

مدل‌های مالی و مشوق‌های اقتصادی برای تجاری‌سازی فناوری نانو

در صنعت برق

چکیده گزارش سیاستی:

تجاری‌سازی فناوری نانو در صنعت برق، با وجود ظرفیت بالای آن در افزایش راندمان نیروگاه‌ها، کاهش تلفات شبکه و بهبود دوام تجهیزات، همچنان با موانع مالی، مقرراتی و ریسک‌پذیری پایین بهره‌برداران مواجه است. این گزارش سیاستی با تمرکز بر مدل‌های مالی و مشوق‌های اقتصادی، به بررسی و طراحی سازوکارهایی می‌پردازد که بتواند فاصله میان توسعه آزمایشگاهی فناوری نانو و استقرار صنعتی آن در صنعت برق کشور را کاهش دهد. در این راستا، مدل‌های سرمایه‌گذاری مشترک میان شرکت‌های برق و شرکت‌های دانش‌بنیان، مشوق‌های مالیاتی هدفمند، خرید تضمینی مشروط و تسریع فرآیندهای اخذ تأییدیه‌های فنی و استاندارد مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. همچنین، نقش وزارت نیرو به‌عنوان تنظیم‌گر، تسهیل‌گر و محرک بازار فناوری نانو تبیین شده و یک بسته اجرایی عملیاتی برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و افزایش انگیزه پذیرش فناوری ارائه می‌شود. نتایج این گزارش نشان می‌دهد که ترکیب سیاست‌های مالی هوشمند، پالیسی‌های تضمین‌شده و مسیرهای مقرراتی تسریع‌شده می‌تواند به شکل مؤثری زمینه تجاری‌سازی فناوری‌های نانویی اولویت‌دار، به‌ویژه در حوزه نیروگاهی، را فراهم کرده و منجر به ارتقای بهره‌وری، کاهش هزینه‌های بلندمدت و تقویت زیست‌بوم نوآوری در صنعت برق شود.

شناسنامه گزارش سیاستی

عنوان گزارش	مدل‌های مالی و مشوق‌های اقتصادی برای تجاری‌سازی فناوری نانو در صنعت برق
حوزه تخصصی	تولید، انتقال و توزیع برق
مخاطبان اصلی	وزارت نیرو-پژوهشگاه نیرو-شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی-مدیران ارشد نیروگاه‌ها-شرکت‌های تعمیرات نیروگاهی و بهره‌برداری از تجهیزات-معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری (ستاد توسعه فناوری نانو)-شرکت‌های برق منطقه‌ای
سفارش دهنده	پژوهشگاه نیرو
نویسندگان	دکتر مجید میرزایی (ایمیل سازمانی: mjmirzaei@nri.ac.ir) - دکتر نسترن ریاحی نوری - دکتر حسین کوهانی
ناظر	پژوهشکده تولید
پژوهشکده، گروه پژوهشی	پژوهشکده تولید-مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری نانو
تاریخ مطالعه	بهمن ۱۴۰۴

مقدمه

فناوری نانو در دهه‌های اخیر به یکی از پیشران‌های اصلی تحول در صنایع زیرساختی تبدیل شده است و صنعت برق، به‌عنوان ستون فقرات توسعه اقتصادی و امنیت انرژی، از جمله حوزه‌هایی است که می‌تواند بیشترین بهره را از این فناوری ببرد. کاربرد نانومواد در تجهیزاتی نظیر کابل‌ها، عایق‌ها، ترانسفورماتورها، سامانه‌های خنک‌کاری نیروگاهی، باتری‌ها و حسگرهای شبکه هوشمند، ظرفیت قابل توجهی برای افزایش راندمان، کاهش تلفات، بهبود قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ایجاد می‌کند. با این حال، مسیر گذار از توسعه آزمایشگاهی فناوری‌های نانویی به استقرار صنعتی و تجاری‌سازی در صنعت برق، مسیری پرریسک، پرهزینه و زمان‌بر است.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های این گذار، فقدان مدل‌های مالی و مشوق‌های اقتصادی متناسب با ماهیت پرریسک فناوری‌های نوظهور است. شرکت‌های برق، به دلیل حساسیت بالای تجهیزات و الزام به تأمین پایدار انرژی، معمولاً رویکردی محافظه‌کارانه در پذیرش فناوری‌های جدید اتخاذ می‌کنند، در حالی که شرکت‌های دانش‌بنیان نیز بدون تضمین بازار، توان سرمایه‌گذاری در مقیاس صنعتی را ندارند. این عدم هم‌راستایی، شکافی ساختاری میان عرضه فناوری و تقاضای صنعتی ایجاد کرده است.

در چنین شرایطی، نقش سیاست‌گذاری هوشمند و مداخله هدفمند دولت، به‌ویژه وزارت نیرو، اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. طراحی مدل‌های سرمایه‌گذاری مشترک، مشوق‌های مالیاتی، ابزارهای کاهش ریسک و سازوکارهای تسریع تأییدیه‌های فنی می‌تواند به‌عنوان اهرم‌های کلیدی، مسیر تجاری‌سازی فناوری نانو در صنعت برق را هموار سازد. این گزارش با هدف ارائه چارچوبی اجرایی و واقع‌بینانه، به تحلیل این ابزارها و ارائه بسته‌ای پیشنهادی برای تسهیل استقرار فناوری‌های نانویی در زنجیره ارزش صنعت برق کشور می‌پردازد.

۱- مسئله سیاستی

صنعت برق به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی کشور، همواره با فشارهای هم‌زمانی نظیر افزایش تقاضا، محدودیت منابع مالی، الزامات پایداری شبکه، فرسودگی تجهیزات و تشدید استانداردهای ایمنی و محیط‌زیستی مواجه است. در این میان، فناوری نانو با فراهم‌کردن راهکارهایی نظیر نانوپوشش‌های مقاوم به آلودگی و خوردگی، نانوسیالات خنک‌کننده با ضریب انتقال حرارت بالا، نانوکامپوزیت‌های عایقی با دوام بیشتر و نانوحسگرهای دقیق برای پایش هوشمند شبکه، ظرفیت بالقوه‌ای برای پاسخ به این چالش‌ها ایجاد کرده است. با وجود این ظرفیت‌ها، نفوذ فناوری‌های نانویی به بازار صنعت برق و به‌ویژه استقرار آن‌ها در مقیاس صنعتی، به‌طور معناداری پایین‌تر از سطح انتظار است.

ریشه این شکاف را باید در مجموعه‌ای از موانع سیاستی، اقتصادی و نهادی جست‌وجو کرد. از یک سو، شرکت‌های برق و بهره‌برداران شبکه به دلیل حساسیت بالای تجهیزات، پیامدهای سنگین خاموشی و الزامات قابلیت اطمینان، با رویکردی محافظه‌کارانه نسبت به پذیرش فناوری‌های نوظهور عمل می‌کنند. ریسک بالای سرمایه‌گذاری اولیه، نبود داده‌های عملکردی

بلندمدت و نگرانی از پیامدهای فنی پیش‌بینی نشده، باعث می‌شود تصمیم‌گیران ترجیح دهند از فناوری‌های سنتی و اثبات‌شده حتی با راندمان پایین‌تر استفاده کنند.

از سوی دیگر، شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در حوزه نانو، اگرچه توان فنی و نوآوری لازم را در اختیار دارند، اما غالباً از منابع مالی کافی برای اجرای پایلوت‌های صنعتی در مقیاس واقعی برخوردار نیستند. هزینه‌های بالای تست‌های میدانی، تأمین تجهیزات، بیمه ریسک، و تطبیق با الزامات فنی صنعت برق، مانعی جدی برای عبور این شرکت‌ها از مرحله آزمایشگاهی به مرحله تجاری‌سازی ایجاد می‌کند. این مسئله به‌ویژه در مورد فناوری‌هایی مانند نانوسیالات نیروگاهی یا نانو پوشش‌های تجهیزات ولتاژ بالا که نیازمند آزمون‌های طولانی‌مدت هستند، تشدید می‌شود.

علاوه بر این، فرآیندهای اخذ تأییدیه‌های فنی و عملکردی برای فناوری‌های نوین، در بسیاری موارد طولانی، پرهزینه و فاقد مسیر مشخص است. نبود چارچوب‌های ارزیابی متناسب با ویژگی‌های فناوری نانو، عدم شفافیت در معیارهای پذیرش، و هم‌پوشانی نهادهای تصمیم‌گیر، موجب افزایش عدم قطعیت برای سرمایه‌گذاران و توسعه‌دهندگان فناوری می‌شود. در چنین شرایطی، حتی فناوری‌هایی که از نظر فنی قابلیت رقابت دارند، در چرخه تأیید و پذیرش متوقف می‌مانند.

در نهایت، نبود مشوق‌های اقتصادی متناسب با ریسک فناوری‌های نوظهور نظیر معافیت‌های مالیاتی، تضمین خرید، یا مشارکت دولت در ریسک پایلوت باعث می‌شود توازن هزینه فایده برای بازیگران اصلی بازار به نفع عدم ورود به فناوری‌های نانویی باقی بماند. نتیجه این وضعیت، شکل‌گیری «دره مرگ تجاری‌سازی» است؛ جایی که فناوری‌های نانو، پس از عبور از مرحله تحقیق و توسعه، به دلیل نبود سازوکارهای حمایتی مؤثر، پیش از رسیدن به بازار پایدار متوقف می‌شوند.

بدون مداخله هدفمند سیاست‌گذار و طراحی ابزارهای مالی و نهادی متناسب، این چرخه معیوب تداوم خواهد یافت و صنعت برق از منافع بالقوه فناوری نانو در بهبود راندمان، کاهش هزینه‌های چرخه عمر و افزایش تاب‌آوری شبکه محروم خواهد ماند.

۲- هدف گزارش سیاستی

هدف این گزارش سیاستی، طراحی و پیشنهاد یک چارچوب منسجم برای رفع گلوگاه‌های مالی و نهادی تجاری‌سازی فناوری نانو در صنعت برق کشور است؛ چارچوبی که بتواند فاصله میان توسعه فناورانه و استقرار صنعتی را کاهش داده و مسیر ورود فناوری‌های نانویی منتخب به بازار واقعی تجهیزات و خدمات برق را هموار کند. این گزارش با تمرکز بر نقش تنظیم‌گری و مداخله هدفمند دولت به‌ویژه وزارت نیرو می‌کوشد سازوکارهایی عملی برای هم‌راستا کردن منافع بازیگران مختلف اکوسیستم نوآوری ارائه دهد.

به‌طور مشخص، اهداف اصلی این گزارش عبارت‌اند از:

- کاهش ریسک مالی تجاری سازی فناوری نانو: این گزارش به دنبال شناسایی و پیشنهاد ابزارهای مالی و سیاستی است که بتوانند ریسک های اولیه سرمایه گذاری در فناوری های نانویی را به ویژه در مرحله پایلوت صنعتی و ورود اولیه به بازار کاهش دهند و عدم قطعیت اقتصادی را برای سرمایه گذاران و بهره برداران صنعت برق محدود کنند.
 - تقسیم ریسک میان دولت، صنعت برق و شرکت های دانش بنیان: یکی از اهداف محوری گزارش، طراحی مدل هایی برای توزیع متوازن ریسک میان بازیگران کلیدی است؛ به گونه ای که بار ریسک به صورت نامتناسب بر دوش شرکت های دانش بنیان یا بهره برداران شبکه قرار نگیرد و دولت بتواند با ابزارهای تنظیم گری، ضمانت و مشارکت هدفمند، نقش تسهیل گر ایفا کند.
 - ایجاد انگیزه های اقتصادی برای پذیرش فناوری های نو: گزارش تلاش می کند مجموعه ای از مشوق های اقتصادی شامل مشوق های مالیاتی، خرید تضمینی، حمایت از پایلوت ها و تسهیل دسترسی به منابع مالی را پیشنهاد دهد که پذیرش فناوری های نانویی را برای شرکت های برق از منظر اقتصادی توجیه پذیر و رقابتی سازد.
 - تسریع عبور فناوری از مرحله پایلوت به بازار واقعی: در نهایت، هدف این گزارش ارائه راهکارهایی برای کوتاه سازی مسیر تجاری سازی و کاهش فاصله زمانی میان موفقیت های آزمایشگاهی و استقرار صنعتی است؛ به گونه ای که فناوری های نانویی دارای ارزش افزوده واقعی بتوانند در بازه زمانی قابل قبول به بخشی از زنجیره تأمین و بهره برداری صنعت برق کشور تبدیل شوند.
- این اهداف، مبنای تحلیل ها و پیشنهادهای سیاستی بعدی گزارش را شکل می دهند و چارچوبی برای ارزیابی اثربخشی ابزارهای مالی، نهادی و تنظیم گری پیشنهادی فراهم می کنند.

۳- مدل های مالی پیشنهادی برای تجاری سازی فناوری نانو

تجاری سازی فناوری های نانویی در صنعت برق، به دلیل ماهیت نوآورانه، پیچیدگی فنی و حساسیت بالای زیرساخت های این صنعت، با ریسک های مالی، عملیاتی و نهادی قابل توجهی همراه است. عدم قطعیت نسبت به عملکرد فناوری در مقیاس صنعتی، هزینه های بالای اجرای پایلوت های میدانی، و طولانی بودن فرآیند اخذ تأییدیه های فنی و بهره برداری، موجب می شود بسیاری از شرکت های دانش بنیان توان یا انگیزه لازم برای ورود مستقل به بازار صنعت برق را نداشته باشند. از سوی دیگر، شرکت های برق نیز به دلیل ریسک های بهره برداری و مسئولیت پایداری شبکه، تمایل محدودی به پذیرش مستقیم فناوری های نوظهور دارند. در این چارچوب، طراحی مدل های مالی هدفمند که بتواند ریسک ها را میان بازیگران اصلی توزیع کند، شرط لازم برای تسریع فرآیند تجاری سازی فناوری نانو در صنعت برق است. در ادامه، سه مدل مالی پیشنهادی ارائه می شود که هر یک می تواند بخشی از شکاف میان مرحله پایلوت و ورود به بازار واقعی را پوشش دهد.

۳-۱- مدل سرمایه‌گذاری مشترک (Co-Investment Model)

مدل سرمایه‌گذاری مشترک بر این اصل استوار است که ریسک‌های توسعه و پایلوت فناوری نانو نباید صرفاً بر دوش شرکت دانش‌بنیان قرار گیرد، بلکه میان بازیگران اصلی زنجیره ارزش صنعت برق توزیع شود. در این مدل، شرکت‌های برق، شرکت‌های دانش‌بنیان و دولت (یا وزارت نیرو) به‌صورت هم‌زمان و هماهنگ در توسعه، اجرای پایلوت و ارزیابی فناوری مشارکت می‌کنند.

در این ساختار، شرکت برق به‌عنوان بهره‌بردار نهایی فناوری، نقش کلیدی در فراهم‌سازی بستر عملیاتی ایفا می‌کند. این نقش شامل تأمین محل اجرای پایلوت، ارائه داده‌های واقعی بهره‌برداری، و مشارکت در سرمایه‌گذاری به‌صورت نقدی یا غیرنقدی (نظیر تجهیزات، نیروی فنی یا دسترسی به شبکه) است. مشارکت فعال شرکت برق موجب می‌شود پایلوت از ابتدا بر اساس نیازهای واقعی شبکه طراحی شده و نتایج آن برای تصمیم‌گیری‌های آتی معتبر تلقی شود.

در مقابل، شرکت دانش‌بنیان مسئولیت ارائه فناوری، دانش فنی، نیروی انسانی متخصص و اجرای عملیاتی پایلوت را بر عهده دارد. همچنین بهینه‌سازی فناوری بر اساس بازخوردهای میدانی و تطبیق آن با شرایط واقعی بهره‌برداری شبکه، بخش مهمی از تعهدات این شرکت محسوب می‌شود. این تعامل نزدیک میان توسعه‌دهنده فناوری و بهره‌بردار، احتمال موفقیت فنی و تجاری پایلوت را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد.

نقش دولت یا وزارت نیرو در این مدل، فراتر از نظارت صرف بوده و عمدتاً در قالب پوشش بخشی از ریسک مالی تعریف می‌شود. این پوشش می‌تواند از طریق اعطای گرانته‌های هدفمند، یارانه‌های توسعه فناوری، تضمین خرید محدود یا ارائه مشوق‌های تنظیم‌گری اعمال شود. حضور دولت به‌عنوان بازیگر سوم، اعتماد متقابل میان صنعت و شرکت دانش‌بنیان را تقویت کرده و ریسک شکست سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد.

مزیت اصلی این مدل، تقسیم ریسک فناوری و کاهش فشار مالی بر شرکت‌های دانش‌بنیان است. همچنین مشارکت مستقیم شرکت برق، موجب افزایش اعتماد این شرکت به نتایج پایلوت و تسریع فرآیند تصمیم‌گیری برای خرید یا توسعه مقیاس فناوری می‌شود. با این حال، اجرای موفق این مدل مستلزم تدوین قراردادهای شفاف، تعیین مالکیت نتایج و مدیریت تعارض منافع احتمالی میان طرفین است.

به‌عنوان نمونه کاربردی، می‌توان به اجرای پایلوت نانوسیال خنک‌کننده در یک نیروگاه حرارتی اشاره کرد که در آن، نیروگاه محل اجرای پایلوت و داده‌های بهره‌برداری را تأمین می‌کند، شرکت دانش‌بنیان توسعه‌دهنده نانوسیال مسئول اجرای فنی و بهینه‌سازی محصول است و وزارت نیرو بخشی از هزینه‌ها و ریسک مالی پروژه را پوشش می‌دهد.

۳-۲- مدل خرید تضمینی مشروط (Conditional Procurement)

مدل خرید تضمینی مشروط یکی از ابزارهای سیاستی مؤثر برای کاهش ریسک بازار فناوری‌های نوظهور به‌شمار می‌رود. در این رویکرد، وزارت نیرو یا شرکت‌های تابعه متعهد می‌شوند که در صورت تحقق شاخص‌های عملکردی از پیش تعریف‌شده، محصول یا فناوری نانویی را خریداری کنند. این تعهد، مشروط به دستیابی فناوری به سطوح مشخصی از عملکرد فنی و دوام عملیاتی در شرایط واقعی بهره‌برداری است.

در این مدل، شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) نقش محوری دارند و باید به‌صورت شفاف، قابل‌اندازه‌گیری و مورد توافق طرفین تعریف شوند. این شاخص‌ها می‌توانند شامل افزایش راندمان تجهیزات، کاهش نرخ خرابی یا تعمیرات، و دوام عملکرد فناوری در یک بازه زمانی مشخص باشند. تعریف دقیق KPIها موجب می‌شود ارزیابی عملکرد فناوری از حالت سلیقه‌ای خارج شده و مبنای تصمیم‌گیری اقتصادی قرار گیرد.

مزیت اصلی این مدل، کاهش ریسک بازار برای شرکت‌های دانش‌بنیان است. وجود یک تعهد خرید مشروط، سیگنال روشنی به سرمایه‌گذاران و توسعه‌دهندگان فناوری می‌دهد که در صورت موفقیت فنی، تقاضای واقعی برای محصول وجود خواهد داشت. این امر تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری، توسعه ظرفیت تولید و ورود به بازار را تسریع می‌کند. علاوه بر این، اتصال پرداخت مالی به تحقق عملکرد واقعی، انگیزه‌ای قوی برای ارتقای کیفیت و کارایی فناوری در محیط عملیاتی ایجاد می‌کند. با این حال، اجرای این مدل نیازمند نظام پایش و ارزیابی دقیق است. تعیین روش‌های اندازه‌گیری، دوره پایش و مرجع تأیید نتایج باید از ابتدا مشخص شود تا از بروز اختلاف‌نظر در تفسیر نتایج پایلوت جلوگیری شود. ضعف در این بخش می‌تواند اثربخشی سیاست را کاهش دهد.

به‌عنوان مثال کاربردی، می‌توان به خرید نانوپوشش‌های ضدآلودگی برای مقره‌های خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت اشاره کرد. در این حالت، پرداخت کامل هزینه خرید منوط به تأیید حفظ خاصیت هیدروفوبیک و مقاومت خوردگی پوشش پس از یک سال پایش میدانی در شرایط واقعی بهره‌برداری خواهد بود.

۳-۳- مدل صندوق تخصصی نانو-برق

مدل صندوق تخصصی نانو-برق بر ایجاد یک سازوکار مالی پایدار و متمرکز برای حمایت از تجاری‌سازی فناوری‌های نانویی در صنعت برق تأکید دارد. این صندوق با مشارکت دولت، شرکت‌های برق و سرمایه‌گذاران نهادی تشکیل می‌شود و هدف آن تجمع منابع مالی، مدیریت ریسک و هدایت سرمایه به فناوری‌های دارای اولویت راهبردی است.

منابع مالی صندوق می‌تواند از محل اعتبارات وزارت نیرو و شرکت‌های تابعه، منابع صندوق نوآوری و شکوفایی، و سرمایه‌گذاری بخش خصوصی یا نهادی تأمین شود. تنوع منابع، امکان پایداری مالی صندوق و کاهش وابستگی به بودجه‌های سالانه را فراهم می‌کند.

کارکرد اصلی این صندوق، تأمین مالی پایلوت‌های صنعتی، حمایت از آزمایشگاه‌های مرجع و ارائه وام‌های کم‌بهره به شرکت‌های دانش‌بنیان برای اخذ استانداردها و تأییدیه‌های فنی است. علاوه بر این، صندوق می‌تواند در قالب سرمایه‌گذاری خطرپذیر (VC)، در فناوری‌های منتخب با پتانسیل بالای مقیاس‌پذیری مشارکت کند و از منافع بلندمدت تجاری‌سازی بهره‌مند شود.

مزیت کلیدی این مدل، کاهش فشار مالی مستقیم بر شرکت‌های دانش‌بنیان و امکان مدیریت ریسک از طریق ایجاد سبد متنوعی از سرمایه‌گذاری‌ها است. همچنین وجود یک نهاد مالی تخصصی، مسیر تجاری‌سازی فناوری‌های نانویی را از حالت پروژه‌های پراکنده خارج کرده و به یک فرآیند نظام‌مند تبدیل می‌کند. با این حال، موفقیت این صندوق مستلزم طراحی چارچوب حقوقی و مدیریتی شفاف، نظام گزارش‌دهی دقیق و سازوکارهای روشن تخصیص منابع است.

به‌عنوان نمونه کاربردی، می‌توان به سرمایه‌گذاری صندوق در توسعه نانوسیال‌های پیشرفته برای نیروگاه‌ها و نانوکامپوزیت‌های عایقی برای کابل‌های فشار قوی اشاره کرد؛ به‌گونه‌ای که علاوه بر تأمین مالی توسعه فناوری، ضمانت خرید اولیه و پشتیبانی فنی توسط وزارت نیرو نیز پیش‌بینی شود.

۴- مشوق‌های اقتصادی و مالیاتی برای تسهیل تجاری‌سازی فناوری نانو

یکی از مؤثرترین ابزارهای سیاستی برای تسریع تجاری‌سازی فناوری‌های نوظهور، به‌ویژه فناوری نانو در صنعت برق، طراحی مشوق‌های اقتصادی هدفمند است. ماهیت پرریسک این فناوری‌ها، به‌خصوص در مراحل اولیه استقرار صنعتی، موجب می‌شود که بدون مداخله سیاستی، هزینه‌ها و عدم قطعیت‌ها برای بازیگران صنعتی بیش از حد قابل پذیرش باشد. در چنین شرایطی، مشوق‌های مالی و مالیاتی می‌توانند به‌عنوان اهرم‌های کاهش ریسک و اصلاح رفتار بازار عمل کنند.

نخستین محور این مشوق‌ها، حمایت مالی از مرحله پایلوت صنعتی است. بسیاری از فناوری‌های نانویی در صنعت برق از نظر فنی به بلوغ نسبی رسیده‌اند، اما هزینه بالای اجرای پایلوت در مقیاس واقعی مانع اصلی عبور آن‌ها به بازار است. اعطای گزنت‌های هدفمند یا یارانه‌های مستقیم به پروژه‌های پایلوت-به‌ویژه پروژه‌هایی که با مشارکت شرکت‌های برق اجرا می‌شوند-می‌تواند این مانع را به‌طور معناداری کاهش دهد. این حمایت‌ها باید مشروط به تعریف شاخص‌های عملکرد مشخص و گزارش‌دهی شفاف باشد تا هم اثربخشی سیاست تضمین شود و هم از انحراف منابع جلوگیری گردد.

محور دوم، مشوق‌های مالیاتی برای شرکت‌های پذیرنده فناوری نانو در صنعت برق است. در بسیاری از کشورها، هزینه‌های تحقیق و توسعه و همچنین هزینه‌های ناشی از استقرار فناوری‌های نو، به‌عنوان هزینه‌های قابل کسر از مالیات به رسمیت

شناخته می‌شوند. اعمال سیاست‌های مشابه در صنعت برق می‌تواند شرکت‌ها را به استفاده از فناوری‌های نانویی ترغیب کند. به‌عنوان نمونه، امکان کسر بخشی از هزینه‌های پایلوت یا خرید اولیه تجهیزات نانویی از مالیات عملکرد شرکت‌های برق، می‌تواند جذابیت اقتصادی این فناوری‌ها را افزایش دهد و نگرانی مدیران بهره‌برداری نسبت به افزایش هزینه‌های کوتاه‌مدت را کاهش دهد.

سومین محور، تسهیل دسترسی شرکت‌های دانش‌بنیان به منابع مالی برای اخذ تأییدیه‌ها و استانداردهای فنی است. فرآیندهای تست، ارزیابی و دریافت گواهی‌های فنی، به‌ویژه در حوزه تجهیزات حیاتی برق، هزینه‌بر و زمان‌بر هستند. ارائه وام‌های کم‌بهره یا خطوط اعتباری ویژه برای پوشش هزینه‌های استانداردسازی، آزمون‌های عملکردی و ارزیابی‌های ایمنی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در عبور فناوری از مرحله توسعه به تجاری‌سازی ایفا کند. این حمایت‌ها، علاوه بر کاهش فشار مالی بر شرکت‌های نوآور، به ارتقای کیفیت و انطباق محصولات با الزامات فنی نیز کمک می‌کند.

در نهایت، ترکیب این مشوق‌های اقتصادی با سیاست‌های خرید تضمینی و مدل‌های سرمایه‌گذاری مشترک، می‌تواند یک بسته سیاستی منسجم ایجاد کند که در آن، ریسک فناوری به‌صورت متوازن میان دولت، صنعت و شرکت‌های دانش‌بنیان توزیع شود. چنین رویکردی نه تنها مسیر تجاری‌سازی فناوری نانو را هموار می‌سازد، بلکه زمینه شکل‌گیری یک بازار پایدار و رقابتی برای محصولات نانویی در صنعت برق کشور را فراهم می‌کند.

۵- تسریع فرآیندهای تأییدیه و تنظیم‌گری (Regulatory Fast-Track)

یکی از موانع ساختاری و کمتر دیده‌شده در مسیر تجاری‌سازی فناوری نانو در صنعت برق، طولانی، پراکنده و بعضاً نامتناسب بودن فرآیندهای تأییدیه فنی و تنظیم‌گری است. اگرچه الزامات سخت‌گیرانه ایمنی و عملکردی در صنعت برق کاملاً ضروری و غیرقابل چشم‌پوشی هستند، اما استفاده از همان سازوکارهای سنتی ارزیابی برای فناوری‌های نوظهور، عملاً موجب افزایش هزینه، زمان و عدم قطعیت برای نوآوران و بهره‌برداران می‌شود. در نتیجه، حتی فناوری‌هایی که از نظر فنی مزیت اثبات‌شده دارند، در مرحله اخذ مجوز و تأییدیه متوقف می‌مانند.

تجربه‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که ایجاد مسیرهای تنظیم‌گری تسریع‌شده (Fast-Track Regulatory Pathways) برای فناوری‌های نو، بدون کاهش سطح ایمنی، می‌تواند نقش مهمی در عبور از شکاف میان توسعه فناوری و استقرار صنعتی ایفا کند. در صنعت برق، چنین رویکردی به معنای طراحی فرآیندهای خاص برای ارزیابی فناوری‌های نانویی است که ماهیت، ریسک‌ها و مزایای آن‌ها با تجهیزات متعارف تفاوت دارد.

نخستین گام در این مسیر، تفکیک روشن میان «ارزیابی پایلوت» و «تأییدیه بهره‌برداری گسترده» است. بسیاری از فناوری‌های نانویی نیازی به طی کامل فرآیندهای طولانی تأییدیه برای ورود به یک پایلوت محدود ندارند، اما در عمل مجبور به عبور از همان مسیرهای پیچیده می‌شوند. ایجاد یک چارچوب رسمی برای صدور مجوز پایلوت کنترل‌شده، با دامنه مشخص،

زمان محدود و نظارت فنی دقیق، می‌تواند امکان آزمون فناوری در شرایط واقعی شبکه را فراهم کند، بدون آنکه ریسک غیرقابل‌پذیرشی به سیستم تحمیل شود.

در گام بعدی، لازم است شاخص‌های عملکرد و معیارهای پذیرش فناوری‌های نانویی به‌صورت شفاف، قابل اندازه‌گیری و از پیش تعریف‌شده تعیین شوند. نبود معیارهای مشخص، یکی از عوامل اصلی اختلاف نظر میان شرکت‌های دانش‌بنیان، آزمایشگاه‌ها و بهره‌برداران صنعت برق است. تدوین بسته‌های ارزیابی مبتنی بر استانداردهای بین‌المللی (IEC, ISO و OECD) و تطبیق آن‌ها با شرایط بومی شبکه برق کشور، می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری را تسهیل کرده و از تفسیرهای سلیقه‌ای جلوگیری کند.

یکی دیگر از عناصر کلیدی مسیر تسریع تنظیم‌گری، ایجاد مرجع واحد تصمیم‌گیری برای فناوری‌های نانویی در صنعت برق است. پراکندگی مسئولیت‌ها میان نهادهای مختلف-از آزمایشگاه‌ها و شرکت‌های برق گرفته تا سازمان‌های استاندارد و نهادهای نظارتی-موجب افزایش زمان و هزینه برای متقاضیان می‌شود. استقرار یک ساختار هماهنگ‌کننده، ترجیحاً ذیل وزارت نیرو یا با محوریت یک مرکز ملی ارزیابی نانومحصولات، می‌تواند نقش «پنجره واحد تنظیم‌گری» را ایفا کرده و ارتباط میان بازیگران مختلف را یکپارچه سازد.

علاوه بر این، پذیرش نتایج پایلوت‌های موفق به‌عنوان بخشی از فرآیند تأییدیه نهایی، نقش مهمی در کوتاه‌سازی مسیر تجاری‌سازی دارد. در بسیاری از موارد، داده‌های میدانی به‌دست‌آمده از پایلوت‌های صنعتی، از نظر اعتبار عملی حتی ارزشمندتر از تست‌های آزمایشگاهی هستند. به رسمیت شناختن این داده‌ها در فرآیند تنظیم‌گری، ضمن افزایش انگیزه برای اجرای پایلوت، اعتماد بهره‌برداران به فناوری را نیز تقویت می‌کند.

در مجموع، طراحی و اجرای یک نظام تسریع‌شده تأییدیه و تنظیم‌گری برای فناوری نانو در صنعت برق، نه به معنای کاهش استانداردهای ایمنی، بلکه به معنای هوشمندسازی فرآیند تصمیم‌گیری و متناسب‌سازی آن با ماهیت فناوری‌های نوظهور است. چنین رویکردی می‌تواند به‌طور هم‌زمان از ایمنی شبکه حفاظت کند و مسیر نوآوری و تجاری‌سازی را برای شرکت‌های داخلی هموار سازد.

۶- نقش وزارت نیرو به‌عنوان تنظیم‌گر فعال و خریدار هوشمند

در اکوسیستم تجاری‌سازی فناوری‌های نو، به‌ویژه در صنایع زیرساختی مانند برق، دولت صرفاً یک ناظر یا تنظیم‌گر منفعل نیست، بلکه می‌تواند و باید نقش «تنظیم‌گر فعال» و «خریدار هوشمند» را ایفا کند. وزارت نیرو به دلیل جایگاه حاکمیتی، مالکیت یا نفوذ بر بخش بزرگی از بازار تجهیزات برق، و مسئولیت مستقیم در تضمین ایمنی و پایداری شبکه، یکی از معدود نهادهایی است که توانایی شکل‌دهی هم‌زمان به سمت عرضه و تقاضای فناوری نانو را دارد.

در نقش تنظیم‌گر فعال، وزارت نیرو می‌تواند با طراحی قواعد شفاف، قابل پیش‌بینی و تدریجی، عدم قطعیت سیاستی را برای بازیگران کاهش دهد. بخش مهمی از ریسک سرمایه‌گذاری در فناوری نانو نه ناشی از خود فناوری، بلکه ناشی از ابهام در الزامات فنی، فرآیندهای تأیید و معیارهای پذیرش است. زمانی که وزارت نیرو به‌صورت رسمی مسیرهای مشخص ارزیابی، پایلوت و تأییدیه را تعریف و اعلام می‌کند، شرکت‌های دانش‌بنیان و سرمایه‌گذاران قادر خواهند بود تصمیم‌های اقتصادی خود را بر مبنای افق زمانی و الزامات روشن‌تری اتخاذ کنند.

هم‌زمان، وزارت نیرو می‌تواند نقش خریدار هوشمند را ایفا کند؛ به این معنا که سیاست خرید تجهیزات و خدمات برق نه تنها بر مبنای کمترین قیمت اولیه، بلکه بر اساس ارزش چرخه عمر، کاهش تلفات، افزایش راندمان و ارتقای قابلیت اطمینان شبکه طراحی شود. فناوری‌های نانویی اغلب در مقایسه با فناوری‌های سنتی هزینه اولیه بالاتری دارند، اما در طول زمان منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیرات و خاموشی می‌شوند. گنجاندن این منطق در اسناد مناقصه و دستورالعمل‌های خرید، می‌تواند پذیرش فناوری‌های نو را به یک انتخاب منطقی و اقتصادی برای مدیران بهره‌برداری تبدیل کند.

از سوی دیگر، وزارت نیرو می‌تواند با تعریف برنامه‌های خرید پیش‌تجاری (Pre-Commercial Procurement) یا خرید مشروط، نقش محرک تقاضا را ایفا کند. در چنین برنامه‌هایی، دولت متعهد می‌شود که در صورت دستیابی فناوری به شاخص‌های عملکرد مشخص، بخشی از بازار اولیه را تضمین کند. این رویکرد، بدون تحمیل ریسک غیرقابل کنترل به شبکه، به شرکت‌های دانش‌بنیان سیگنال روشنی از وجود بازار بالقوه می‌دهد و سرمایه‌گذاری در توسعه و مقیاس‌پذیری فناوری را توجیه‌پذیر می‌سازد.

در نهایت، ایفای این نقش دوگانه-تنظیم‌گر فعال و خریدار هوشمند-به وزارت نیرو امکان می‌دهد که به‌جای واکنش منفعلانه به نوآوری‌ها، جهت‌گیری توسعه فناوری در صنعت برق را به‌صورت هدفمند هدایت کند؛ به‌گونه‌ای که هم منافع عمومی و ایمنی شبکه حفظ شود و هم ظرفیت نوآوری داخلی تقویت گردد.

۷- جمع‌بندی سیاستی و بسته پیشنهادی اجرایی

تحلیل ارائه‌شده در این گزارش نشان می‌دهد که چالش اصلی تجاری‌سازی فناوری نانو در صنعت برق، نه فقدان دانش فنی و نه نبود نیاز صنعتی، بلکه شکاف ساختاری میان توسعه فناوری و استقرار بازارمحور آن است. این شکاف، حاصل هم‌زمان ریسک‌های مالی بالا، فرآیندهای تنظیم‌گری کند، نبود مشوق‌های اقتصادی متناسب و رفتار محافظه‌کارانه بازیگران بهره‌بردار است. عبور از این وضعیت، نیازمند یک بسته سیاستی منسجم، چندلایه و قابل اجراست که ابعاد مالی، نهادی و تنظیم‌گری را به‌صورت هم‌زمان پوشش دهد.

بسته پیشنهادی این گزارش بر این فرض استوار است که وزارت نیرو باید از نقش صرفاً بهره‌بردار یا ناظر، به نقش سیاست‌گذار فعال در تجاری‌سازی فناوری نانو ارتقا یابد. در این چارچوب، مدل‌های مالی پیشنهادی مانند سرمایه‌گذاری مشترک، خرید

تضمینی مشروط و ایجاد صندوق تخصصی نانو-برق، به عنوان ابزارهای کاهش ریسک و تحریک سرمایه گذاری عمل می کنند. این ابزارها امکان می دهند که هزینه ها و عدم قطعیت ها میان دولت، صنعت و شرکت های دانش بنیان به صورت متوازن توزیع شود.

در کنار آن، طراحی مشوق های اقتصادی و مالیاتی هدفمند، به ویژه برای پیلوت های صنعتی و پذیرندگان اولیه فناوری، می تواند منطق اقتصادی استفاده از فناوری های نانویی را برای مدیران صنعت برق تقویت کند. این مشوق ها، زمانی اثربخش خواهند بود که با سازوکارهای شفاف ارزیابی عملکرد و گزارش دهی همراه شوند تا هم اثربخشی سیاست تضمین شود و هم اعتماد عمومی حفظ گردد.

عنصر کلیدی دیگر این بسته، اصلاح و تسریع فرآیندهای تأییدیه و تنظیم گری است. ایجاد مسیرهای تسریع شده برای پیلوت های کنترل شده، تعریف معیارهای پذیرش شفاف و استقرار یک پنجره واحد تنظیم گری، می تواند زمان ورود فناوری های نانویی به بازار را به طور معناداری کاهش دهد، بدون آنکه ایمنی و قابلیت اطمینان شبکه قربانی شود.

در مجموع، اجرای هماهنگ این بسته سیاستی می تواند به شکل گیری یک بازار اولیه پایدار برای فناوری های نانویی در صنعت برق منجر شود؛ بازاری که در آن، نوآوری داخلی تشویق می شود، ریسک ها مدیریت پذیر می شوند و منافع بلندمدت شبکه برق کشور در قالب افزایش راندمان، کاهش تلفات و ارتقای تاب آوری تحقق می یابد. این رویکرد، نه تنها به تجاری سازی فناوری نانو کمک می کند، بلکه می تواند به عنوان الگویی برای استقرار سایر فناوری های پیشرفته در صنایع زیرساختی کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد.

فهرست منابع

- [1] M. A. Markham, "Moving technologies from lab to market," *Research Technology Management*, vol. 45, no. 6, pp. 31–42, 2002.
- [2] OECD, *Commercialisation of New Technologies: Bringing Innovation to Market*, Paris, France: OECD Publishing, 2013.
- [3] H. Chesbrough, *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*, Boston, MA, USA: Harvard Business School Press, 2003.
- [4] European Commission, *Pre-Commercial Procurement and Innovation Procurement*, Brussels, Belgium, 2018.
- [5] World Bank, *Public Procurement for Innovation: Good Practices and Strategies*, Washington, DC, USA, 2020.
- [6] J. J. Ramsden, *Nanotechnology: An Introduction*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2016.
- [7] OECD, *Innovation Funds and Their Role in Supporting Technology Commercialization*, Paris, France: OECD Publishing, 2019.
- [8] D. Mazzucato, *The Entrepreneurial State: Debunking Public vs. Private Sector Myths*, London, U.K.: Anthem Press, 2018.
- [9] International Energy Agency (IEA), *Energy Technology Perspectives: Catalysing Innovation*, Paris, France,