نانوحباب؛ فناوری نوظهور ارتقای بهره‌وری آب در نیروگاه‌های حرارتی ایران

چکیده گزارش:

بخش عمده برق ایران در نیروگاه‌های حرارتی تولید می‌شود. اگرچه طی سال‌های اخیر توسعه سامانه‌های خنک‌کاری خشک مورد توجه قرار گرفته است، اما بخش بزرگی از ناوگان نیروگاهی کشور همچنان متکی بر برج‌های خنک‌کننده تر است. این برج‌ها به دلیل نیاز مداوم به آب، یکی از مهم‌ترین کانون‌های مصرف آب در نیروگاه‌ها محسوب می‌شوند. در چنین شرایطی، هر فناوری که بتواند بدون ایجاد تغییرات اساسی در زیرساخت‌های موجود، مصرف آب را کاهش دهد، از اهمیت راهبردی برخوردار خواهد بود. در سطح جهانی، فناوری نانوحباب به عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور مدیریت آب صنعتی در حال ورود به مرحله بلوغ بازار است. رشد سریع سرمایه‌گذاری‌ها، افزایش ثبت اختراعات، توسعه شرکت‌های تخصصی و گسترش کاربردهای صنعتی نشان می‌دهد که این فناوری از مرحله تحقیقات دانشگاهی عبور کرده و وارد مرحله رقابت صنعتی شده است. بررسی روندهای مالکیت فکری نشان می‌دهد که هزاران پتنت مرتبط با فناوری نانوحباب در جهان ثبت شده و چین، آمریکا و ژاپن به مهم‌ترین بازیگران این حوزه تبدیل شده‌اند. اهمیت نانوحباب برای ایران صرفاً به بهبود کیفیت آب یا کاهش رسوب محدود نمی‌شود. این فناوری می‌تواند بستری برای شکل‌گیری نسل جدیدی از خدمات دانش‌بنیان در حوزه مدیریت آب صنعتی باشد. خدماتی که در آن ارزش افزوده اصلی از طریق تحلیل داده، پایش هوشمند، بهینه‌سازی بهره‌برداری و تضمین صرفه‌جویی ایجاد می‌شود. در واقع، نانوحباب برای ایران بیش از آنکه یک تجهیز باشد، می‌تواند یک بازار جدید دانش‌بنیان باشد. این گزارش با رویکرد رصد فناوری، ضمن بررسی روندهای جهانی، وضعیت پتنت‌ها و بازیگران اصلی، ظرفیت‌های شکل‌گرفته در زیست‌بوم فناوری نانو ایران، فرصت‌های توسعه کاربرد نانوحباب در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه‌های حرارتی، مدل‌های کسب‌وکار، سناریوهای آینده و نقشه راه توسعه این فناوری را تا افق ۱۴۱۵ مورد بررسی قرار می‌دهد.

شناسنامه گزارش رصد فناوری

عنوان گزارش	نانوحباب؛ فناوری نوظهور ارتقای بهره‌وری آب در نیروگاه‌های حرارتی ایران
حوزه تخصصی	آب، انرژی و فناوری‌های نوظهور صنعتی
مخاطبان اصلی	وزارت نیرو-پژوهشگاه نیرو- شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی- ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو - مدیران ارشد نیروگاه‌های حرارتی- معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری- شرکت‌های فعال در حوزه آب و محیط‌زیست
سفارش دهنده	پژوهشگاه نیرو
نویسندگان	دکتر مجید میرزایی (ایمیل سازمانی: mjmirzaei@nri.ac.ir)
ناظر	پژوهشکده تولید
پژوهشکده، گروه پژوهشی	پژوهشکده تولید- مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری نانو
تاریخ مطالعه	خرداد ۱۴۰۵

۱. مقدمه

طی دهه‌های گذشته، آب و انرژی همواره به عنوان دو بخش مستقل در سیاست‌گذاری‌های توسعه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. اما در سال‌های اخیر مشخص شده است که این دو حوزه ارتباطی بسیار عمیق‌تر از آن دارند که بتوان آنها را جداگانه مدیریت کرد. تولید انرژی به آب نیاز دارد و تأمین آب نیز بدون مصرف انرژی امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل در ادبیات بین‌المللی مفهوم Water-Energy Nexus یا پیوند آب و انرژی به یکی از محورهای اصلی برنامه‌ریزی زیرساختی تبدیل شده است. ایران یکی از کشورهایی است که این پیوند را با شدت بیشتری تجربه می‌کند. کاهش بارندگی، افت منابع آب زیرزمینی، افزایش تنش آبی در بسیاری از استان‌ها و رشد نیازهای صنعتی موجب شده است که آب به یک عامل محدودکننده توسعه تبدیل شود. در چنین شرایطی، صنایع آب‌بر و به‌ویژه نیروگاه‌های حرارتی بیش از سایر بخش‌ها در معرض فشارهای ناشی از کمبود آب قرار دارند. در بسیاری از نیروگاه‌های حرارتی، برج‌های خنک‌کننده تر نقش اصلی را در دفع حرارت و حفظ راندمان سیکل ایفا می‌کنند. با این حال، این سامانه‌ها به دلیل تبخیر آب و تخلیه بخشی از آب در گردش، مصرف‌کنندگان قابل توجه منابع آبی هستند. افزایش هزینه تأمین آب و محدودیت‌های قانونی برداشت آب موجب شده است که بهره‌برداران نیروگاهی به دنبال فناوری‌هایی باشند که بتوانند بهره‌وری مصرف آب را افزایش دهند. در این میان، فناوری نانوحباب به عنوان یکی از گزینه‌های نوظهور مورد توجه قرار گرفته است. نانوحباب‌ها حباب‌هایی با اندازه کمتر از ۲۰۰ نانومتر هستند که به دلیل پایداری طولانی‌مدت در آب، با افزایش اکسیژن محلول، کاهش کشش سطحی و جذب ذرات رسوب، بدون نیاز به مواد شیمیایی زیاد، امکان افزایش سیکل تغلیظ و کاهش مصرف آب در برج‌های خنک‌کننده را فراهم می‌کنند. برخلاف حباب‌های معمولی که در چند ثانیه به سطح آب می‌رسند و از بین می‌روند، نانوحباب‌ها می‌توانند برای مدت طولانی در آب پایدار بمانند. این ویژگی باعث می‌شود سطح تماس بسیار بزرگی میان گاز و آب ایجاد شده و فرآیندهایی مانند انتقال اکسیژن، کنترل رشد زیستی و بهبود کیفیت آب با کارایی بیشتری انجام شود. این فناوری نه به دنبال جایگزینی کامل برج‌های خنک‌کننده، بلکه به دنبال ارتقای عملکرد آنها است. از همین رو، نانوحباب را می‌توان در دسته فناوری‌های ارتقایی یا Retrofit Technologiesطبقه‌بندی کرد؛ فناوری‌هایی که با کمترین تغییر در زیرساخت‌های موجود، امکان دستیابی به بهبود عملکرد را فراهم می‌کنند.

۲. منطق بازار؛ چرا نانوحباب؟

برای درک اهمیت فناوری نانوحباب، ابتدا باید به این پرسش پاسخ داد که چه عواملی موجب شده‌اند صنایع جهان به دنبال چنین فناوری‌هایی باشند. در دهه‌های گذشته، راهبرد غالب مدیریت آب در صنایع بر افزایش ظرفیت تأمین آب استوار بود. هرگاه مصرف آب افزایش می‌یافت، راه‌حل اصلی توسعه منابع جدید آب یا احداث تأسیسات جدید بود. اما افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، محدودیت منابع آبی و الزامات زیست‌محیطی موجب شده است که این رویکرد به تدریج جای خود را به رویکرد بهره‌وری بدهد. امروزه در بسیاری از صنایع، کاهش حتی چند

درصدی مصرف آب می‌تواند ارزش اقتصادی قابل توجهی ایجاد کند. این موضوع به‌ویژه در نیروگاه‌های حرارتی اهمیت بیشتری دارد، زیرا بخش قابل توجهی از هزینه‌های بهره‌برداری و محدودیت‌های توسعه‌ای آنها به مدیریت آب وابسته است. در چنین شرایطی، صنایع به دنبال فناوری‌هایی هستند که بتوانند بدون بازطراحی کامل زیرساخت‌ها، مصرف آب را کاهش دهند. فناوری نانوحباب دقیقاً در پاسخ به همین نیاز شکل گرفته است. برخلاف برخی فناوری‌های جایگزین که نیازمند تغییرات گسترده در فرآیندها هستند، سامانه‌های نانوحباب معمولاً می‌توانند به زیرساخت‌های موجود اضافه شوند و عملکرد آنها را بهبود دهند. شرکت Moleaer در چندین پروژه آب صنعتی و برج‌های خنک‌کننده موفق شده است با استفاده از نانوحباب‌های اکسیژن و ازن، رشد زیستی و بیوفیلم را کاهش دهد. در برخی پروژه‌ها کاهش مصرف مواد شیمیایی و افزایش کیفیت آب در گردش گزارش شده است. برخی صنایع فولادی ژاپن از سامانه‌های نانوحباب برای کاهش رسوب و کنترل رشد زیستی در مدارهای آب در گردش استفاده کرده‌اند که منجر به افزایش پایداری بهره‌برداری شده است. اگرچه هنوز کاربرد نانوحباب در نیروگاه‌ها در مقیاس وسیع جهانی فراگیر نشده است، اما مطالعات پایلوت در سامانه‌های آب در گردش و برج‌های خنک‌کننده نتایج امیدوارکننده‌ای در زمینه کنترل بیوفولینگ و کاهش مصرف مواد شیمیایی نشان داده‌اند. اما جذابیت نانوحباب تنها در کاهش مصرف آب خلاصه نمی‌شود. کاهش مصرف مواد شیمیایی، بهبود کیفیت آب در گردش، کنترل رسوب و کاهش هزینه‌های نگهداری نیز از جمله مزایایی هستند که موجب شده‌اند این فناوری به یکی از حوزه‌های جذاب سرمایه‌گذاری در بازار آب صنعتی تبدیل شود. از منظر اقتصادی نیز روندهای جهانی نشان می‌دهد که ارزش واقعی این فناوری در حال انتقال از فروش تجهیزات به سمت فروش خدمات است. شرکت‌های پیشرو جهانی به جای تمرکز صرف بر فروش ژنراتورهای نانوحباب، به سمت ارائه راهکارهای جامع مدیریت آب، پایش هوشمند و قراردادهای مبتنی بر عملکرد حرکت کرده‌اند. این تحول می‌تواند برای شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی نیز آموزنده باشد.

۳. روندهای جهانی توسعه فناوری نانوحباب

فناوری نانوحباب نمونه‌ای از فناوری‌هایی است که مسیر توسعه آن از تحقیقات بنیادی آغاز شده و به تدریج وارد بازارهای صنعتی شده است. اگرچه استفاده از حباب‌های ریز در فرآیندهای انتقال جرم سابقه طولانی دارد، اما توجه به نانوحباب‌ها از اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی آغاز شد. در دهه نخست توسعه این فناوری، تمرکز اصلی بر شناخت سازوکارهای پایداری نانوحباب‌ها و رفتار آنها در محیط‌های مختلف بود. اما از حدود سال ۲۰۱۰ به بعد، پژوهش‌ها به سمت توسعه کاربردهای صنعتی حرکت کرد. در این دوره، نخستین شرکت‌های تخصصی شکل گرفتند و کاربردهای نانوحباب در تصفیه آب، آبزی‌پروری و کشاورزی توسعه یافت. رشد بحران آب در بسیاری از

کشورها، افزایش هزینه‌های تصفیه و فشارهای زیست‌محیطی موجب شد که نانوحباب به تدریج وارد صنایع آب‌بر شود. امروز این فناوری در بخش‌هایی نظیر معدن، صنایع غذایی، پالایشگاه‌ها، تصفیه‌خانه‌ها و سامانه‌های آب در گردش صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین نشانه‌های بلوغ این فناوری، رشد سرمایه‌گذاری‌های صنعتی است. طی سال‌های اخیر، شرکت‌های فعال در حوزه نانوحباب موفق به جذب ده‌ها میلیون دلار سرمایه شده‌اند و بازار این فناوری به سرعت در حال گسترش است. این روند نشان می‌دهد که نانوحباب از مرحله اثبات مفهوم عبور کرده و وارد مرحله توسعه بازار شده است.

رشد سریع ثبت اختراعات، نرخ رشد سالانه بازار حدود ۲۸ درصد و ورود شرکت‌های بزرگ صنعتی به حوزه نانوحباب نشان می‌دهد که این فناوری از مرحله پژوهش و توسعه عبور کرده و در حال ورود به دوره تجاری‌سازی گسترده است. در چنین شرایطی، فرصت اصلی ایران نه رقابت در تولید تجهیزات عمومی نانوحباب، بلکه توسعه کاربردهای تخصصی در حوزه‌های دارای مزیت ملی از جمله مدیریت آب در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه‌های حرارتی است.

در میان بازیگران جهانی، شرکت Moleaer در آمریکا به عنوان شناخته‌شده‌ترین بازیگر این حوزه مطرح است. این شرکت سامانه‌های نانوحباب را در صنایع آب و فاضلاب، کشاورزی، معدن و آب در گردش صنعتی توسعه داده و به‌تدریج مدل کسب‌وکار خود را از فروش تجهیزات به سمت ارائه خدمات مبتنی بر عملکرد سوق داده است. تجربه Moleaer نشان می‌دهد که ارزش اقتصادی آینده نانوحباب بیش از آنکه در فروش ژنراتورهای نانوحباب باشد، در تضمین کاهش مصرف آب، افزایش راندمان بهره‌برداری و ارائه خدمات پایش و تحلیل داده نهفته است. در ژاپن نیز شرکت‌هایی نظیر NanobOx و Shigenkaihatsu در توسعه نسل‌های اولیه فناوری نقش مهمی ایفا کرده‌اند. کره جنوبی نیز با شرکت‌هایی مانند KTN وارد حوزه کاربردهای صنعتی و زیست‌محیطی شده است. در چین نیز تعداد زیادی تولیدکننده تجهیزات نانوحباب شکل گرفته‌اند که با اتکا به ظرفیت تولید انبوه، در حال کاهش قیمت تجهیزات و گسترش بازار جهانی هستند. این روند نشان می‌دهد که رقابت جهانی در حوزه نانوحباب به‌تدریج از سطح فناوری به سطح مدل کسب‌وکار در حال انتقال است.

٤. رصد پتنت‌ها و مالکیت فکری

مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که از ابتدای دهه ۲۰۱۰ میلادی روند ثبت اختراعات مرتبط با فناوری نانوحباب شتاب قابل توجهی گرفته است. این رشد همزمان با ورود فناوری به کاربردهای صنعتی و افزایش سرمایه‌گذاری بخش خصوصی رخ داده است. در حال حاضر هزاران پتنت مرتبط با تولید، کنترل و کاربرد نانوحباب در پایگاه‌های

بین‌المللی ثبت شده است که بخش عمده آنها در کشورهای چین، آمریکا، ژاپن و کره جنوبی متمرکز هستند. تحلیل محتوای پتنت‌ها نشان می‌دهد که رقابت اصلی در سه حوزه جریان دارد. نخست، توسعه تجهیزات و ژنراتورهای تولید نانوحباب با راندمان بالاتر و مصرف انرژی کمتر است. دوم، توسعه فرآیندهای کاربردی در حوزه تصفیه آب، کشاورزی و صنایع معدنی است. سوم، طراحی سامانه‌های هوشمند کنترل و پایش عملکرد نانوحباب‌ها در کاربردهای صنعتی است. نکته قابل توجه آن است که بخش عمده فعالیت‌های پتنتی بر توسعه تجهیزات متمرکز شده است، در حالی که هنوز فضای قابل توجهی برای نوآوری در کاربردهای تخصصی وجود دارد. این موضوع برای ایران اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا رقابت با تولیدکنندگان بزرگ تجهیزات کار ساده‌ای نیست، اما توسعه راهکارهای تخصصی برای مدیریت آب نیروگاهی می‌تواند فرصت‌های جدیدی ایجاد کند. از منظر راهبردی، تحلیل پتنت‌ها نشان می‌دهد که ارزش اقتصادی آینده نانوحباب احتمالاً کمتر در فروش تجهیزات و بیشتر در توسعه راهکارهای کاربردی و مدل‌های کسب‌وکار مبتنی بر عملکرد نهفته است. بررسی داده‌های مالکیت فکری نشان می‌دهد که فناوری نانوحباب وارد مرحله رقابت جهانی شده است. بر اساس گزارش‌های بین‌المللی تحلیل پتنت، تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۱۵٬۸۰۰ پتنت مرتبط با فناوری نانوحباب در جهان ثبت شده است. تحلیل روند زمانی ثبت اختراعات نشان می‌دهد که از حدود سال ۲۰۱۶ به بعد، نرخ ثبت پتنت‌ها رشد شتابانی پیدا کرده است. این موضوع معمولاً یکی از نشانه‌های ورود یک فناوری به مرحله بلوغ صنعتی محسوب می‌شود.

نکته مهم‌تر آن است که بخش عمده پتنت‌ها به طراحی ژنراتورها، نازل‌ها و سامانه‌های تولید نانوحباب اختصاص یافته است. در مقابل، تعداد پتنت‌های مرتبط با کاربردهای تخصصی در برج‌های خنک‌کننده نیروگاهی، مدیریت هوشمند آب در گردش و مدل‌های بهره‌برداری بسیار کمتر است. این شکاف می‌تواند برای شرکت‌های فناور ایرانی یک فرصت نوآوری ایجاد کند.

۵. جغرافیای فناوری و فرصت ایران

بررسی جغرافیای توسعه فناوری نانوحباب نشان می‌دهد که هر یک از بازیگران جهانی نقش متفاوتی در زنجیره ارزش این فناوری ایفا می‌کنند. ژاپن را می‌توان خاستگاه علمی نانوحباب دانست. بسیاری از مبانی نظری مرتبط با پایداری نانوحباب‌ها و رفتار فیزیکی آنها توسط دانشگاه‌ها و مؤسسات پژوهشی این کشور توسعه یافته است. آمریکا در حوزه تجاری‌سازی پیشتاز است. شرکت‌های آمریکایی توانسته‌اند فناوری نانوحباب را از محیط آزمایشگاهی به بازارهای صنعتی منتقل کنند و مدل‌های تجاری مبتنی بر خدمات را توسعه دهند. موفقیت آنها نشان می‌دهد که بازار آینده نانوحباب صرفاً بازار تجهیزات نخواهد بود. چین نیز با اتکا به ظرفیت بالای تولید

صنعتی خود در حال تبدیل شدن به یکی از بازیگران اصلی بازار تجهیزات نانوحباب است. تعداد بالای پتنت‌های ثبت‌شده در این کشور نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری گسترده در این حوزه است.

در چنین فضایی، پرسش اصلی این است که ایران چه جایگاهی می‌تواند در این رقابت به دست آورد؟

پاسخ این پرسش را باید در شرایط اقلیمی و صنعتی کشور جستجو کرد. ایران یکی از کشورهایی است که بیشترین فشار ناشی از تنش آبی را تجربه می‌کند. از سوی دیگر، بخش بزرگی از زیرساخت‌های صنعتی کشور شامل نیروگاه‌ها، مجتمع‌های فولادی، پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها به سامانه‌های آب در گردش وابسته هستند. در نتیجه، مزیت رقابتی ایران احتمالاً در تولید انبوه تجهیزات نانوحباب شکل نخواهد گرفت، بلکه در توسعه راهکارهای تخصصی برای مدیریت آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و صادرات این راهکارها به کشورهای منطقه ایجاد خواهد شد.

٦. تجربه زیست‌بوم فناوری نانو ایران در توسعه کاربردهای نانوحباب

یکی از مزیت‌های مهم ایران در توسعه فناوری نانوحباب، وجود زیست‌بوم نسبتاً بالغ فناوری نانو است. طی بیش از دو دهه گذشته، سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی در توسعه زیرساخت‌های فناوری نانو انجام شده و کشور توانسته است جایگاه قابل قبولی در تولید دانش، توسعه شرکت‌های فناور و تجاری‌سازی برخی محصولات نانویی به دست آورد. ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو نقش مهمی در شکل‌گیری این زیست‌بوم ایفا کرده است. ایجاد شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو، حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان، توسعه بازار و ایجاد ارتباط میان دانشگاه و صنعت از جمله اقداماتی بوده که زمینه ورود فناوری نانو به کاربردهای صنعتی را فراهم کرده است. در سال‌های اخیر، فناوری نانوحباب نیز به تدریج مورد توجه شرکت‌های دانش‌بنیان قرار گرفته است. تعدادی از شرکت‌های داخلی موفق به توسعه سامانه‌های تولید نانوحباب شده‌اند و پروژه‌هایی در حوزه کشاورزی، آبزی‌پروری، تصفیه آب و صنایع فرآیندی اجرا شده است. اهمیت این موضوع در آن است که ایران در حوزه نانوحباب از نقطه صفر آغاز نمی‌کند. بخش مهمی از زیرساخت‌های علمی و فناورانه مورد نیاز ایجاد شده است و اکنون چالش اصلی نه توسعه فناوری، بلکه توسعه بازار و اثبات ارزش اقتصادی آن در مقیاس صنعتی است. در سال‌های اخیر چندین شرکت دانش‌بنیان داخلی موفق به طراحی و ساخت سامانه‌های تولید نانوحباب شده‌اند و پروژه‌هایی در حوزه کشاورزی، آبزی‌پروری، تصفیه آب و صنایع فرآیندی اجرا شده است. اگرچه مقیاس این پروژه‌ها هنوز محدود است، اما نتایج آنها نشان می‌دهد که بخش مهمی از ریسک فناورانه این حوزه در کشور کاهش یافته است.

به بیان دیگر، مسئله اصلی ایران دیگر «آیا می‌توان سامانه نانوحباب ساخت؟» نیست؛ بلکه «چگونه می‌توان بازار کاربردهای صنعتی نانوحباب را توسعه داد؟» است.

۷. مسئله آب در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه‌های حرارتی ایران

برج‌های خنک‌کننده یکی از مهم‌ترین مصرف‌کنندگان آب در نیروگاه‌های حرارتی هستند. وظیفه اصلی این سامانه‌ها دفع حرارت و حفظ راندمان فرآیند تولید برق است. با این حال، همین فرآیند منجر به مصرف قابل توجه آب می‌شود. مصرف آب در برج‌های خنک‌کننده عمدتاً از سه مسیر رخ می‌دهد: تبخیر، رانش قطرات آب و تخلیه آب تغلیظ‌شده. از میان این سه عامل، تبخیر بخش اجتناب‌ناپذیر فرآیند است، اما تخلیه آب ناشی از افزایش غلظت املاح تا حدی قابل مدیریت است. رسوب‌گذاری، خوردگی و رشد زیستی سه عامل اصلی محدودکننده افزایش سیکل تغلیظ هستند. هرچه این پدیده‌ها شدیدتر باشند، بهره‌بردار ناچار است آب بیشتری را از مدار خارج کند و آب تازه بیشتری جایگزین نماید.

در نیروگاه‌های واقع در مناطق خشک کشور، این مسئله اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. در چنین مناطقی، کاهش حتی چند درصدی مصرف آب می‌تواند آثار اقتصادی و راهبردی قابل توجهی داشته باشد.

۸. نقش فناوری نانوحباب در بهبود عملکرد برج‌های خنک‌کننده

یکی از مهم‌ترین پرسش‌ها این است که نانوحباب دقیقاً چه مشکلی را در برج‌های خنک‌کننده حل می‌کند؟

نخستین اثر نانوحباب‌ها بهبود شرایط انتقال جرم و اکسیژن در محیط آبی است. این ویژگی می‌تواند به کنترل برخی فرآیندهای زیستی و کاهش تشکیل بیوفیلم کمک کند. دومین اثر مهم، کاهش تمایل به تشکیل رسوبات پایدار در سطوح تبادل حرارتی است. هرچند نانوحباب‌ها جایگزین کامل روش‌های کنترل رسوب نیستند، اما می‌توانند بخشی از بار عملیاتی سامانه‌های شیمیایی را کاهش دهند. سومین اثر، امکان افزایش سیکل تغلیظ است. هرچه سیکل تغلیظ افزایش یابد، میزان آب تخلیه‌شده کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه مصرف کل آب نیروگاه کمتر می‌شود. چهارمین اثر، کاهش مصرف مواد شیمیایی مورد استفاده در کنترل خوردگی، رسوب و رشد زیستی است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، آثار زیست‌محیطی مثبتی نیز به همراه دارد.بنابراین ارزش نانوحباب در نیروگاه‌ها نه در جایگزینی تجهیزات موجود، بلکه در افزایش بهره‌وری سامانه‌های فعلی نهفته است. یکی از مهم‌ترین پرسش‌های مرتبط با توسعه فناوری نانوحباب در صنعت برق آن است که این فناوری چه ارزش اقتصادی ملموسی برای نیروگاه‌ها ایجاد می‌کند. اگرچه میزان اثربخشی نانوحباب به شرایط هر نیروگاه وابسته است، اما انجام یک تحلیل سناریویی می‌تواند تصویری از ظرفیت بالقوه این فناوری ارائه دهد. یکی از چالش‌های اصلی در ارزیابی

اقتصادی فناوری نانوحباب، تنوع بسیار زیاد شرایط بهره‌برداری در نیروگاه‌های حرارتی است. میزان مصرف آب در نیروگاه‌ها تابعی از عوامل متعددی از جمله ظرفیت واحد، نوع برج خنک‌کننده، شرایط اقلیمی محل استقرار، کیفیت آب جبرانی، راهبرد بهره‌برداری و میزان سیکل تغلیظ انتخاب‌شده است. از منظر فنی، مهم‌ترین اثر بالقوه نانوحباب در برج‌های خنک‌کننده را می‌توان در بهبود کیفیت آب در گردش و کاهش عوامل محدودکننده افزایش سیکل تغلیظ جستجو کرد. در بسیاری از نیروگاه‌ها، رسوب‌گذاری، رشد زیستی و تشکیل بیوفیلم موجب می‌شود بهره‌برداران ناچار به تخلیه بخشی از آب در گردش (Blowdown) و جایگزینی آن با آب تازه شوند. هرچه امکان افزایش سیکل تغلیظ فراهم شود، حجم آب تخلیه‌شده کاهش یافته و در نتیجه مصرف آب جبرانی نیروگاه نیز کمتر خواهد شد. بر این اساس، تحلیل ظرفیت صرفه‌جویی آب ناشی از نانوحباب بهتر است بر مبنای بهبود سیکل تغلیظ و کاهش آب بلودان انجام شود. در یک تحلیل مفهومی، می‌توان سناریوهای زیر را برای ارزیابی اولیه در نظر گرفت:

سناریو	افزایش سیکل تغلیظ (٪)	کاهش تقریبی آب بلودان (٪)
محافظه‌کارانه	۱۰	۳-۵
محتمل	۲۰	۵-۸
خوش‌بینانه	۳۰	۸-۱۲

این ارقام صرفاً به عنوان یک چارچوب تحلیلی اولیه ارائه شده‌اند و تحقق آنها نیازمند انجام پایلوت و اندازه‌گیری میدانی در شرایط واقعی نیروگاه است. با این حال، حتی در سناریوهای محافظه‌کارانه نیز کاهش چند درصدی آب بلودان در نیروگاه‌های دارای برج خنک‌کننده تر می‌تواند به صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف آب، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش تاب‌آوری نیروگاه در شرایط تنش آبی منجر شود. نکته مهم آن است که ارزش اقتصادی نانوحباب صرفاً در کاهش مصرف آب خلاصه نمی‌شود. در صورت اثربخشی فناوری در کنترل بیوفولینگ، کاهش رسوب و بهبود کیفیت آب در گردش، منافع دیگری نظیر کاهش مصرف مواد شیمیایی، کاهش دفعات شست‌وشوی تجهیزات، افزایش پایداری عملکرد برج خنک‌کننده و بهبود قابلیت اطمینان بهره‌برداری نیز حاصل خواهد شد. از این رو، ارزیابی نهایی این فناوری باید بر مبنای مجموعه‌ای از شاخص‌های فنی، اقتصادی و بهره‌برداری انجام شود و نه صرفاً بر پایه میزان صرفه‌جویی مستقیم آب.

۹. تحلیل بازار و مدل‌های کسب‌وکار

بررسی روندهای جهانی نشان می‌دهد که بازار نانوحباب در حال گذار از فروش تجهیزات به سمت فروش خدمات است. نسل نخست این بازار مبتنی بر فروش دستگاه‌های تولید نانوحباب بود. در این مرحله شرکت‌ها عمدتاً به دنبال فروش تجهیزات بودند. نسل دوم با ارائه خدمات مهندسی و طراحی سامانه‌های اختصاصی شکل گرفت. در نسل سوم، قراردادهای مبتنی بر عملکرد ظهور کردند. در این مدل، مشتری تجهیزات را خریداری نمی‌کند، بلکه بابت کاهش مصرف آب یا افزایش راندمان هزینه پرداخت می‌کند. نسل چهارم که اکنون در حال شکل‌گیری است، مبتنی بر مدیریت هوشمند آب است. در این مدل، نانوحباب تنها یکی از اجزای یک سامانه بزرگ‌تر شامل حسگرها، تحلیل داده و الگوریتم‌های هوشمند خواهد بود. این روند می‌تواند برای شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی بسیار مهم باشد، زیرا ارزش افزوده اصلی در آینده احتمالاً در نرم‌افزار، داده و خدمات خواهد بود نه در سخت‌افزار.

۱۰. فرصت شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی

تحلیل شکاف بازار نشان می‌دهد که هنوز فضای قابل توجهی برای ورود بازیگران جدید وجود دارد. شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی می‌توانند به جای رقابت مستقیم با تولیدکنندگان بزرگ تجهیزات، بر توسعه خدمات مدیریت آب تمرکز کنند. این خدمات می‌تواند شامل طراحی سامانه، پایش عملکرد، تحلیل داده، تضمین صرفه‌جویی و خدمات بهره‌برداری باشد. همچنین کشورهای منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا با چالش‌های مشابهی در حوزه آب مواجه هستند. این موضوع می‌تواند فرصت مناسبی برای صادرات خدمات فنی و مهندسی مبتنی بر نانوحباب ایجاد کند.

۱۱. نقشه راه توسعه فناوری در ایران

در افق کوتاه‌مدت (۱۴۰۵ تا ۱۴۰۷)، با توجه به سطح بلوغ فناوری، مهم‌ترین اقدام پیشنهادی در شرایط فعلی، اجرای یک پایلوت صنعتی در یکی از نیروگاه‌های دارای برج خنک‌کننده تر است. هدف این پایلوت باید اندازه‌گیری اثر فناوری بر شاخص‌هایی نظیر مصرف آب جبرانی، نرخ بلودان، مصرف مواد شیمیایی، شاخص‌های رسوب‌گذاری و رشد زیستی باشد. نتایج این پایلوت می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای توسعه کاربرد فناوری در سایر نیروگاه‌های کشور قرار گیرد.

در افق میان‌مدت (۱۴۰۸ تا ۱۴۱۱)، توسعه بازار و شکل‌گیری مدل‌های کسب‌وکار مبتنی بر عملکرد باید در دستور کار قرار گیرد. در این مرحله، استانداردها، دستورالعمل‌های ارزیابی عملکرد و سازوکارهای تأمین مالی نیز باید توسعه یابند.

در افق بلندمدت (۱۴۱۲ تا ۱۴۱۵)، نانوحباب باید به بخشی از سامانه‌های هوشمند مدیریت آب صنعتی تبدیل شود و با فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا صنعتی، هوش مصنوعی و تحلیل داده تلفیق گردد

۱۲. جمع‌بندی نهایی

فناوری نانوحباب را نباید صرفاً یک فناوری تصفیه آب یا یک تجهیز صنعتی جدید دانست. اهمیت راهبردی این فناوری در آن است که می‌تواند محل تلاقی سه اولویت ملی کشور باشد: مدیریت بحران آب، افزایش تاب‌آوری صنعت برق و توسعه اقتصاد دانش‌بنیان. روندهای جهانی نشان می‌دهد که نانوحباب وارد مرحله بلوغ فناوری شده است. رشد سرمایه‌گذاری‌ها، افزایش فعالیت‌های پتنتی، توسعه شرکت‌های تخصصی و گسترش کاربردهای صنعتی همگی مؤید این موضوع هستند. برای ایران، فرصت اصلی در رقابت بر سر تولید تجهیزات عمومی نانوحباب نیست؛ بلکه در توسعه راهکارهای تخصصی مدیریت آب برای صنایع آب‌بر و به‌ویژه نیروگاه‌های حرارتی نهفته است. اگر این مسیر به درستی دنبال شود، نانوحباب می‌تواند به یکی از فناوری‌های کلیدی ارتقای بهره‌وری آب در صنعت برق کشور و بستری برای شکل‌گیری نسل جدیدی از کسب‌وکارهای دانش‌بنیان تبدیل شود.

۱۳. پیشنهادات اجرایی

۱. تشکیل کارگروه تخصصی نانوحباب در شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی با حضور پژوهشگاه نیرو و ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو.

۲. تعریف و تخصیص بودجه برای پایلوت اجباری در یکی از نیروگاه‌های خشک کشور حداکثر ظرف ۶ ماه آینده.

۳. طراحی استاندارد ارزیابی عملکرد شامل شاخص‌های کلیدی: کاهش مصرف آب (m^3/MWh) ، افزایش سیکل تغلیظ، کاهش مصرف مواد شیمیایی (kg/day) ، کاهش دفعات شستشوی شیمیایی برج.

٤. الزام به گزارش‌دهی سالانه مصرف آب نیروگاه‌ها به تفکیک تبخیر، رانش و تخلیه و شناسایی نیروگاه‌های دارای اولویت برای نصب نانوحباب.

٥. ایجاد سازوکار تأمین مالی از محل صرفه‌جویی آب (قراردادهای تضمین صرفه‌جویی با شرکت‌های دانش‌بنیان).

٦. برنامه انتقال دانش و توانمندسازی برای اپراتورهای نیروگاه‌ها شامل دوره‌های آموزشی و بازدید از پایلوت موفق.

۱۴. منابع و مراجع

1. International Energy Agency (IEA). (2020). *Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities*. Paris: IEA.
2. International Energy Agency (IEA). (2023). *Electricity Information 2023*. Paris: IEA.
3. Temesgen, T., Bui, T. T., Han, M., Kim, T. I., & Park, H. (2017). “Micro and Nanobubble Technologies as a New Horizon for Water-Treatment Techniques: A Review.” *Advances in Colloid and Interface Science*, 246, 40–51.
4. Agarwal, A., Ng, W. J., & Liu, Y. (2011). “Principle and Applications of Microbubble and Nanobubble Technology for Water Treatment.” *Chemosphere*, 84(9), 1175–1180.
5. Pal, P., Kioka, A., Arakawa, E., Anzai, S., & Tsuji, T. (2025). Nanobubble technology: An environmentally sustainable approach for gas dissolution and water chemistry modulation. *Chemical Engineering Journal: Green and Sustainable*, 100021.
6. Wang, Y., & Wang, T. (2023). Preparation method and application of nanobubbles: A review. *Coatings*, *13*(9), 1510.
7. Michailidi, E. D., Bomis, G., Varoutoglou, A., Efthimiadou, E. K., Mitropoulos, A. C., & Favvas, E. P. (2019). Fundamentals and applications of nanobubbles. In *Interface Science and Technology* (Vol. 30, pp. 69-99). Elsevier.
8. PatentPC. (2025). *Nanobubbles Patent Landscape Report 2025*. Published via Yahoo Finance. Available at: https://finance.yahoo.com/news/nanobubbles-patent-landscape-report-2025-135800178.html
9. گزارش‌های منتشرشده توسط ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو در حوزه توسعه بازار فناوری نانو و کاربردهای صنعتی نانوحباب