی مانند CeO₂-ZnO موجب کاهش نرخ تشکیل دوده و در نتیجه کاهش دفعات شست‌وشوی آبی بویلر تا حدود ۴۰-۵۰٪ شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط عملیاتی کنترل‌شده، نانوافزودنی‌ها نه تنها مشکل‌زا نیستند، بلکه بار نگهداری سامانه را نیز کاهش می‌دهند. یکی از نگرانی‌های اصلی، سایش نازل‌ها، پمپ‌ها و پره‌های پایین‌دست است. مطالعات بلندمدت گزارش کرده‌اند که در غلظت‌های پایین، نانوافزودنی‌های اکسیدی رفتاری شبه کاتالیزگری داشته و به‌صورت ذوب‌شونده یا همراه خاکستر خارج می‌شوند و اثر سایشی قابل‌توجهی ایجاد نمی‌کنند. کاهش دوده و احتراق کامل‌تر، در بسیاری موارد موجب کاهش خوردگی و سایش کلی تجهیزات نسبت به حالت بدون افزودنی شده است. با به‌کارگیری فیلترهای الکترواستاتیک و بگ‌فیلترهای اصلاح‌شده، ذرات جامد نانویی در گاز دودکش به‌طور مؤثر جمع‌آوری می‌شوند [۷۰-۷۶].

پیشرفت‌های اخیر در حوزه نانوکاتالیزگرهای زیستی و هوشمند امکان تولید افزودنی‌هایی را فراهم کرده‌اند که هم خاصیت گوگردزدایی دارند و هم قابل تجزیه زیستی هستند. از سوی دیگر، ترکیب نانوافزودنی‌ها با فناوری سوخت-هوش مصنوعی می‌تواند فرآیند تزریق افزودنی و شرایط احتراق را به‌صورت بلادرنگ تنظیم کند تا بیشترین بازده و کمترین انتشار حاصل شود. در آینده نزدیک، با توسعه نانوافزودنی‌های ترکیبی چندکاره، می‌توان انتظار داشت نیروگاه‌های مازوت‌سوز نه تنها از نظر زیست‌محیطی پاک‌تر شوند، بلکه به‌واسطه کاهش مصرف آب در سامانه‌های تصفیه گاز و شست‌وشوی تجهیزات، به سمت نیروگاه‌های کم‌مصرف و پایدار حرکت کنند. به طور خلاصه، به‌کارگیری نانوافزودنی‌های سوختی در نیروگاه‌های مازوت‌سوز راهکاری مؤثر برای کاهش انتشار گوگرد، افزایش بازده احتراق و مدیریت مصرف آب است. این فناوری با مکانیزم‌های متنوعی از



شکل ۷. مقایسه مقاومت عایق‌های حرارتی آنروژل با دیگر عایق‌های سنتی نیروگاهی با ضخامت‌های متفاوت [۸۱].

رسانش می‌شود. به بیان دیگر، آنروژل‌ها ترکیبی از تخلخل نانومقیاس و پراکندگی مسیر انتقال حرارت را فراهم می‌کنند. در مقایسه با عایق‌های متداول، رسانایی حرارتی آنروژل‌ها تا پنج برابر کمتر است. برای مثال، در دمای حدود 300°C ، رسانایی حرارتی پشم‌سنگ حدود $0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ است، در حالی که آنروژل سیلیکا در همان شرایط حدود $0.02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ رسانایی دارد. افزون بر این، آنروژل‌ها به دلیل وزن بسیار کم (حدود g/cm^3) $0.3 - 0.1$ بار مکانیکی بسیار اندکی به لوله‌ها و سازه‌ها وارد می‌کنند که از دیدگاه طراحی صنعتی نیروگاه، مزیت قابل توجهی محسوب می‌شود [۸۲].

در نیروگاه‌های حرارتی، خطوط لوله‌ای که حامل بخار فوق داغ، آب تغذیه یا سوخت سنگین مانند مازوت هستند، دمایی بین 150 تا 550 درجه سانتی‌گراد دارند. در این شرایط، عایق‌کاری مؤثر می‌تواند از افت حرارت تا بیش از 30% جلوگیری کند. استفاده از پوشش‌های نانوساختار آنروژلی بر روی این خطوط، به‌ویژه در نقاطی که دسترسی دشوار است یا عایق سنتی امکان نصب ندارد، عملکرد چشمگیری نشان داده است. مطالعات صنعتی نشان می‌دهد که در خطوط بخار با طول بیش از 2 کیلومتر در نیروگاه‌های بخاری، جایگزینی عایق‌های سنتی با پوشش آنروژلی می‌تواند صرفه‌جویی حرارتی معادل 2 تا 4 درصد کل بازده نیروگاه ایجاد کند. این مقدار به‌ظاهر اندک، در مقیاس نیروگاه‌های 500 مگاواتی به معنای کاهش چند هزار تن مصرف مازوت یا گاز طبیعی در سال است. علاوه بر خطوط بخار، آنروژل‌ها در عایق‌کاری خطوط انتقال سوخت مازوت و گازوئیل نیز کاربرد دارند. در این سامانه‌ها، هدف جلوگیری از افت دمای سوخت و افزایش ویسکوزیته آن است، زیرا افت دما می‌تواند

جمله اکسیداسیون کاتالیزگری، جذب سطحی ترکیبات گوگردی و بهبود انتقال حرارت شعله، قادر است گوگرد موجود در سوخت را به ترکیبات کم‌ضررتر تبدیل کرده و نیاز به شست‌وشوی مرطوب و فرآیندهای پرمصرف آبی را کاهش دهد. در مجموع، توسعه نانوافزودنی‌های سوختی به‌ویژه بر پایه TiO_2 ، CeO_2 و نانوگرافن، می‌تواند به‌عنوان رویکردی نانوفناورانه برای نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت سنگین مورد توجه سیاست‌گذاران و طراحان صنعتی قرار گیرد [۷۸، ۷۷، ۵۸].

۸- عایق‌های نانوساختار آنروژل برای مصارف نیروگاهی

در نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی، بخش قابل توجهی از تلفات حرارتی ناشی از انتقال گرما در خطوط لوله‌ای بخار، آب تغذیه، سوخت و گازهای داغ است. این تلفات نه تنها بازده حرارتی نیروگاه را کاهش می‌دهد، بلکه موجب افزایش مصرف سوخت، افزایش آلاینده‌ها و کاهش عمر تجهیزات نیز می‌شود. از این رو، انتخاب و به‌کارگیری مواد عایق با کارایی بالا یکی از عوامل کلیدی در ارتقای بهره‌وری انرژی محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، آنروژل‌های نانوساختار به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مواد عایق حرارتی، جایگزینی کارآمد برای عایق‌های سنتی مانند پشم‌سنگ، فایبرگلاس و سیلیکاژل متراکم معرفی شده‌اند (شکل ۷). آنروژل‌ها موادی سبک، متخلخل و دارای ساختار نانومقیاس هستند که به‌طور معمول از سیلیکا، آلومینا، یا کربن ساخته می‌شوند. ویژگی‌های منحصر به فردی همچون رسانایی حرارتی فوق‌العاده پایین (0.1 تا $0.025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)، پایداری حرارتی بالا (تا حدود 600 درجه سانتی‌گراد) و مقاومت در برابر رطوبت و خوردگی، آن‌ها را برای استفاده در محیط‌های صنعتی خشن، به‌ویژه نیروگاه‌ها، بسیار مناسب ساخته است [۷۹، ۸۰].

۸-۱- اصول عملکرد و ساختار نانویی آنروژل‌ها

آنروژل‌های سیلیکا دارای ساختاری با تخلخل بیش از 90% هستند که شبکه‌ای از نانوذرات به قطر 10 تا 50 نانومتر را در بر می‌گیرد. این ساختار منحصر به فرد موجب به دام افتادن هوا در مقیاس نانو و در نتیجه کاهش انتقال گرما از طریق همرفت و

منجر به انسداد در مسیر سوخت‌رسانی شود. عایق‌های آئروژلی با ضخامت تنها چند میلی‌متر قادرند همان بازده حرارتی عایق‌های سنتی با ضخامت چند سانتی‌متر را فراهم کنند، که در طراحی فشرده سامانه‌های نیروگاهی اهمیت بالایی دارد [۸۲].

در مقایسه با عایق‌های مرسوم مانند پشم‌سنگ و فوم‌های پلیمری، آئروژل‌ها مزایای متعددی دارند. این مزایا را می‌توان در پنج مورد زیر دسته‌بندی کرد. (۱) کاهش وزن و حجم عایق: وزن کمتر به‌ویژه در لوله‌های مرتفع و سقفی باعث کاهش فشار مکانیکی بر سازه‌ها می‌شود. (۲) مقاومت حرارتی گسترده: آئروژل‌های سیلیکا تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و آئروژل‌های کربنی تا ۸۰۰ سانتی‌گراد پایداری دارند. (۳) پایداری در محیط‌های مرطوب: در صورت هیدروفوب شدن سطح آئروژل، جذب رطوبت تقریباً صفر است، در حالی‌که پشم‌سنگ در معرض بخار آب عملکرد خود را از دست می‌دهد. (۴) دوام و عمر بیشتر: آئروژل‌ها در برابر شوک حرارتی، خوردگی سطحی و فشردگی مکانیکی مقاوم‌ترند. (۵) عایق ترکیبی چندلایه: قابلیت ترکیب آئروژل با الیاف معدنی یا پارچه‌های فایبرگلاس برای ساخت پوشش‌های چندلایه با مقاومت مکانیکی بالا وجود دارد.

۸-۲- چالش‌ها و مسیرهای آینده

با وجود مزایای چشمگیر، چالش‌هایی نیز در مسیر کاربرد گسترده آئروژل‌ها در نیروگاه‌ها وجود دارد. مهم‌ترین چالش، هزینه‌ی نسبتاً بالای تولید و فرآوری است که ناشی از فرآیند خشک‌سازی فوق‌بحرانی یا سل-ژل پیچیده است. با این حال، تحقیقات اخیر در زمینه آئروژل‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با نانوذرات سیلیکا، گرافن یا تیتانیا توانسته‌اند این هزینه را کاهش داده و مقاومت مکانیکی را افزایش دهند. از سوی دیگر، تلاش‌هایی برای توسعه آئروژل‌های انعطاف‌پذیر و مقاوم به شوک مکانیکی صورت گرفته است تا در شرایط ارتعاشی و نوسانات فشار خطوط نیروگاهی، پایداری بلندمدت حفظ شود.

آئروژل‌های سیلیکا به دلیل تخلخل بسیار بالا، دانسیته کم و پیوندهای ضعیف Si-O-Si در شبکه نانوبی، ذاتاً رفتاری شکننده دارند و در برابر ارتعاشات مکانیکی، ضربه و سیکل‌های انبساط-انقباض حرارتی آسیب‌پذیر هستند. در محیط نیروگاهی،

منابع ارتعاش شامل ارتعاشات توربوماشینری، نوسانات فشار بخار، و شوک‌های حرارتی راه‌اندازی/خاموشی می‌توانند منجر به ریزترک، خردشدگی موضعی و افت عملکرد عایقی آئروژل خالص شوند [۸۳-۸۸]. آئروژل‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف ترکیب آئروژل سیلیکا با الیاف شیشه، آرامید یا سرامیکی، مقاومت خمشی و ضربه‌ای را تا یک مرتبه بزرگی افزایش داده و شکنندگی را به‌طور مؤثر کاهش می‌دهد. پتوهای آئروژلی در کاربردهای نیروگاهی، آئروژل تقریباً همیشه به‌صورت پتوهای انعطاف‌پذیر چندلایه استفاده می‌شود، نه به‌صورت مونولیت خالص. این ساختارها در آزمون‌های ارتعاشی صنعتی مانند ASTM C165 و ASTM E84 عملکرد پایدار نشان داده‌اند. آئروژل‌های هیبرید آلی-معدنی اصلاح شبکه سیلیکا با پلیمرهایی مانند PDMS یا PU باعث افزایش کرنش شکست و تحمل ارتعاش می‌شود. هزینه بالای آئروژل‌های سیلیکا عمدتاً ناشی از فرآیند سل-ژل چندمرحله‌ای، و به‌ویژه خشک‌سازی فوق‌بحرانی است که انرژی بر و سرمایه‌بر محسوب می‌شود. راهکارهای کاهش هزینه (با شواهد صنعتی) [۸۳-۸۸] شامل موارد زیر است. (۱) خشک‌سازی در فشار محیط (APD) توسعه روش‌های APD همراه با اصلاح شیمی سطح (هیدروفوب‌سازی) باعث کاهش چشمگیر هزینه تولید بدون افت معنی‌دار عملکرد حرارتی شده است. (۲) آئروژل‌های کامپوزیتی کم‌چگالی ترکیب آئروژل با الیاف معدنی نه‌تنها استحکام را افزایش می‌دهد، بلکه مصرف ماده آئروژلی خالص را کاهش داده و هزینه نهایی را پایین می‌آورد.

تحلیل چرخه عمر و هزینه کل مالکیت مطالعات اقتصادی نشان داده‌اند که اگرچه هزینه اولیه آئروژل ۲-۴ برابر عایق‌های سنتی است، اما به دلیل کاهش ضخامت، کاهش تلفات حرارتی و کاهش هزینه نگهداری بازگشت سرمایه در کاربردهای نیروگاهی معمولاً کمتر از ۱۸-۲۴ ماه است [۸۳-۸۸]. همچنین استفاده از فناوری‌های نوین مانند پوشش‌دهی اسپری نانوائروژل به جای عایق‌کاری سنتی، مسیر جدیدی در تعمیرات سریع خطوط داغ ایجاد کرده است. به طور خلاصه عایق‌های نانوساختار آئروژلی با برخورداری از رسانایی حرارتی بسیار پایین، مقاومت عالی در برابر شرایط سخت نیروگاهی و وزن کم، یکی از امیدبخش‌ترین فناوری‌های نوین برای کاهش تلفات حرارتی در خطوط لوله

¹ Ambient Pressure Drying

کاربرد نانومواد در تصفیه پساب نیروگاهی را می‌توان در سه حوزه‌ی اصلی طبقه‌بندی کرد [۹۱]. (۱) جذب آلاینده‌ها با نانوجاذب‌ها، (۲) تصفیه فوتوکاتالیزگری و اکسیداسیون پیشرفته با نانوکاتالیزورها و (۳) غشاهای نانو ساختار برای جداسازی فیزیکی و اسمزی.

یکی از چالش‌های مهم در پساب نیروگاهی، وجود فلزات سنگین و یون‌های محلول است که می‌تواند باعث خوردگی تجهیزات یا آلودگی محیطی شوند. نانوجاذب‌هایی مانند نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 ، نانولوله‌های کربنی، گرافن اکسید (GO) و نانوذرات ژئولیتی برای حذف این ترکیبات کارایی بالایی نشان داده‌اند (شکل ۸) [۹۳]. به عنوان مثال، نانوذرات مغناطیسی اصلاح شده با گروه‌های عاملی کربوکسیل یا آمین می‌توانند یون‌های Cu^{2+} و Cr^{6+} را با بازده جذب بیش از ۹۵٪ از پساب نیروگاه‌های بخاری حذف کنند. ویژگی مغناطیسی این نانوجاذب‌ها امکان جداسازی آسان آن‌ها از فاز مایع را نیز فراهم می‌کند و هزینه‌ی عملیاتی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، گرافن اکسید با ساختار دویعدی و گروه‌های عاملی متنوع ($-\text{OH}$ ، $-\text{COOH}$ ، $-\text{O}-$) قادر است یون‌های Pb^{2+} و Hg^{2+} را به طور انتخابی جذب کند [۹۴]. ترکیب GO با نانوذرات فلزی مانند Fe یا Ti باعث بهبود پایداری و افزایش ظرفیت جذب در شرایط دمای بالا و pH متغیر شده است؛ ویژگی‌ای که برای پساب‌های نیروگاهی با دمای ۵۰-۸۰ درجه سانتی گراد حیاتی است. در پساب نیروگاهی، ترکیبات آلی حاصل از روغن‌ها، روانکارها و مواد افزودنی شیمیایی نیز به سختی قابل تجزیه هستند. فناوری فوتوکاتالیز نانومقیاس با استفاده از نیمه‌هادی‌هایی مانند TiO_2 ، ZnO و $\text{g-C}_3\text{N}_4$ توانسته است آلاینده‌های آلی را

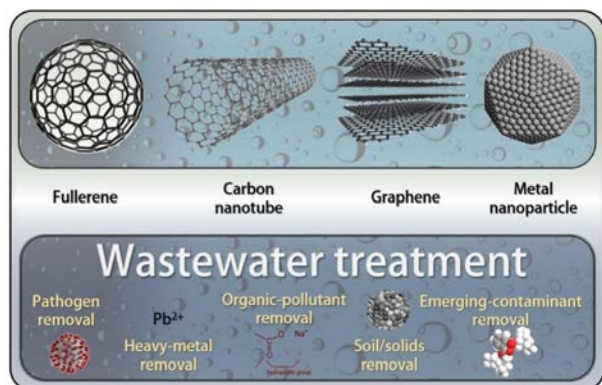
نیروگاه‌ها هستند. هرچند هزینه‌ی اولیه نصب آن‌ها بالاتر از عایق‌های مرسوم است، اما کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های تعمیر و افزایش عمر تجهیز، موجب می‌شود بازگشت سرمایه در کمتر از دو سال محقق شود. آینده‌ی عایق‌کاری در صنعت نیروگاهی، به ویژه در نیروگاه‌های بخاری، سیکل ترکیبی و ژئوترمال، به طور جدی در گرو توسعه و بومی‌سازی این نوع عایق‌های نانویی است [۸۲].

۹- تصفیه پساب نیروگاهی با فناوری نانو

در نیروگاه‌های حرارتی، آب یکی از حیاتی‌ترین منابع در فرآیندهای خنک‌سازی، تولید بخار و شست‌وشوی تجهیزات است. با افزایش تقاضای انرژی و کاهش منابع آب شیرین، مسئله‌ی مدیریت پساب نیروگاهی به چالشی اساسی در صنعت برق تبدیل شده است. پساب‌های حاصل از نیروگاه‌ها معمولاً حاوی ترکیباتی نظیر فلزات سنگین (مانند Cu, Fe, Cr, Hg)، یون‌های محلول (کلرید، سولفات، فسفات)، ترکیبات آلی و روغنی و در برخی موارد ترکیبات نیتروژنی حاصل از فرایند احتراق هستند. روش‌های مرسوم تصفیه، مانند انعقاد و لخته‌سازی، تبادل یونی و اسمز معکوس (RO)، اگرچه در سال‌های اخیر کارایی مناسبی نشان داده‌اند، اما با چالش‌هایی مانند هزینه‌ی بالای بهره‌برداری، گرفتگی غشا، مصرف انرژی زیاد و تولید لجن ثانویه مواجه‌اند. در این میان، فناوری نانو با ارائه نانومواد کارآمد و چندمنظوره، فرصت تازه‌ای برای افزایش بازده، کاهش هزینه و ارتقای پایداری فرآیندهای تصفیه فراهم کرده است [۸۹، ۹۰].

۹-۱- نقش نانومواد در بهبود کارایی فرآیندهای تصفیه

نانومواد با سطح ویژه بالا، قابلیت واکنش‌پذیری زیاد و خواص الکتروشیمیایی منحصربه‌فرد، می‌توانند در مراحل مختلف تصفیه از جمله جذب، اکسیداسیون، غشای نانو ساختار و فوتوکاتالیز نقش داشته باشند. ویژگی کلیدی این مواد، امکان ترکیب عملکردهای مختلف در یک سامانه واحد است؛ برای مثال نانوذرات TiO_2 می‌توانند هم به عنوان جاذب یون‌های فلزی و هم به عنوان فوتوکاتالیزگر برای تجزیه ترکیبات آلی عمل کنند.



شکل ۸. عملیات تصفیه پساب‌های نیروگاهی با به کارگیری نانومواد کربنی [۹۲].

فوتوکاتالیز) می باشد [۱۰۳-۱۰۱]. در نیروگاه‌ها، این ویژگی‌ها موجب کاهش هزینه‌های تصفیه، افزایش پایداری عملیاتی و کاهش اثرات زیست‌محیطی شده‌اند.

۹-۳- چالش‌ها و مسیرهای آینده

با وجود موفقیت‌های قابل توجه، چند چالش جدی همچنان وجود دارد. نخست، هزینه بالای سنتز و اصلاح سطحی نانومواد است که مانع از کاربرد گسترده در مقیاس صنعتی می‌شود [۱۰۴]. دوم، نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از نشت احتمالی نانوذرات به محیط زیست و تأثیرات احتمالی آن‌ها بر اکوسامانه‌های آبی است [۱۰۵]. از این‌رو، تحقیقات آینده بر توسعه‌ی نانومواد پایدار و ایمن زیستی، نانوکامپوزیت‌های قابل بازیافت و غشاهای زیست‌تخریب‌پذیر متمرکز است [۱۰۶]. در سال‌های اخیر، توجه فزاینده‌ای به استفاده از نانوکاتالیزگرهای مبتنی بر کربن سبز و نانوذرات حاصل از مواد طبیعی جلب شده است که می‌توانند هزینه تولید را کاهش داده و پایداری زیست‌محیطی را افزایش دهند [۱۰۷]. به طور خلاصه فناوری نانو چشم‌اندازی نو برای مدیریت پایدار پساب نیروگاهی فراهم کرده است. استفاده از نانوجاذب‌ها، نانوکاتالیزگرها و غشاهای نانوساختار موجب ارتقای بازده حذف آلاینده‌ها، بازیافت آب با کیفیت بالا و کاهش اثرات زیست‌محیطی شده است. در آینده، با توسعه مواد نانوساختار چندکاره، یکپارچه‌سازی فرآیندهای نانومحور با سامانه‌های کنترل هوشمند می‌تواند گامی مهم در جهت نیروگاه‌های سبز و کم‌پساب باشد [۱۰۷].

۱۰- نانومواد مغناطیسی در هسته‌های ژنراتورها و ترانسفورماتورها

• در سامانه‌های تولید و انتقال توان الکتریکی، اجزایی مانند ژنراتورهای سنکرون و ترانسفورماتورها نقش اساسی در تبدیل و انتقال انرژی دارند. بازده این تجهیزات تا حد زیادی به خواص مغناطیسی مواد به کار رفته در هسته‌های آهنی وابسته است. تلفات مغناطیسی، به‌ویژه تلفات هیستریزیس و تلفات فوکو، بخش قابل توجهی از اتلاف انرژی در تجهیزات الکترومغناطیسی نیروگاهی را تشکیل می‌دهند. در دهه‌های اخیر، با ظهور نانومواد مغناطیسی و

به‌صورت کامل به CO_2 و H_2O تبدیل کند. TiO_2 به‌عنوان پرکاربردترین فوتوکاتالیزگر، در حضور نور UV یا حتی نور مرئی (در صورت دوپ شدن با نیتروژن یا فلزات واسطه مانند Fe و Cu)، رادیکال‌های $\text{OH}^\bullet$ تولید می‌کند که قادر به تخریب ترکیبات آلی سنگین هستند [۹۵، ۹۶]. در نیروگاه‌ها، از این فرآیند برای تصفیه پساب برج‌های خنک‌کننده و شست‌وشوی بویلر استفاده می‌شود. به‌طور خاص، استفاده از نانوکاتالیزگرهای هیبریدی $\text{TiO}_2\text{-GO}$ یا $\text{TiO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$ موجب افزایش جذب نور مرئی، تسهیل جداسازی بارهای الکترونی و در نتیجه افزایش سرعت تخریب آلاینده‌ها تا سه برابر نسبت به TiO_2 خالص شده است. علاوه بر آن، خاصیت مغناطیسی نانوذرات، بازیافت آسان کاتالیزگر را ممکن می‌سازد [۹۷].

۹-۲- غشاهای نانوساختار در تصفیه پساب نیروگاهی

فرآیندهای غشایی از جمله نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس نقش کلیدی در تصفیه آب بازیافتی نیروگاه‌ها دارند. استفاده از غشاهای تقویت‌شده با نانومواد نظیر TiO_2 ، ZnO ، Al_2O_3 ، CNT و گرافن موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، مقاومت در برابر گرفتگی و افزایش فلاکس عبوری شده است [۹۸، ۹۹]. به‌عنوان نمونه، غشاهای پلی‌امید تقویت‌شده با نانوذرات TiO_2 نه تنها نفوذپذیری آب را افزایش می‌دهند، بلکه در برابر آلودگی‌های آلی مقاومت بالاتری نشان می‌دهند. در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، که سامانه بازیافت آب از حیاتی‌ترین اجزا است، این نوع غشاها امکان بازیافت آب خروجی از کولینگ‌تاورها را فراهم کرده‌اند. همچنین غشاهای گرافنی جدید با ضخامت چند نانومتر، توانایی جداسازی انتخابی یون‌های خاص (مثل Na^+ ، SO_4^{2-}) را دارند و در مقایسه با غشاهای پلیمری مرسوم، انرژی کمتری مصرف می‌کنند [۱۰۰]. این موضوع از منظر کاهش هزینه‌های عملیاتی تصفیه آب در نیروگاه‌ها بسیار اهمیت دارد.

فناوری‌های مبتنی بر نانومواد در مقایسه با روش‌های کلاسیک تصفیه پساب، چند مزیت کلیدی مانند کاهش نیاز به مواد شیمیایی لخته‌ساز و منعقدکننده، افزایش بازده حذف آلاینده‌ها در غلظت‌های پایین، کاهش حجم لجن و پسماند ثانویه، امکان استفاده مجدد از نانومواد به‌ویژه در سامانه‌های مغناطیسی یا غشایی، سازگاری با فرآیندهای ترکیبی (مانند نانوفیلتراسیون +

هسته‌های استاتور و روتور ژنراتورها یا هسته‌های ترانسفورماتورهای توزیع و ولتاژ بالا مورد توجه است.

۱۰-۲- مکانیزم بهبود عملکرد با نانومواد مغناطیسی

نانومواد مغناطیسی با استفاده از سه پدیده می‌توانند باعث بهبود عملکرد شوند که در ادامه به هریک اشاره می‌شود. مکانیزم اول مرتبط با کاهش تلفات هیستریزیس است. در مقیاس نانو، مرزهای دانه‌ای زیاد موجب محدود شدن حرکت دیواره‌های حوزه مغناطیسی می‌شود و انرژی اتلاف‌شده در هر سیکل مغناطیس‌زدایی کاهش می‌یابد. این امر به‌ویژه در مواد نانوکریستالی مانند Fe-Cu-Nb-Si-B منجر به کاهش تلفات هیستریزیس تا ۵۰٪ کمتر از فولاد سیلیس‌دار می‌شود [۱۱۱-۱۱۳]. مکانیزم بعدی کاهش جریان‌های گردابی است. در این مورد، کوچک شدن ابعاد دانه‌ها و افزایش مقاومت الکتریکی در نانو ساختارها، مسیر حرکت الکترون‌ها را محدود می‌کند. در نتیجه، جریان‌های گردابی درون هسته کاهش یافته و گرمایش ناخواسته کمتر می‌شود. نانوکامپوزیت‌های $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ و Fe-Ni-Zn ferrite نمونه‌هایی از این رفتار هستند که در فرکانس‌های تا ۱۰ کیلوهرتز نیز تلفات پایین دارند [۱۱۱-۱۱۳]. همچنین این نانو ذرات می‌توانند باعث افزایش چگالی شار مغناطیسی و بازده تبدیل انرژی شوند. در واقع، ساختار نانویی اجازه می‌دهد تا چگالی شار اشباعی تا ۱/۷ تا ۲ تسلا افزایش یابد. این موضوع در ژنراتورهای بخاری و بادی باعث افزایش توان خروجی بدون افزایش ابعاد فیزیکی دستگاه می‌شود. به‌طور خاص، استفاده از نانوکریستال Finemet در هسته ترانسفورماتورهای توزیع، موجب کاهش تلفات کلی و افزایش بازده توان گزارش شده است [۱۱۱-۱۱۳].

۱۰-۳- کاربرد در ژنراتورها

در ژنراتورهای نیروگاهی، نانومواد مغناطیسی نرم در دو بخش هسته استاتور و روتورهای با آهنربای دائم نانو ساختار مورد استفاده قرار می‌گیرند. جایگزینی ورق‌های فولادی سنتی با ورق‌های نانومغناطیسی چندلایه در هسته استاتور باعث کاهش تلفات فوکو تا ۴۰٪، کاهش دمای عملیاتی استاتور، افزایش طول عمر عایق‌ها و سیم‌پیچ‌ها و بهبود پایداری میدان مغناطیسی در

به‌ویژه نانوبلورها و نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی نرم، فرصت تازه‌ای برای افزایش بازده انرژی، کاهش وزن و بهبود پایداری حرارتی در هسته ژنراتورها و ترانسفورماتورها فراهم شده است [۱۰۸، ۱۰۹]. این مواد با کنترل ساختار در ابعاد نانومتری و مهندسی مرز دانه‌ها، خواص مغناطیسی ممتاز و تلفات پایین را نسبت به فولادهای سیلیس‌دار متداول ارائه می‌دهند. در حال حاضر، بیشتر هسته‌های ژنراتورها و ترانسفورماتورها از فولاد سیلیس‌دار ساخته می‌شوند. افزودن ۲-۳٪ سیلیس باعث کاهش تلفات فوکو و افزایش مقاومت الکتریکی ماده می‌شود، اما محدودیت‌هایی مانند کاهش چگالی شار مغناطیسی (حدود ۱/۵ تا ۱/۷ تسلا)، تلفات مغناطیسی قابل توجه در فرکانس‌های بالا، افت بازده در دماهای بالا (به‌ویژه در ژنراتورهای بخاری و گازی) و حساسیت به نوسانات دما و میدان مغناطیسی متغیر وجود دارد [۱۰۹]. در نیروگاه‌های مدرن، به‌ویژه در توربوژنراتورها و ترانسفورماتورهای قدرت، این محدودیت‌ها منجر به افزایش اتلاف حرارتی، مصرف سوخت بیشتر و افت توان مفید خروجی می‌شوند.

۱۰-۱- نانومواد مغناطیسی نرم: ساختار و ویژگی‌ها

نانومواد مغناطیسی نرم شامل نانوبلورها یا نانوکامپوزیت‌هایی هستند که اندازه دانه‌های مغناطیسی آن‌ها معمولاً در محدوده ۱۰ تا ۵۰ نانومتر است. این ابعاد کوچک‌تر از طول دیواره‌ی حوزه مغناطیسی است، در نتیجه موجب کاهش تلفات هیستریزیس می‌شوند. از جمله پرکاربردترین این مواد می‌توان به موارد جدول ۵ اشاره کرد [۱۰۹، ۱۱۰]. این مواد معمولاً با روش‌هایی مانند آلیاژسازی مکانیکی، رسوب شیمیایی، سل-ژل، و تفجوشی پلاسما تولید می‌شوند. در نیروگاه‌ها، استفاده از آن‌ها به‌ویژه در

جدول ۵. پرکاربردترین نانومواد مغناطیسی نرم با قابلیت به کارگیری در هسته‌های ژنراتور و ترانسفورماتور.

دسته	ترکیب شیمیایی نمونه	ویژگی شاخص
نانوبلورهای آمورف فلزی	Fe-Si-B-Nb-Cu (Finemet)	تلفات بسیار پایین، پایداری حرارتی بالا
نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی	Fe-Ni- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ Zn ferrite	مقاومت الکتریکی بالا، کاهش جریان‌های گردابی
نانوفریت‌های اسپینلی	CoFe_2O_4 $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$	خواص مغناطیسی نرم و پایداری شیمیایی بالا

می باشد. تحقیقات کنونی بر توسعه‌ی فرآیندهای تولید مقرون به صرفه مانند چاپ سه بعدی نانوپودری و نورد سرد با کنترل نانوکریستالیزاسیون درجا متمرکز است.

۱۰-۵ چشم انداز آینده

به کارگیری نانومواد مغناطیسی در هسته ژنراتورها و ترانسفورماتورها، مسیر تازه‌ای برای افزایش بازده انرژی و کاهش تلفات در صنعت برق فراهم کرده است. این مواد با ترکیب خواص ممتاز از جمله نفوذپذیری بالا، مقاومت الکتریکی زیاد، پایداری حرارتی و تلفات پایین، می‌توانند نسل آینده تجهیزات نیروگاهی را شکل دهند. انتظار می‌رود با توسعه‌ی نانوبلورهای مغناطیسی ارزان تر و پایدارتر و ادغام فناوری نانو با طراحی به کمک هوش مصنوعی، در دهه آینده ترانسفورماتورها و ژنراتورهای مبتنی بر نانومواد مغناطیسی به عنوان هسته‌های هوشمند با حداقل تلفات در نیروگاه‌ها به کار گرفته شوند [۱۱۷].

۱۱- خلا پژوهشی و تحقیقات آینده

برای افزایش شفافیت و مقایسه ساختاریافته فناوری‌های نانویی مورد بررسی، یک جدول مقایسه‌ای جامع بر اساس معیارهای کلیدی اضافه شد. جدول ۶ به وضوح نشان می‌دهد که هر فناوری از نظر داده‌های کمی، دقت، کاربرد عملی، هزینه، پیچیدگی اجرایی و محدودیت‌ها چگونه ارزیابی می‌شود. چنین ارائه‌ای علاوه بر بهبود قابلیت مقایسه، نقاط قوت و محدودیت‌های هر روش را در یک نگاه نمایش می‌دهد.

تحقیقات آینده برای کاربردهای نیروگاهی می‌تواند شامل مواد زیر باشد؛ (۱) اجرای پایلوت میدانی: پیاده‌سازی نانوسیالات و نوافزودنی‌ها در یک واحد عملیاتی برای ارزیابی عملکرد بلندمدت و پایداری، (۲) توسعه استانداردهای آزمون صنعتی: تدوین پروتکل‌های استاندارد برای پوشش‌ها، فیلترها و عایق‌ها تا مقایسه میان مطالعات آسان و قابل اعتماد شود، (۳) تحلیل اقتصادی و هزینه-فایده: بررسی هزینه نصب، تعمیر و نگهداری، صرفه‌جویی انرژی و آب، برای ارزیابی قابلیت پیاده‌سازی صنعتی، (۴) مطالعات زیست‌محیطی و ایمنی نانوذرات: ارزیابی چرخه عمر، اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی فناوری‌های نانویی، (۵)

شرایط بار متغیر می‌شود [۱۱۴-۱۱۶]. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نانوبلورهای B-Nb-Cu Fe-Si در ژنراتورهای بخاری ۵۰۰ مگاواتی، سبب کاهش مصرف انرژی معادل ۱/۵٪ کل توان خروجی شده است. از طرف دیگر، در ژنراتورهای سنکرون مدرن (به‌ویژه توربین‌های بادی)، از آهنرباهای دائم نانوساختار مانند Nd₂Fe₁₄B و SmCo₅ استفاده می‌شود. این مواد با افزودن ذرات نانویی Dy یا Tb، مقاومت حرارتی و مغناطیس‌زدایی بالاتری پیدا می‌کنند و عملکرد پایدار در دماهای تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را ممکن می‌سازند. چنین ویژگی‌ای برای ژنراتورهای گازی نیروگاه‌ها که در معرض دماهای بالا قرار دارند، بسیار حیاتی است [۱۱۴-۱۱۶].

۱۰-۴ کاربرد در ترانسفورماتورها

در ترانسفورماتورها، هسته یکی از منابع اصلی تلفات انرژی است. استفاده از نانومواد مغناطیسی نرم در این بخش منجر به پیشرفت‌های چشمگیری شده است [۱۱۴-۱۱۶]. به عنوان مثال این نانوذرات می‌توانند باعث کاهش تلفات بی‌بار^۱ شوند. نانوبلور Finemet و Nanoperm در مقایسه با فولاد سیلیس‌دار، تلفات بی‌باری را ۶۰٪ کاهش می‌دهند. همچنین وجود نانوذرات مغناطیسی به دلیل میدان مغناطیسی یکنواخت‌تر می‌تواند باعث کاهش نویز و ارتعاش مغناطیسی شود. مزیت دیگر این نانومواد، بهبود بازده ترانسفورماتورهای توزیع کوچک و متوسط، به‌ویژه در شبکه‌های شهری می‌باشد.

همچنین در ترانسفورماتورهای قدرت، استفاده از نانوکامپوزیت‌های فریت-اپوکسی به عنوان ماده هسته‌ی کامپوزیتی سبک‌تر، ضمن کاهش وزن تا ۲۰٪، مقاومت حرارتی و الکتریکی بالاتری فراهم کرده است. هرچند نانومواد مغناطیسی پتانسیل بالایی در بهبود عملکرد تجهیزات نیروگاهی دارند، اما پیاده‌سازی صنعتی آن‌ها نیازمند رفع چند مانع کلیدی مانند هزینه بالای تولید نانوبلورها و آهنرباهای دائم نانوساختار، کنترل دقیق اندازه دانه و جهت‌گیری کریستالی در فرآیند تولید، نیاز به روش‌های پوشش‌دهی ضد اکسیداسیون در محیط‌های با دمای بالا و چالش در تولید انبوه ورق‌های نانوساختار با یکنواختی بالا

¹ Core Losses

جدول ۶. مقایسه‌ای فناوری‌های نانویی در نیروگاه.

فناوری / روش	داده‌های کمی ارائه شده	دقت و صحت داده	کاربرد عملی / مقیاس	هزینه نسبی	پیچیدگی اجرایی	محدودیت‌ها
پوشش‌های نانوساختار توربین	درصد کاهش ساییش ۴۰-۶۰٪، افزایش عمر ۱/۵-۱/۸ برابر	بالا (آزمایشگاهی + پیلوت نیمه‌صنعتی)	نصب روی توربین‌های بخار و گاز	بالا (SPS/SPPS)	نیاز به مهارت و تجهیزات ویژه	نیاز به استاندارد صنعتی، تعمیر دشوار در محل
فیلترهای نانوالیاف هوا	بازده حذف ذرات کمتر از ۱ μm بین ۹۵-۹۹٪، افت فشار کاهش یافته	متوسط تا بالا، داده آزمایشگاهی و پیلوت	کاربرد مستقیم در مسیر جریان هوا	متوسط	متوسط، نصب ساده اما حساس به ذرات ساییده	آسیب‌پذیری مکانیکی، هزینه تولید نسبتاً بالا
نانوسیالات خنک‌کننده	افزایش انتقال حرارت ۲۰-۳۰٪، کاهش مصرف آب تا ۱۵-۲۵٪	متوسط، بیشتر آزمایشگاهی	محدود به میدل‌های حرارتی، نیاز به پایش مداوم	متوسط	بالا، نیاز به کنترل ته‌نشینی و پمپ	ته‌نشینی ذرات، ساییش تجهیزات، پیچیدگی بهره‌برداری
نانوافزودنی‌های سوخت	بهبود احتراق، کاهش آلاینده‌ها، داده کمی محدود	متوسط، آزمایشگاهی و شبیه‌سازی	محدود به سوخت مایع نیروگاه	پایین تا متوسط	متوسط، نیاز به پراکندگی یکنواخت	ته‌نشینی، اثرات بلندمدت بر تجهیزات، مطالعات میدانی کم
عایق‌های آئروژل	کاهش هدایت حرارتی ۳۰-۵۰٪	بالا، داده آزمایشگاهی	کاربرد در دیوارها و لوله‌های نیروگاه	بالا	بالا، شکننده و حساس به نصب	شکندگی مکانیکی، حساس به ارتعاش، هزینه نصب و تولید بالا
تصفیه پساب نیروگاهی با فناوری نانو	حذف فلزات سنگین و آلاینده‌ها تا ۹۰-۹۹٪، بهبود کیفیت پساب خروجی	متوسط تا بالا، داده‌های آزمایشگاهی و پیلوت صنعتی	تصفیه پساب نیروگاهی و بازیافت آب خنک‌کن	متوسط	متوسط تا بالا، نیاز به کنترل فرآیند و احیای دوره‌ای	فولینگ غشا، نیاز به مدیریت لجن و بازیافت نانوذرات، ملاحظات زیست‌محیطی
نانومواد مغناطیسی در هسته ژنراتورها و ترانسفورماتورها	کاهش تلفات هیستریزیس و فوکو ۱۰-۳۰٪، افزایش بازده الکتریکی	متوسط، عمدتاً آزمایشگاهی و مدل‌سازی	هسته ژنراتورها و ترانسفورماتورهای قدرتهسته ژنراتورها و ترانسفورماتورهای قدرت	بالا	بالا، نیازمند فرآیند ساخت دقیق و کنترل کیفیت	پایداری بلندمدت نانومواد، هزینه تولید، نیاز به ارزیابی حرارتی-مغناطیسی

یکپارچه‌سازی فناوری‌ها: بررسی اثر همزمان چند فناوری نانویی بر عملکرد کل نیروگاه و تعامل میان آن‌ها و (۶) بهبود پایداری نانوذرات: توسعه روش‌های فنی برای کاهش ته‌نشینی و افزایش پراکندگی نانوذرات در نانوسیالات و نانوافزودنی‌ها.

۱۲- نتیجه‌گیری

مرور حاضر به وضوح نشان می‌دهد که نانوفناوری نه یک گزینه جانبی، بلکه یک راهبرد اصلی و تحول‌آفرین در صنعت نیروگاهی است. کاربردهای بررسی‌شده، از فیلترهای نانومقیاس و

پوشش‌های مقاوم تا آئروژل‌های عایق و نانوافزودنی‌های سوخت، همگی گواهی بر این امر هستند که مهندسی در مقیاس نانو می‌تواند به طور همزمان بر سه جبهه بازدهی، پایداری و اقتصاد عملیات نیروگاهی تأثیر بگذارد. این فناوری با کاهش تلفات انرژی، افزایش عمر تجهیزات، کاهش انتشار آلاینده‌ها و امکان مدیریت کارآمد منابع آبی، نقش بی‌بدیلی در گذار به سمت نیروگاه‌های نسل آینده ایفا می‌کند با این وجود، مسیر صنعتی‌سازی این راهکارها با چالش‌هایی از جمله هزینه تولید در مقیاس بزرگ، ملاحظات ایمنی و چرخه عمر نانومواد روبرو است.

9. B. Ducharne, S. Gao, Y. Gao, X. Zhao, *Nonlinear Dyn.* 113, 21199–21214 (2025).
<https://doi.org/10.1007/s11071-025-11226-9>
10. Z. Jiang et al., *Friction* 12, 1347–1391 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s40544-023-0759-z>
11. M.-H. Lee, H.-J. Choi, M. Kumita, Y. Otani, *KONA Powder Part. J.* 37, 19–27 (2020).
<https://doi.org/10.14356/kona.2020001>
12. M. Wilcox, R. Kurz, K. Brun, *Int. J. Rotating Mach.* 2012, 128134 (2012).
<https://doi.org/10.1155/2012/128134>
13. Y. Zhou, Y. Liu, M. Zhang, Z. Feng, D.-G. Yu, K. Wang, *Nanomaterials* 12, 1077 (2022).
<https://doi.org/10.3390/nano12071077>
14. F. Russo, R. Castro-Muñoz, S. Santoro, F. Galiano, A. Figoli, *J. Environ. Chem. Eng.* 10, 108452 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108452>
15. S. O. Effiom et al., *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 131 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00303-8>
16. C. G. Levi, J. W. Hutchinson, M.-H. Vidal-Sétif, C. A. Johnson, *MRS Bull.* 37, 932–941 (2012). <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.230>
17. F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam, S. Ghadami, *Sci. Rep.* 11, 875 (2021).
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-79323-w>
18. S. Wee, J. Do, K. Kim, C. Lee, C. Seok, B. G. Choi et al., *Appl. Sci.* 10, 5476 (2020).
<https://doi.org/10.3390/app10165476>
19. S. F. Altaf, A. Rahman, M. F. Wani, *Surf. Interfaces* 72, 107033 (2025).
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.107033>

پژوهش‌های آتی باید بر روی بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت، ارزیابی دقیق اثرات بلندمدت زیست محیطی و توسعه مدل‌های اقتصادی برای توجیه سرمایه‌گذاری متمرکز شوند. با عبور از این چالش‌ها، می‌توان به آینده‌ای امیدوار بود که در آن نانوفناوری به هسته مرکزی طراحی و بهره‌برداری از نیروگاه‌های هوشمند، تمیز و با بازده حداکثری تبدیل شود.

مراجع

1. O. Gohar et al., *Mater. Des.* 241, 112930 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112930>
2. Y. Zhou, Y. Liu, M. Zhang, Z. Feng, D.-G. Yu, K. Wang, *Nanomaterials* 12, 1077 (2022).
<https://doi.org/10.3390/nano12071077>
3. R. Aflaha et al., *Commun. Mater.* 6, 87 (2025).
<https://doi.org/10.1038/s43246-025-00799-y>
4. F. Deuber, S. Mousavi, L. Federer, M. Hofer, C. Adlhart, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10, 9069–9076 (2018).
<https://doi.org/10.1021/acsami.8b00455>
5. Q. A. Yousif, M. N. Majeed, M. A. Bedair, *RSC Adv.* 12, 33725–33736 (2022).
<https://doi.org/10.1039/D2RA06949K>
6. M. Koebel, A. Rigacci, P. Achard, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 63, 315–339 (2012).
<https://doi.org/10.1007/s10971-012-2792-9>
7. G. Vijayakumar, E. Thangavel, D. Alshamsi, M. Sherif, A. A. Murad, S. Sangaraju, *Environ. Technol. Innov.* 38, 104129 (2025).
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104129>
8. X. Qiu, B. Wang, R. Wang, I. V. Kozhevnikov, *Materials* 17, 1803 (2024).
<https://doi.org/10.3390/ma17081803>

30. S. Singh, K. Goyal, R. Bhatia, Discover Mater. 4, Article 166 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00166-7>
31. D. Koch, D. E. Mack, R. Vaßen, Surf. Coat. Technol. 437, 128353 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128353>
32. D. F. Heravi, H. R. Goshayeshi, R. Saleh, Heliyon 11, e41370 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41370>
33. E. C. Okonkwo, T. Al-Ansari, Sci. Rep. 11, 19227 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98754-7>
34. H. Rajab, Rev. Oppor. Improve Steam Condenser Nanofluids Power Plants 9 (2022).
35. M. Karamim, S. Delfani, Building Engineering and Housing Science, 11, 35-41 (2017).
36. R. Javadpour, S. Z. Heris, Y. Mohammadfam, S. B. Mousavi, Sci. Rep. 12, 15154 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19196-3>
37. E. Starinskaya et al., Int. J. Thermophys. 44, 64 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03164-8>
38. S. A. Kadhim, K. A. Hammoodi, A. H. Askar, F. L. Rashid, H. A. Abdul Wahhab, Results Eng. 24, 103227 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103227>
39. E. I. Jassim, F. Ahmed, Therm. Sci. Eng. Prog. 25, 100988 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100988>
40. F. Bazdidi-Tehrani, A. Khabazipur, S. I. Vasefi, Renew. Energy 122, 406–418 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.056>
20. Y. Li et al., Coatings 11, 360 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11030360>
21. X. Guo et al., Adv. Appl. Ceram. 118, 91–97 (2019). <https://doi.org/10.1080/17436753.2019.1591695>
22. K. Leng, A. R. Romero, N. Curry, T. Hussain, Ceram. Int. 50, 631–649 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.10.142>
23. R. Pourshahsavari, A. Yaghtin, N. Hosseinabadi, Mater. Chem. Phys. 297, 127406 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127406>
24. S. Matthews, B. James, M. Hyland, Corros. Sci. 70, 203–211 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.01.030>
25. K. P. Jhansi Lakshmi, C. R. Raghavendra, S. Mathad, Results Surf. Interfaces 21, 100647 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100647>
26. W.-Z. Wang, F.-Z. Xuan, K.-L. Zhu, S.-T. Tu, Eng. Fail. Anal. 14, 632–641 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.03.004>
27. G. Bzymek, M. Bryk, S. Kruk-Gotzman, P. J. Ziółkowski, Materials 17, 4884 (2024). <https://doi.org/10.3390/ma17194884>
28. Y. Zhuk, in Proc. ASME Turbo Expo 2022: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (ASME, New York, 2022), Paper GT2022-80263. <https://doi.org/10.1115/GT2022-80263>
29. A. K. Tiwari, S. Seman, G. Singh, R. Jayaganthan, Coatings 9, 400 (2019). <https://doi.org/10.3390/coatings9060400>

52. G. Yıldız, Appl. Therm. Eng. 241, 122377 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122377>
53. M. I. Ahmed, J. U. Ahamed, Results Mater. 13, 100255 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100255>
54. W. Ajeeb, S. S. Murshed, Energies 16, 3768 (2023). <https://doi.org/10.3390/en16093768>
55. A. Morshed, H. Wu, Z. Jiang, Lubricants 9, 89 (2021). <https://doi.org/10.3390/lubricants9090089>
56. M. E. Korkmaz, M. K. Gupta, J. Mol. Liq. 407, 125261 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125261>
57. S. Vedachalam, A. K. Dalai, Catal. Today 407, 165–171 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.01.013>
58. O. Maslova, O. Senko, A. Akopyan, S. Lysenko, A. Anisimov, E. Efremenko, Catalysts 11, 1131 (2021). <https://doi.org/10.3390/catal11091131>
59. J. Lachman, M. Baláš, M. Lisý, H. Lisá, P. Milčák, P. Elbl, Fuel Process. Technol. 217, 106804 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106804>
60. M. S. Radwan, W. A. Aboutaleb, A. M. A. El Naggar, S. S. Medany, M. R. Shehata, Arab. J. Sci. Eng. 48, 15837–15850 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s13369-023-07633-y>
61. S. Mohammadzadeh Yengejeh, S. Allahyari, N. Rahemi, Process Saf. Environ. Prot. 143, 25–35 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.042>
62. A. Ahmad, A. A. Khan, H. M. Al-Swaidan, S. Haider, I. Khan, Comput. Theor. Chem. 1231, 41. M. Norouzi, F. Rashidi, Y. Noorollahi, H. F. Qom, J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 144, 104754 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104754>
42. M. Rahmani, A. Shahabi Nejad, M. Fallah Barzoki, A. Kasaeian, M. Sameti, Therm. Sci. Eng. Prog. 34, 101419 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101419>
43. S. Mukherjee, S. Weislik, P. C. Mishra, P. Chaudhuri, Particuology 87, 147–172 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.021>
44. R. Saidur, K. Leong, H. A. Mohammed, Renew. Sustain. Energy Rev. 15, 1646–1668 (2011).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>
45. G. Yıldız, A. E. Gürel, Z. Cingiz, Ü. Ağbulut, Heliyon 10, e37691 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37691>
46. A. Sethurajaperumal, S. Srivastava, G. Ganesh, R. Sundara, E. Varrla, Chem. Eng. J. 496, 154080 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154080>
47. K. S. Jogesh, M. A. Bappy, Int. J. Sci. Eng. 3, 46 (2024). <https://doi.org/10.60026/gmjieet.v3i2.46>
48. A. Kotia, P. Rajkhowa, G. S. Rao, S. K. Ghosh, Heat Mass Transf. 54, 3493–3508 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s00231-018-2351-1>
49. H.-R. Bahrami, O. Allahdadi, H. Saffari, Results Mater. 27, 100753 (2025).
<https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100753>
50. M. K. A. Ali, H. Xianjun, M. A. A. Abdelkareem, M. Gulzar, A. H. Elsheikh, Tribol. Int. 124, 209–229 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.004>
51. H. Kumar, A. Harsha, J. Tribol. 142, 081601 (2020). <https://doi.org/10.1115/1.4046571>

73. D. Mei, X. Li, Q. Wu, P. Sun, J. Energy Eng. 142 (2016). 114432 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.comptc.2023.114432>
74. K. M. Jadeja, R. Bumataria, P. Chavda, Int. J. Ambient Energy 44, 1084–1101 (2023).
<https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2097947>
75. R. Madhaiyan, K. T. P. P. Kandasamy, M. Raman, S. Vellaiyan, Fuel 402, 135959 (2025).
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135959>
76. C. S. Aalam, V. Saravanan, Ain Shams Eng. J. 8, 689–696 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.09.013>
77. J. I. Humadi et al., Processes 13, 3084 (2025).
<https://doi.org/10.3390/pr13103084>
78. S. Torkzaban, M. Feyzi, L. Norouzi, Renew. Energy 242, 122345 (2025).
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122345>
79. H. Li et al., Gels 10, 707 (2024).
<https://doi.org/10.3390/gels10110707>
80. K. Goryunova, Y. Gahramanli, RSC Adv. 14, 34690–34707 (2024).
<https://doi.org/10.1039/D4RA04976D>
81. Klay EnerSol, How does aerogel insulation save space and time in offshore installations? (Klay EnerSol). <https://www.klayenersol.com/how-does-aerogel-insulation-save-space-and-time-in-offshore-installations/>. Accessed 8 August 2025.
82. Z. Zhu, W. Zhang, H. Huang, W. Li, H. Ling, H. Zhang, Gels 11, 357 (2025).
<https://doi.org/10.3390/gels11050357>
83. B. P. Jelle, R. Baetens, A. Gustavsen, in The Sol-Gel Handbook, ed. by D. Levy, M. Zayat (Wiley-VCH, Weinheim, 2015), pp. 1385–1412.
63. D. Jha et al., J. Environ. Manage. 375, 124255 (2025).
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124255>
64. A. Z. Hameed, K. Muralidharan, ACS Omega 8, 5692–5701 (2023).
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07193>
65. J. Xu, Y. Zheng, J. Tian, Y. Zhao, H. Zheng, RSC Adv. 14, 36733–36744 (2024).
<https://doi.org/10.1039/D4RA06833E>
66. V. Markov, V. Kamaltdinov, A. Zherdev, V. Furman, B. Sa, V. Neverov, Energies 12, 4345 (2019).
67. S. Mosadegh, A. Ghaffarkhah, C. van der Kuur, M. Arjmand, S. Kheirkhah, Combust. Flame 238, 111748 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111748>
- [68] M. Beshtar, A. A. Asgharinezhad, A. Larimi, J. Ind. Eng. Chem. 134, 202–214 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.01.017>
69. L. Liantang, J. Zhang, C. Shen, Y. Wang, G. Luo, Fuel 167, 100–107 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.047>
70. M. K. Abdullah, Jordan J. Agric. Sci. 12 (2016). <https://doi.org/10.12816/0030552>
71. G. R. Kannan, R. Karvembu, R. Anand, Appl. Energy 88, 3694–3703 (2011).
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.043>
72. J. S. Basha, R. B. Anand, Alex. Eng. J. 53, 259–273 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.001>

95. M. Nadimi, A. Ziarati Saravani, M. A. Aroon, A. Ebrahimian Pirbazari, *Mater. Chem. Phys.* 225, 464–474 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.11.029>
96. T.-D. Chu, D.-T. Quach, X.-T. Nguyen, T.-S. Nguyen, D.-T. Pham, D.-H. Kim, *J. Magn.* 25, 1–7 (2020).
<https://doi.org/10.4283/JMAG.2020.25.1.001>
97. K. Thakur, B. Kandasubramanian, *J. Chem. Eng. Data* 64, 833–867 (2019).
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01057>
98. C. P. M. de Oliveira, I. Fernandes Farah, K. Koch, J. E. Drewes, M. M. Viana, M. C. S. Amaral, *Sep. Purif. Technol.* 280, 119836 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119836>
99. G. Memisoglu, R. C. Murugesan, J. Zubia, A. G. Rozhin, *Membranes* 13, 145 (2023).
<https://doi.org/10.3390/membranes13020145>
100. Z. Huanxin, H. Li, H. Yu, H. Chang, X. Quan, *Sep. Purif. Technol.* 116, 360–365 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.06.007>
101. A. A. Yaqoob, T. Parveen, K. Umar, M. N. Mohamad Ibrahim, *Water* 12, 495 (2020).
<https://doi.org/10.3390/w12020495>
102. H. S. Alshehri, *Pol. J. Environ. Stud.* (2025).
<https://doi.org/10.15244/pjoes/205261>
103. M. Khraisheh, S. Elhenawy, F. AlMomani, M. Al-Ghouti, M. K. Hassan, B. H. Hameed, *Membranes* 11, 995 (2021).
<https://doi.org/10.3390/membranes11120995>
104. G. Bhandari et al., *Front. Microbiol.* 14, 1214870 (2023).
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1214870>
84. M. Koebel, A. Rigacci, P. Achard, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 63, 315–339 (2012).
<https://doi.org/10.1007/s10971-012-2792-9>
85. L. W. Hrubesh, *J. Non-Cryst. Solids* 225, 335–342 (1998).
86. H. Maleki, L. Durães, A. Portugal, *J. Non-Cryst. Solids* 385, 55–74 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017>
87. U. Berardi, *Energy Procedia* 134, 13–22 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.576>
88. R. A. Collins, S. Zhao, J. Wang, J. S. Griffin, S. A. Steiner III, in *Springer Handbook of Aerogels*, ed. by M. A. Aegerter et al. (Springer, Cham, 2023).
89. J. Tripathy et al., *Water* 16, 1481 (2024).
<https://doi.org/10.3390/w16111481>
90. C. Ursino, R. Castro-Muñoz, E. Drioli, L. Gzara, M. H. Albeirutty, A. Figoli, *Membranes* 8, 18 (2018).
<https://doi.org/10.3390/membranes8020018>
91. X. Qu, P. J. J. Alvarez, Q. Li, *Water Res.* 47, 3931–3946 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.058>
92. E. I. Epelle, P. U. Okoye, S. Roddy, B. Gunes, J. A. Okolie, *Environments* 9, 141 (2022).
<https://doi.org/10.3390/environments9110141>
93. F. S. A. Khan et al., *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 24342–24356 (2020).
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-08711-6>
94. F. Almomani, R. R. Bhosale, M. Khraisheh, A. Kumar, T. D. Al-Momani, *Appl. Surf. Sci.* 506, 144924 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144924>

115. K. Takenaka, N. Nishiyama, A. D. Setyawan, P. Sharma, A. Makino, J. Appl. Phys. 117, 17A327 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4919041>
116. Y. Guo, L. Liu, W. Yin, H. Lu, G. Lei, J. Zhu, Nanomaterials 13, 1963 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13131963>
117. Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi, J. Appl. Phys. 64, 6044–6046 (1988). <https://doi.org/10.1063/1.342149>
105. E. Ugwuanyi, Z. Nwokediegwu, M. Dada, M. Majemite, A. Obaigbena, Magna Sci. Adv. Res. Rev. 10, 273–285 (2024). <https://doi.org/10.30574/msarr.2024.10.1.0030>
106. S. Thanigaivel, A. K. Priya, L. Gnanasekaran, T. K. A. Hoang, S. Rajendran, M. Soto-Moscoso, Sustain. Energy Technol. Assess. 53, 102484 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102484>
107. N. Arabzadeh Nosratabad, Q. Yan, Z. Cai, C. Wan, Heliyon 10, e37123 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37123>
108. W. Wang et al., Energies 18, 482 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18030482>
109. V. S. Tsepelev, Y. N. Starodubtsev, Nanomaterials 11, 108 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11010108>
110. K. Suzuki, J. Magn. Magn. Mater. 592, 171677 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171677>
111. K. Suzuki, J. Magn. Magn. Mater. 592, 171677 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171677>
112. Proterial Ltd., FINEMET® Nanocrystalline Soft Magnetic Material. (Proterial Ltd.), https://www.proterial.com/e/products/soft_magnetism/finemet.html. Accessed 8 August 2025.
113. V. S. Tsepelev, Y. N. Starodubtsev, Nanomaterials 11, 108 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11010108>
114. R. Gautam et al., Nat. Commun. 16, 8022 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63139-1>



Nanotechnology in power plants: A multifaceted review for enhanced performance and sustainability

Majid Mirzaee¹, Narges Esmaeili^{2*}, Maryam Nazari³

¹ Non-Metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

² Faculty of Chemistry, North Tehran Branch, University of Tehran, Tehran, Iran.

³ Faculty of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract: Nanotechnology offers advanced solutions at the nanoscale that can significantly enhance efficiency, environmental performance, and equipment longevity in power generation units. This review article examines the role of nanomaterials in improving key subsystems of power plants and highlights their potential to drive a technological shift in the power industry. In combustion processes, the use of nano-additives in heavy fuel oil improves desulfurization and combustion efficiency, resulting in notable reductions in pollutants. In equipment protection, nanometric coatings on gas and steam turbine blades enhance resistance to corrosion, creep, and thermal fatigue, thereby extending component lifespan. Additionally, nanofiber-based air filters, with their high particle-capture efficiency, prevent contamination of compressors and reduce blade degradation. In thermal management, advanced insulation materials based on nanostructured aerogels—with extremely low thermal conductivity—minimize heat losses in pipelines and auxiliary systems. In water management, nanomaterials enhance wastewater treatment and enable effective water recovery, reducing overall consumption. Furthermore, incorporating nanocomposites into generator and transformer cores lowers hysteresis and eddy-current losses, improving energy conversion efficiency. Nano-lubricants and nanofluids containing engineered nanoparticles also decrease friction and wear in rotating machinery, contributing to energy savings and more effective preventive maintenance. Overall, this review demonstrates that the systematic integration of nanotechnology across power plant systems is not only a strategy for improving efficiency and reliability but also a meaningful step toward cleaner and more sustainable power generation.

Keywords: Nanotechnology, Power plant, Efficiency, Environmental sustainability, Nanomaterials.