ارتقای بهره‌وری نیروگاه‌های خورشیدی زمینی با پوشش‌های نانو خودتمیزشونده

چکیده گزارش سیاستی:

نیروگاه‌های خورشیدی زمینی در ایران، به‌ویژه در استان‌های کویری، با معضل مزمن «کاهش راندمان ناشی از تجمع گرد و غبار» مواجه هستند. روش سنتی شست‌وشوی دوره‌ای این پنل‌ها، سالانه ده‌ها میلیون لیتر آب شیرین مصرف کرده و هزینه‌های عملیاتی سنگینی تحمیل می‌کند. این در حالی است که فناوری پوشش‌های نانو خودتمیزشونده با بلوغ تجاری کافی، قادر است تا ۸۰٪ نیاز به شست‌وشو را حذف کرده و راندمان پنل‌ها را بین ۵ تا ۶۴٪ (بسته به شرایط محیطی) افزایش دهد. با این حال، بازار این فناوری در ایران به دلیل نبود استاندارد اجباری، بی‌اعتمادی به محصولات نانو، و عدم گنجاندن مشوق‌های نگهداشت در تعرفه‌های برق توسعه نیافته است.

شناسنامه گزارش سیاستی

عنوان گزارش	ارتقای بهره‌وری نیروگاه‌های خورشیدی زمینی با پوشش‌های نانو خودتمیزشونده
حوزه تخصصی	فناوری نانو، انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت منابع آب
مخاطبان اصلی	وزارت نیرو–پژوهشگاه نیرو–سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری (ستاد توسعه فناوری نانو)، مالکان و سرمایه‌گذاران نیروگاه‌های خورشیدی
سفارش دهنده	پژوهشگاه نیرو
نویسندگان	دکتر مجید میرزایی (ایمیل سازمانی: mjmirzaei@nri.ac.ir)
ناظر	پژوهشکده تولید و معاونت فناوری پژوهشگاه نیرو
پژوهشکده، گروه پژوهشی	پژوهشکده تولید– مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری نانو
تاریخ مطالعه	اردیبهشت ۱۴۰۵

۱. بیان مسئله

۱,۱. گرد و غبار؛ دشمن خاموش نیروگاه‌های خورشیدی ایران

ایران با داشتن بیش از ۳۰۰ روز آفتابی در سال، یکی از بهترین نقاط جهان برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی است. اما همین موقعیت جغرافیایی، با پدیده «طوفان‌های گرد و غبار» و «نشست ذرات معلق» همراه است که می‌تواند بازدهی پنل‌ها را بین ۲۰٪ تا ۶۴٪ کاهش دهد. برای یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی، کاهش ۲۰٪ راندمان به معنای از دست رفتن ۲ مگاوات توان تولیدی است که ارزش اقتصادی آن در طول یک سال به ده‌ها میلیارد تومان می‌رسد.

۲,۱. شست‌وشوی سنتی؛ هدررفت آب و هزینه

روش فعلی نگهداشت این نیروگاه‌ها، شست‌وشوی دوره‌ای با آب است. این روش سه مشکل اساسی دارد:

۱. مصرف بالای آب: شست‌وشوی یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی، ماهانه بین ۵۰،۰۰۰ تا ۱۰۰،۰۰۰ لیتر آب مصرف می‌کند
۲. هزینه کارگری و لجستیک: اعزام تیم شست‌وشو به مناطق دورافتاده کویری، هزینه عملیاتی سنگینی دارد
۳. کاهش عمر پنل‌ها: شست‌وشوی مکرر با آب‌های نامناسب و مواد شوینده، به مرور به سطح پنل آسیب می‌زند

۳,۱. شکاف سیاستی

در حال حاضر، خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر صرفاً بر اساس «کیلووات ساعت تولیدی» انجام می‌شود. هیچ مکانیزمی برای تشویق مالکان به کاهش مصرف آب یا بهبود راندمان از طریق فناوری‌های نوین نگهداشت وجود ندارد. این یعنی یک نیروگاه با شست‌وشوی روزانه و مصرف بی‌رویه آب، همان تعرفه‌ای را دریافت می‌کند که یک نیروگاه مجهز به پوشش نانو و بدون مصرف آب.

۲. راه‌حل: پوشش‌های نانو خودتمیزشونده

این فناوری که بر پایه نانوذرات سیلیکا (SiO_2) و فناوری سل–ژل ساخته می‌شود، یک لایه شفاف به ضخامت چند نانومتر روی سطح پنل ایجاد می‌کند که دو خاصیت هم‌زمان دارد:

- فوق‌آب‌گریزی (Superhydrophobic): قطرات آب (باران، شبنم یا حداقل آب شست‌وشو) به شکل کره درآمده و با غلتیدن، گرد و غبار را جذب و دفع می‌کنند.
- آنتی‌استاتیک: سطح پنل از جذب ذرات معلق به‌دلیل بار الکترواستاتیکی جلوگیری می‌کند.

۱,۲. نتایج ثبت‌شده در مطالعات جهانی

- افزایش جریان خروجی پنل‌ها تا ۶۴,۷٪ در محیط‌های پرگردوغبار
- کاهش ۸۰٪ نیاز به شست‌وشوی دستی
- دوام ۳ تا ۵ سال بسته به شرایط اقلیمی
- عدم تأثیر منفی بر شفافیت پنل (عبور نور > ۹۹٪)

بازار جهانی: ارزش بازار پوشش‌های نانو برای پنل‌های خورشیدی در سال ۲۰۲۵ حدود ۱٫۸۷ میلیارد دلار بوده و تا سال ۲۰۳۴ به ۵٫۱۴ میلیارد دلار خواهد رسید (نرخ رشد ۱۰٫۶٪).

۳. موانع توسعه در ایران

۱. بی‌اعتمادی به محصولات نانو: ورود محصولات بی‌کیفیت و فاقد تأییدیه، اعتماد بازار را تخریب کرده است.
۲. نبود استاندارد اجباری: هیچ الزامی برای استفاده از پوشش‌های محافظ در نیروگاه‌های جدید یا موجود وجود ندارد.
۳. هزینه اولیه: هرچند بازگشت سرمایه سریع است، اما هزینه اولیه برای برخی مالکان نیروگاه‌های کوچک‌مقیاس سنگین است.
۴. عدم ارزش‌گذاری آب صرفه‌جویی‌شده: در محاسبات اقتصادی نیروگاه‌ها، «آبی که مصرف نمی‌شود» ارزش مالی ندارد.

۴. توصیه‌های سیاستی

توصیه ۱: الزام به استفاده از پوشش‌های نانو در نیروگاه‌های جدید (استاندارد اجباری)

راهکار: سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر (ساتبا) با همکاری سازمان ملی استاندارد، «دستورالعمل فنی نگهداشت نیروگاه‌های خورشیدی» را بازنگری کرده و استفاده از پوشش‌های خودتمیزشونده دارای «تأییدیه نانومقیاس» از ستاد توسعه فناوری نانو را برای نیروگاه‌های جدیدالاحداث اجباری کند.

جزئیات پیشنهادی:

- الزام از سال ۱۴۰۶ برای تمام نیروگاه‌های بالای ۵۰۰ کیلووات
- نیروگاه‌های موجود، ۲ سال فرصت برای تطبیق داشته باشند
- پوشش باید دارای «تأییدیه نانومقیاس» و گارانتی حداقل ۳ ساله باشد

نهاد مسئول: ساتبا، سازمان ملی استاندارد ایران

پیش‌نیاز قانونی: اصلاح «دستورالعمل فنی و اقتصادی احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر» مصوب ساتبا

توصیه ۲: ایجاد «سامانه رتبه‌بندی سبز» نیروگاه‌ها

راهکار: ساتبا یک «سامانه رتبه‌بندی سبز» برای نیروگاه‌های خورشیدی ایجاد کند که در آن، شاخص‌هایی مانند «میزان مصرف آب به ازای هر مگاوات ساعت»، «استفاده از پوشش‌های خودتمیزشونده» و «روش‌های نگهداشت پایدار» رصد و امتیازدهی شود.

مشوق‌های پیشنهادی:

- – نیروگاه‌های با رتبه سبز بالا، اولویت در تمدید قرارداد خرید تضمینی داشته باشند
- – افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی نرخ خرید برق برای نیروگاه‌های دارای گواهی «مدیریت پایدار آب»
- – انتشار عمومی رتبه‌ها برای ایجاد فشار اجتماعی و رقابت میان مالکان

نهاد مسئول: ساتبا با همکاری سازمان حفاظت محیط زیست

۵. جمع‌بندی و چشم‌انداز

پوشش‌های نانو خودتمیزشونده، یک فناوری آماده، تجاری‌شده و دارای توجیه اقتصادی قوی هستند که می‌توانند بدون نیاز به تغییر زیرساخت، راندمان نیروگاه‌های خورشیدی کشور را به‌طور چشمگیری افزایش دهند. اجرای دو توصیه فوق (الزام در نیروگاه‌های جدید و رتبه‌بندی سبز) می‌تواند طی ۳ سال آینده منجر به:

- – صرفه‌جویی سالانه چند ده میلیون لیتر آب شیرین
- – افزایش ۵ تا ۱۵ درصدی تولید برق نیروگاه‌های موجود
- – ایجاد بازار چند هزار میلیارد تومانی برای شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی
- – کاهش هزینه‌های عملیاتی نگهداشت نیروگاه‌ها

شود.

پیشنهاد می‌شود که تشکیل «کمیته فنی پوشش‌های محافظ پنل‌های خورشیدی» در ساتبا با حضور نمایندگان پژوهشگاه نیرو، ستاد نانو، شرکت‌های دانش‌بنیان و انجمن انرژی‌های تجدیدپذیر، برای تدوین پیش‌نویس دستورالعمل فنی ظرف ۶ ماه آینده انجام شود.

منابع و مراجع

[1] https://qyresearch-pr.hateblo.jp/entry/2025/07/02/123411

[2]https://www.polyu.edu.hk/academiccollaboration/smart-building/super-hydrophilic-self-cleaning-coating/?sc_lang=sc

[3] https://www.world-energy.org/article/45625.html

[4] https://www.polyu.edu.hk/fce/research/research-impacts/bse2/#skip-start

[5] https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/9Jyzrjml/

پیوست: تحلیل جامع رقابت‌پذیری: پوشش نانو (تولید داخل) در برابر شست‌وشوی سنتی با آب از دیدگاه مالک یک نیروگاه خورشیدی ۱ مگاواتی

۱. مفروضات پایه

نیروگاهی فرضی به ظرفیت ۱ مگاوات با مساحت ۵۵۰۰ متر مربع پنل، مستقر در یک منطقه کویری (مانند یزد یا کرمان) در نظر گرفته می‌شود که مالک، آب را با تانکر به محل حمل می‌کند.

۱,۱. مفروضات شست‌وشوی سنتی

پارامتر	مقدار	توضیح
مصرف آب به ازای هر متر مربع	۱ لیتر	استاندارد شست‌وشوی دستی
حجم آب مصرفی در هر نوبت شست‌وشو	۵٬۵۰۰ لیتر	۵٬۵۰۰ متر × ۱ لیتر
قیمت هر لیتر آب (حمل با تانکر)	۲۰٬۰۰۰ تومان	شامل خرید آب + کرایه حمل به مناطق دورافتاده کویری
هزینه آب در هر نوبت شست‌وشو	۱۱۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان	۲۰٬۰۰۰ × ۵٬۵۰۰
هزینه کارگری و لجستیک (تیم ۳ نفره، ۲ روز)	۳۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان	دستمزد، اسکان، و حمل‌ونقل تیم
هزینه کل هر نوبت شست‌وشو	۱۴۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان	–
تعداد شست‌وشو در سال (منطقه پرگردوغبار)	۱۲ نوبت	میانگین ماهی یک‌بار
هزینه سالانه شست‌وشوی سنتی	۱٬۶۸۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان	۱۴۰٬۰۰۰٬۰۰۰ × ۱۲

۲. محاسبه هزینه پوشش نانو (تولید داخل)

۲,۱. برآورد واقع‌بینانه هزینه مواد اولیه

فرض می‌کنیم یک لیتر از این پوشش ۲۰ تا ۳۰ متر مربع را پوشش می‌دهد. برآورد واقع‌بینانه قیمت مواد اولیه به ازای هر لیتر (محصول نهایی) به شرح زیر است:

ماده اولیه	درصد در فرمول	هزینه تقریبی هر لیتر (تومان)	توضیح
TEOS (پیش‌ماده)	٪۱۵–۱۰	۱۵۰٬۰۰۰ – ۲۵۰٬۰۰۰	قیمت گرید صنعتی داخلی/وارداتی
حلال (اتانول/IPA)	٪۸۵–۸۰	۱۰۰٬۰۰۰ – ۲۰۰٬۰۰۰	حلال صنعتی با خلوص بالا
نانوسیلیس دودی	٪۳–۱	۲۰۰٬۰۰۰ – ۴۰۰٬۰۰۰	نانوذرات با سایز و خلوص کنترل‌شده
HMDS (سیلان)	٪۲–۱	۳۰۰٬۰۰۰ – ۵۰۰٬۰۰۰	عامل آب‌گریزکننده کلیدی و گران‌قیمت
سایر افزودنی‌ها و کاتالیزور	٪۱>	۵۰٬۰۰۰ – ۱۰۰٬۰۰۰	–
بسته‌بندی و سربار تولید	–	۱۰۰٬۰۰۰ – ۲۰۰٬۰۰۰	–

قیمت تمام‌شده هر لیتر (برآورد واقعی	–	۹۰۰٬۰۰۰ – ۱٬۶۵۰٬۰۰۰	–
قیمت تمام‌شده هر لیتر (میانگین)	–	۱٬۲۵۰٬۰۰۰ تومان	–

- هزینه مواد اولیه به ازای هر متر مربع (با نرخ مصرف ۲۵ متر/لیتر):

۱٬۲۵۰٬۰۰۰ ÷ ۲۵ ≈ ۵۰٬۰۰۰ تومان

برای یک محصول باکیفیت و بادوام، قیمت تمام‌شده مواد اولیه با در نظر گرفتن خلوص صنعتی، بسته‌بندی و سربار تولید، واقع‌بینانه است. بر اساس تحلیل هزینه مواد تشکیل‌دهنده (TEOS، حلال صنعتی، نانوسیلیس دودی با سایز کنترل‌شده، HMDS گران‌قیمت، و افزودنی‌ها)، قیمت تمام‌شده هر لیتر محصول نهایی حدود ۱٬۲۵۰٬۰۰۰ تومان برآورد می‌شود. با نرخ مصرف ۲۵ متر مربع به ازای هر لیتر، هزینه مواد اولیه به ازای هر متر مربع به صورت زیر محاسبه می‌شود:

آیتم	مبلغ (تومان/متر مربع)	توضیح
قیمت تمام‌شده مواد اولیه (تولید داخل)	۵۰٬۰۰۰	۱٬۲۵۰٬۰۰۰ تومان/لیتر ÷ ۲۵ متر/لیتر (برآورد صنعتی)
هزینه نیروی کار، لجستیک و اجرا	۲۵۰٬۰۰۰	دستمزد تیم متخصص، اسکان و حمل‌ونقل (بدون تغییر)
قیمت تمام‌شده کل	۳۰۰٬۰۰۰	–
حاشیه سود (۸۰٪ منطقی در بازار خدمات صنعتی)	۲۴۰٬۰۰۰	–
قیمت فروش به مشتری (هر متر مربع)	۵۴۰٬۰۰۰	۵۴۰٬۰۰۰ تومان

۲,۲. هزینه پوشش‌دهی کل نیروگاه

پارامتر	مقدار
مساحت کل پنل‌ها	۵٬۵۰۰ متر مربع
قیمت فروش هر متر مربع	۵۴۰٬۰۰۰ تومان
هزینه کل پوشش‌دهی (یک‌بار)	۲٬۹۷۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان
دوام پوشش (طبق گارانتی)	۳ سال
هزینه سالانه پوشش نانو	۹۹۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان

۳. مقایسه مستقیم هزینه‌ها: شست‌وشو در مقابل پوشش نانو

روش	هزینه سالانه	مقایسه
شست‌وشوی سنتی با تانکر	۱٬۶۸۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان	وضعیت فعلی
پوشش نانو (تولید داخل – قیمت واقعی)	۹۹۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان	۴۱٪ ارزان‌تر

نتیجه اولیه: حتی بدون در نظر گرفتن منافع جانبی، پوشش نانو با قیمت واقع‌بینانه، ۶۹۰ میلیون تومان در سال صرفه‌جویی مستقیم در هزینه شست‌وشو ایجاد می‌کند.

۴. محاسبه منافع اضافی: افزایش راندمان تولید برق

پوشش نانو فقط جایگزین شست‌وشو نیست، بلکه به دلیل خاصیت ضد بازتاب و تمیزی دائمی، راندمان را نیز افزایش می‌دهد.

پارامتر	مقدار	توضیح
ظرفیت نیروگاه	۱ مگاوات	۱٬۰۰۰ کیلووات
ساعات معادل تولید سالانه در ایران	۱٬۴۰۰ ساعت	میانگین مناطق کویری
تولید سالانه	۱٬۴۰۰ مگاوات ساعت	۱٬۴۰۰٬۰۰۰ کیلووات ساعت
افزایش راندمان با پوشش نانو	۵٪	برآورد محافظه‌کارانه (منابع علمی ۲ تا ۶۴٪ ذکر کرده‌اند)
افزایش تولید سالانه	۷۰ مگاوات ساعت	۱٬۴۰۰ × ۵٪
نرخ خرید تضمینی برق تجدیدپذیر	۹٬۰۰۰ تومان/کیلووات ساعت	نرخ مصوب ساتبا برای نیروگاه‌های زیر ۱۰ مگاوات
درآمد اضافی سالانه از افزایش راندمان	۶۳۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان	۷۰٬۰۰۰ کیلووات × ۹٬۰۰۰

۵. تحلیل جامع هزینه–فایده (از دیدگاه مالک نیروگاه)

حال که تمام مؤلفه‌ها را داریم، حساب می‌کنیم که اگر مالک نیروگاه تصمیم به استفاده از پوشش نانو (تولید داخل، قیمت واقعی) بگیرد، خالص منفعت یا ضرر سالانه او چقدر خواهد بود:

ردیف	آیتم	مبلغ (میلیون تومان/سال)	شرح
الف	صرفه‌جویی در هزینه شست‌وشو	+۱۶۸۰	چون دیگر ۱۲ نوبت شست‌وشوی تانکری انجام نمی‌شود
ب	درآمد اضافی ناشی از افزایش ۵٪ راندمان	+۶۳۰	برق بیشتری تولید و به شبکه فروخته می‌شود
ج	هزینه سالانه پوشش نانو (سرشکن ۳ ساله)	−۹۹۰	هزینه ۲٫۹۷ میلیاردی تقسیم بر ۳ سال
د	خالص منفعت (یا ضرر) سالانه	+۱۳۲۰	سود خالص برای مالک نیروگاه

۶. تحلیل بازگشت سرمایه (از دیدگاه مالک نیروگاه)

مالک نیروگاه در ابتدای کار باید کل هزینه پوشش‌دهی را به‌صورت یک‌جا پرداخت کند:

– سرمایه‌گذاری اولیه (هزینه پوشش‌دهی): ۲٬۹۷۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان

– مجموع منفعت سالانه (صرفه‌جویی + درآمد اضافی): ۱٬۶۸۰ + ۶۳۰ = ۲٬۳۱۰٬۰۰۰٬۰۰۰ تومان

پارامتر	مقدار
دوره بازگشت سرمایه	۲٬۹۷۰ ÷ ۲٬۳۱۰ ≈ ۱٫۲۸ سال (≈ ۱۵٫۴ ماه)
خالص سود در ۳ سال عمر پوشش	(۳ × ۲٬۳۱۰) − ۲٬۹۷۰ = ۳٬۹۶۰ میلیون تومان

۷. تحلیل حساسیت

برای اینکه ببینیم تغییرات قیمت آب چه تأثیری بر رقابت‌پذیری دارد:

سناریوی قیمت آب	هزینه شست‌وشوی سالانه	هزینه پوشش نانو (سالانه)	صرفه‌جویی سالانه	نتیجه رقابت‌پذیری
۱۰٬۰۰۰ تومان/لیتر (آب ارزان)	۱٬۰۲۰ میلیون	۹۹۰ میلیون	۳۰ میلیون	همچنان به‌صرفه (نقطه سر به سر)
۲۰٬۰۰۰ تومان/لیتر (سناریو پایه)	۱٬۶۸۰ میلیون	۹۹۰ میلیون	۶۹۰ میلیون	کاملاً رقابت‌پذیر
۵۰٬۰۰۰ تومان/لیتر (مناطق فوق بحرانی)	۴٬۲۰۰ میلیون	۹۹۰ میلیون	۳٬۲۱۰ میلیون	بسیار رقابت‌پذیر

نکته کلیدی: نقطه سر به سر رقابت‌پذیری جایی است که قیمت آب حدود ۹٬۸۰۰ تومان/لیتر باشد. در هر قیمتی بالاتر از این، پوشش نانو به‌صرفه است. این یعنی آستانه رقابت‌پذیری بسیار پایین و ایمن است.

۸. نتیجه‌گیری نهایی

شاخص	وضعیت
رقابت‌پذیری با شست‌وشوی سنتی	کاملاً رقابت‌پذیر (۴۱٪ ارزان‌تر)
صرفه‌جویی سالانه برای مالک	۶۹۰ میلیون تومان فقط از محل کاهش شست‌وشو
خالص منفعت سالانه (با احتساب افزایش راندمان)	۱٬۳۲۰ میلیون تومان (+)
دوره بازگشت سرمایه مالک	۱۵٫۴ ماه
سود خالص ۳ ساله برای مالک	۳٬۹۶۰ میلیون تومان

۹. نتیجه راهبردی

تحلیل واقع‌بینانه نشان می‌دهد که، تولید داخلی با قیمت‌های صنعتی واقعی، پوشش نانو را به یک گزینه کاملاً رقابت‌پذیر و اقتصادی برای مالک نیروگاه تبدیل می‌کند. این محصول نه‌تنها هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد، بلکه با افزایش راندمان تولید برق، یک منبع درآمد اضافی نیز ایجاد می‌کند و سرمایه‌گذاری اولیه را در کمتر از ۱۶ ماه بازمی‌گرداند. گام اول و پیش‌نیاز حیاتی برای موفقیت در بازار، بومی‌سازی فرمولاسیون و راه‌اندازی خط تولید داخلی ماده اولیه با هدف دستیابی به قیمت تمام‌شده ۵۰٬۰۰۰ تومان/متر مربع است.