

نانوحسگرهای هوشمند؛ فناوری راهبردی برای افزایش تاب آوری و

مدیریت هوشمند دارایی‌های شبکه برق

چکیده گزارش:

افزایش تاب آوری و قابلیت اطمینان شبکه برق، به‌ویژه در شرایط توسعه شبکه‌های هوشمند و افزایش مخاطرات طبیعی و فنی، نیازمند بهره‌گیری از فناوری‌های نوین پایش وضعیت تجهیزات است. کابل‌های قدرت به‌عنوان یکی از دارایی‌های راهبردی شبکه انتقال و توزیع، در معرض تنش‌های حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و خوردگی قرار دارند و خرابی آن‌ها می‌تواند منجر به خاموشی‌های گسترده، افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش امنیت تأمین برق شود. در این راستا، نانوحسگرهای هوشمند با قابلیت اندازه‌گیری برخط پارامترهایی نظیر دما، جریان و خوردگی، امکان تشخیص زودهنگام عیوب و گذار از تعمیرات زمان‌محور به نگهداری مبتنی بر وضعیت و نگهداری پیشگویانه را فراهم می‌کنند. این گزارش با مرور روندهای جهانی توسعه فناوری، وضعیت ثبت اختراعات، بازیگران اصلی، ظرفیت بازار و تجارب بین‌المللی، جایگاه نانوحسگرها را در هوشمندسازی مدیریت دارایی‌های صنعت برق بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که همگرایی نانوحسگرها با اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال، یکی از مهم‌ترین روندهای تحول در مدیریت زیرساخت‌های برق است و می‌تواند به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش عمر مفید تجهیزات، بهبود قابلیت اطمینان شبکه و ارتقای تاب آوری صنعت برق منجر شود. بررسی ظرفیت‌های داخلی نیز نشان می‌دهد که ایران با برخورداری از توانمندی در حوزه فناوری نانو، صنعت سیم و کابل، شرکت‌های دانش‌بنیان و مراکز پژوهشی، از ظرفیت مناسبی برای توسعه این فناوری برخوردار است. با این حال، تحقق این ظرفیت مستلزم اجرای پروژه‌های پایلوت، تدوین استانداردهای فنی، حمایت از توسعه فناوری و ثبت اختراع، و تقویت همکاری میان صنعت، دانشگاه و شرکت‌های دانش‌بنیان است. توسعه نانوحسگرهای هوشمند می‌تواند به‌عنوان یکی از محورهای راهبردی ارتقای تاب آوری و هوشمندسازی شبکه برق کشور مورد توجه سیاست‌گذاران و مدیران صنعت برق قرار گیرد.

شناسنامه گزارش رصد فناوری

نانوحسگرهای هوشمند؛ فناوری راهبردی برای افزایش تاب آوری و مدیریت هوشمند دارایی‌های شبکه برق
فناوری نانو و نانومواد؛ حسگرها و سامانه‌های اندازه‌گیری هوشمند؛ مهندسی کابل‌های قدرت و تجهیزات انتقال انرژی؛
اینترنت اشیا، صنعتی (IIoT)؛ هوش مصنوعی و تحلیل داده؛ مدیریت دارایی‌های صنعت برق؛ تاب آوری
زیرساخت‌های انرژی و نگهداری پیشگویانه
مدیران ارشد وزارت نیرو و شرکت توانیر؛ مدیران شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع نیروی برق؛
مدیران تحقیق و توسعه شرکت‌های تولیدکننده سیم و کابل؛ مدیران شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در حوزه فناوری
نانو، حسگرها و اینترنت اشیا، صنعتی؛ پژوهشگران و اعضای هیئت علمی حوزه‌های مهندسی برق،
پژوهشگاه نیرو
دکتر مجید میرزایی (ایمیل سازمانی: mjmirzaei@nri.ac.ir)
پژوهشکده تولید
پژوهشکده تولید- مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری نانو
تیر ۱۴۰۵

عنوان گزارش

حوزه تخصصی

مخاطبان اصلی

سفارش دهنده

نویسندگان

ناظر

پژوهشکده، گروه پژوهشی

تاریخ مطالعه

۱. ضرورت توسعه نانوحسگرها و نقش آن‌ها در افزایش تاب‌آوری شبکه برق

کابل‌های قدرت یکی از حیاتی‌ترین اجزای شبکه انتقال و توزیع برق هستند و عملکرد پایدار آن‌ها نقش مستقیمی در قابلیت اطمینان، پایداری و امنیت تأمین برق دارد. با توسعه شهرها، افزایش استفاده از کابل‌های زیرزمینی، اتصال منابع تولید پراکنده و نیروگاه‌های تجدیدپذیر، وابستگی شبکه‌های برق به عملکرد صحیح کابل‌ها بیش از گذشته افزایش یافته است. برخلاف بسیاری از تجهیزات شبکه که امکان بازرسی چشمی یا تعمیر سریع آن‌ها وجود دارد، خرابی کابل‌های قدرت معمولاً به صورت پنهان آغاز شده و تا زمان وقوع عیب نهایی قابل تشخیص نیست. در بسیاری از موارد، فرایندهای تخریب مانند افزایش تدریجی دما، نفوذ رطوبت، تخریب عایق، خوردگی شیلد یا اتصالات و ایجاد تخلیه جزئی (Partial Discharge) از مدت‌ها قبل آغاز می‌شوند، اما تنها زمانی آشکار می‌شوند که عملکرد کابل مختل شده یا خاموشی رخ داده باشد. پیامدهای این خرابی‌ها تنها به هزینه تعمیر یا تعویض کابل محدود نیست، بلکه شامل کاهش قابلیت اطمینان شبکه، افزایش زمان خاموشی، خسارت به مشترکان، اختلال در فعالیت صنایع و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری نیز می‌شود. از این رو، مدیریت سلامت کابل‌های قدرت یکی از ارکان اصلی مدیریت دارایی در صنعت برق به شمار می‌رود [۱-۲].

در حال حاضر، ارزیابی وضعیت کابل‌های قدرت عمدتاً بر پایه آزمون‌های دوره‌ای، بازرسی‌های برنامه‌ریزی‌شده و آزمون‌های تشخیصی انجام می‌شود. آزمون‌هایی نظیر اندازه‌گیری مقاومت عایقی، آزمون ولتاژ بالا، اندازه‌گیری تانژانت دلتا، آزمون تخلیه جزئی و تصویربرداری حرارتی از جمله روش‌های رایج برای بررسی وضعیت کابل‌ها هستند [۲]. اگرچه این روش‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت کابل ارائه می‌کنند، اما با محدودیت‌های قابل توجهی همراه هستند [۱]:

- اندازه‌گیری‌ها معمولاً به صورت دوره‌ای انجام می‌شوند و تغییرات بین دو دوره آزمون قابل مشاهده نیست.
 - بسیاری از آزمون‌ها نیازمند خروج کابل از مدار هستند که این امر هزینه و محدودیت‌های بهره‌برداری ایجاد می‌کند.
 - امکان پایش هم‌زمان چندین پارامتر مؤثر بر سلامت کابل وجود ندارد.
 - تحلیل روند تخریب و پیش‌بینی زمان خرابی با دقت کافی امکان‌پذیر نیست.
 - تشخیص بسیاری از عیوب در مراحل اولیه دشوار است.
- در نتیجه، روش‌های سنتی عمدتاً بر تشخیص خرابی یا ارزیابی وضعیت پس از وقوع تغییرات محسوس تمرکز دارند و قابلیت محدودی در پیش‌بینی خرابی‌های آینده دارند.
- در دهه‌های اخیر، رویکرد نگهداری تجهیزات در صنعت برق دستخوش تحول اساسی شده است. این تحول را می‌توان در چهار نسل اصلی طبقه‌بندی کرد [۳-۵]:

جدول ۱. رویکرد نگهداری تجهیزات در صنعت برق

نسل	رویکرد نگهداری	ویژگی
نسل اول	تعمیر پس از خرابی (Corrective Maintenance)	اقدام پس از وقوع عیب
نسل دوم	تعمیرات زمان‌محور (Time-Based Maintenance)	سرویس در فواصل زمانی ثابت
نسل سوم	نگهداری مبتنی بر وضعیت (Condition-Based Maintenance)	تصمیم‌گیری بر اساس وضعیت واقعی تجهیز
نسل چهارم	نگهداری پیشگویانه (Predictive Maintenance)	پیش‌بینی خرابی با استفاده از داده و هوش مصنوعی

امروزه شرکت‌های پیشرو صنعت برق در حال حرکت به سمت نسل چهارم هستند؛ نسلی که در آن داده‌های حاصل از حسگرهای هوشمند، اینترنت اشیای صنعتی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مبنای تصمیم‌گیری برای تعمیر و نگهداری تجهیزات قرار می‌گیرد.

در سال‌های اخیر، مفهوم تاب‌آوری (Resilience) به یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد زیرساخت‌های انرژی تبدیل شده است. تاب‌آوری شبکه برق به توانایی سیستم در پیش‌بینی، مقاومت، جذب، پاسخ و بازیابی سریع در برابر اختلالات، حوادث و شرایط غیرعادی اطلاق می‌شود [۵-۶].

از دیدگاه بهره‌برداری، یک شبکه تاب‌آور باید بتواند:

- علائم اولیه خرابی را پیش از وقوع شناسایی کند؛
- احتمال بروز خاموشی‌های گسترده را کاهش دهد؛
- در صورت وقوع اختلال، سریعاً محل عیب را مشخص کند؛
- زمان بازیابی شبکه را به حداقل برساند؛
- از تکرار خرابی‌های مشابه جلوگیری کند.

بنابراین، تاب‌آوری تنها به استحکام تجهیزات محدود نمی‌شود، بلکه به میزان آگاهی اپراتور از وضعیت لحظه‌ای شبکه و توانایی تصمیم‌گیری هوشمند نیز وابسته است.

نانوحسگرهای هوشمند را می‌توان یکی از فناوری‌های توانمندساز تاب‌آوری شبکه برق دانست. این حسگرها با اندازه‌گیری مداوم پارامترهای کلیدی، امکان شناسایی تغییرات بسیار کوچک در رفتار کابل را فراهم می‌کنند؛ تغییراتی که معمولاً با روش‌های سنتی قابل تشخیص نیستند.

استفاده از این حسگرها چند مزیت کلیدی برای تاب‌آوری شبکه ایجاد می‌کند [۳-۵]:

۱. افزایش آگاهی موقعیتی (Situational Awareness): اطلاعات برخط از وضعیت کابل‌ها، تصمیم‌گیری اپراتور را دقیق‌تر و سریع‌تر می‌کند.

۲. پیشگیری از خرابی: شناسایی افزایش غیرعادی دما، تغییرات جریان یا آغاز خوردگی، امکان مداخله پیش از وقوع خرابی را فراهم می‌کند.

۳. کاهش خاموشی‌های ناخواسته: با حذف بسیاری از خرابی‌های ناگهانی، قابلیت اطمینان شبکه افزایش می‌یابد.

۴. افزایش طول عمر تجهیزات: تعمیرات بر اساس وضعیت واقعی تجهیزات انجام می‌شود و از تعویض زودهنگام کابل‌ها جلوگیری می‌شود.

۵. بهبود مدیریت دارایی‌ها: داده‌های حاصل از نانوحسگرها مبنای ارزشمندی برای برآورد عمر باقیمانده کابل (Remaining Useful Life) و اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌ها فراهم می‌کند.



شکل ۱. نقش نانوحسگرها در افزایش تاب‌آوری شبکه برق

چند روند جهانی باعث شده‌اند نانوحسگرهای هوشمند به یکی از فناوری‌های اولویت‌دار صنعت برق تبدیل شوند [۷]:

- افزایش عمر شبکه‌های انتقال و توزیع در بسیاری از کشورها؛
- توسعه گسترده کابل‌های زیرزمینی در مناطق شهری؛
- رشد نیروگاه‌های تجدیدپذیر و تغییر الگوی بهره‌برداری از شبکه؛
- حرکت به سمت شبکه‌های هوشمند (Smart Grid)؛
- پیشرفت سریع فناوری‌های اینترنت اشیا صنعتی، ارتباطات و هوش مصنوعی؛
- کاهش هزینه ساخت حسگرهای مبتنی بر نانومواد.

این روندها نشان می‌دهد که آینده مدیریت دارایی‌های صنعت برق به سمت پایش پیوسته، تحلیل داده و تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی در حرکت است و نانوحسگرها یکی از اجزای کلیدی این تحول محسوب می‌شوند.

این گزارش بر پایه مرور نظام‌مند منابع علمی، گزارش‌های صنعتی، اسناد ثبت اختراع و گزارش‌های بازار تهیه شده است. اطلاعات مربوط به روندهای فناوری، بازیگران اصلی، سطح بلوغ فناوری و تحلیل بازار از پایگاه‌هایی نظیر Google Patents، WIPO PATENTSCOPE، Lens.org، گزارش‌های EPRI و CIGRE و مقالات نمایه‌شده استخراج و به‌صورت تطبیقی تحلیل شده است. با توجه به ماهیت کیفی این مطالعه، از نرم‌افزارهای تحلیل علم‌سنجی نظیر CiteSpace، VOSviewer یا Python استفاده نشده و تحلیل‌ها مبتنی بر تلفیق و ارزیابی کارشناسی منابع انجام شده است.

۲. معرفی فناوری و سازوکار عملکرد نانوحسگرها

۱.۲. نانوحسگر چیست؟

نانوحسگر (Nanosensor) به حسگری گفته می‌شود که بخش فعال آن از مواد یا ساختارهایی در مقیاس نانومتری (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) تشکیل شده است. استفاده از نانومواد موجب افزایش نسبت سطح به حجم، بهبود خواص الکتریکی و حرارتی و افزایش حساسیت حسگر نسبت به تغییرات محیطی می‌شود. در نتیجه، نانوحسگرها قادرند تغییرات بسیار کوچک در پارامترهای فیزیکی یا شیمیایی را که با حسگرهای متداول قابل تشخیص نیست، اندازه‌گیری کنند. در صنعت برق، نانوحسگرها با هدف پایش سلامت تجهیزات (Health Monitoring) و جمع‌آوری داده‌های دقیق از شرایط بهره‌برداری توسعه یافته‌اند. این حسگرها معمولاً درون کابل، روی لایه‌های نیمه‌هادی، شیلد فلزی، غلاف خارجی یا اتصالات نصب شده و اطلاعات خود را به سامانه‌های پایش منتقل می‌کنند. نکته مهم آن است که نانوحسگرها به‌تنهایی یک فناوری مستقل نیستند، بلکه بخشی از یک سامانه هوشمند شامل حسگر، واحد جمع‌آوری داده، ارتباطات، تحلیل داده و هوش مصنوعی هستند [۵-۶].

۲.۲. چرا فناوری نانو برای حسگرها مناسب است؟

مقیاس نانومتری باعث می‌شود رفتار مواد نسبت به حالت توده‌ای (Bulk) تغییر کند. افزایش سطح ویژه، پدیده‌های کوانتومی و قابلیت اصلاح سطح، موجب می‌شود نانومواد نسبت به تغییرات دما، تنش، میدان الکتریکی یا واکنش‌های شیمیایی حساس‌تر باشند.

به همین دلیل، نانوحسگرها در مقایسه با حسگرهای متداول دارای ویژگی‌های زیر هستند:

- حساسیت بسیار بالا نسبت به تغییرات جزئی دما، جریان و خوردگی؛
- امکان ساخت حسگرهای کوچک و انعطاف‌پذیر برای نصب در ساختار کابل؛
- مصرف توان پایین و امکان کارکرد طولانی‌مدت؛
- قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان چند پارامتر؛
- امکان یکپارچه‌سازی با اینترنت اشیای صنعتی و سامانه‌های هوشمند.

۳.۲. مواد اصلی مورد استفاده در نانوحسگرها

انتخاب ماده فعال مهم‌ترین عامل در طراحی نانوحسگر است. هر ماده بر اساس ویژگی‌های الکتریکی، حرارتی، مکانیکی یا شیمیایی، کاربرد متفاوتی در پایش کابل‌های قدرت دارد [۸-۱۱].

الف) گرافن (Graphene)

گرافن یک لایه تک‌اتمی از اتم‌های کربن با آرایش شش‌ضلعی است که به دلیل رسانایی الکتریکی و حرارتی بسیار بالا، یکی از مهم‌ترین مواد مورد استفاده در نسل جدید حسگرها محسوب می‌شود.

ویژگی‌های کلیدی:

- هدایت الکتریکی بسیار بالا
- هدایت حرارتی عالی
- انعطاف‌پذیری مکانیکی
- حساسیت زیاد به تغییرات محیطی
- قابلیت ساخت فیلم‌های نازک

کاربرد در کابل‌های قدرت:

- حسگر دما
- حسگر جریان
- پایش تنش مکانیکی
- تشخیص آسیب عایق

ب) نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotubes - CNT)

نانولوله‌های کربنی استحکام مکانیکی بسیار بالا و رسانایی مناسبی دارند و با تغییرات کوچک در کرنش یا دما، مقاومت الکتریکی آن‌ها تغییر می‌کند. به همین دلیل از CNTها در ساخت حسگرهای کرنش، دما و جریان استفاده می‌شود. مزایا:

- انعطاف‌پذیری بالا
- مقاومت مکانیکی زیاد
- وزن کم
- دوام طولانی
- قابلیت اختلاط با پلیمرها

کاربرد:

- کابل‌های فشارقوی
- نانوکامپوزیت‌های خودحسگر
- پایش ترک‌های ریز

ج) MXene

MXene خانواده‌ای از مواد دوجذب است که طی سال‌های اخیر به دلیل رسانایی بالا و پایداری مناسب، توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

ویژگی‌های اصلی:

- پاسخ سریع
- حساسیت بالا
- هدایت الکتریکی زیاد
- قابلیت ساخت حسگرهای انعطاف‌پذیر

کاربرد:

- حسگرهای دمای دقیق
- حسگر رطوبت
- حسگر خوردگی

اگرچه این فناوری هنوز در مرحله توسعه صنعتی قرار دارد، اما بسیاری از پژوهشگران آن را یکی از گزینه‌های آینده برای کابل‌های هوشمند می‌دانند.

د) نانوسیم‌های فلزی

نانوذرات و نانوسیم‌های نقره، مس و طلا در ساخت الکترودهای بسیار حساس استفاده می‌شوند.

ویژگی‌ها:

- هدایت الکتریکی بالا
- پاسخ سریع
- قابلیت چاپ روی فیلم‌های انعطاف‌پذیر

کاربرد:

- اندازه‌گیری جریان
- اندازه‌گیری دما
- حسگرهای سطحی

ه) نانوکامپوزیت‌های رسانا

در این گروه، نانوذرات رسانا درون پلیمرهای عایق پراکنده می‌شوند. مزیت اصلی این فناوری آن است که خود لایه عایقی کابل به یک حسگر تبدیل می‌شود. در نتیجه، نیازی به نصب حسگر مجزا نخواهد بود. این فناوری یکی از جذاب‌ترین حوزه‌های تحقیقاتی دهه اخیر محسوب می‌شود.

جدول ۲. مقایسه مهم‌ترین نانومواد مورد استفاده در نانوحسگرهای کابل قدرت

نانوماده	ویژگی شاخص	کاربرد اصلی	سطح بلوغ فناوری (TRL)
گرافن	هدایت الکتریکی و حرارتی بسیار بالا	دما، جریان، کرنش	۷ تا ۸

نانولوله‌های کربنی (CNT)	انعطاف‌پذیری و استحکام مکانیکی بالا	دما، کرنش، جریان	۸ تا ۹
MXene	حساسیت زیاد و پاسخ سریع	دما، رطوبت، خوردگی	۴ تا ۶
نانوسیم‌های فلزی	هدایت الکتریکی بالا	جریان و دما	۷ تا ۸
نانوکامپوزیت‌های رسانا	یکپارچه‌سازی با عایق کابل	پایش سلامت کابل	۵ تا ۷

۴.۲. نانوحسگرها چگونه در کابل نصب می‌شوند؟

یکی از مهم‌ترین موضوعات در تجاری‌سازی این فناوری، نحوه استقرار حسگرها در کابل است. بسته به نوع کاربرد و طراحی کابل، روش‌های مختلفی برای یکپارچه‌سازی نانوحسگرها وجود دارد [۱۲].

۱. تعبیه در لایه عایق: در این روش، نانوحسگر یا نانوکامپوزیت در حین فرایند اکستروژن، داخل لایه عایق (مانند XLPE یا EPR) قرار می‌گیرد. این روش امکان پایش مستقیم شرایط داخلی کابل را فراهم می‌کند، اما نیازمند سازگاری کامل حسگر با خواص الکتریکی و مکانیکی عایق است.

۲. نصب روی شیلد فلزی یا غلاف کابل: در این روش، حسگرها روی شیلد یا غلاف خارجی نصب می‌شوند. این شیوه اجرای ساده‌تری دارد و برای پروژه‌های پایلوت یا مقاوم‌سازی شبکه‌های موجود مناسب است، هرچند اطلاعات آن بیشتر از وضعیت سطحی کابل به دست می‌آید.

۳. استفاده از پوشش‌های هوشمند: در این فناوری، پوشش‌های پلیمری حاوی نانوذرات رسانا روی سطح کابل اعمال می‌شوند. این پوشش‌ها علاوه بر نقش حفاظتی، تغییرات ناشی از تنش، رطوبت یا خوردگی را نیز حس می‌کنند و می‌توانند به‌عنوان یک لایه حسگر عمل کنند.

۴. شبکه حسگرهای توزیع‌شده: در پروژه‌های پیشرفته، چندین نانوحسگر در طول مسیر کابل نصب شده و از طریق شبکه‌های ارتباطی باسیم یا بی‌سیم به یک واحد مرکزی متصل می‌شوند. این رویکرد امکان پایش گسترده، تعیین محل دقیق ناهنجاری و تحلیل فضایی وضعیت کابل را فراهم می‌کند.

جدول ۳. مزیت نانوحسگرها نسبت به حسگرهای متداول

شاخص	حسگرهای متداول	نانوحسگرها
حساسیت	متوسط	بسیار بالا
اندازه	نسبتاً بزرگ	بسیار کوچک
مصرف انرژی	متوسط	پایین
پایش برخط	محدود	کامل
قابلیت یکپارچه‌سازی	محدود	بالا
اندازه‌گیری چندپارامتری	محدود	امکان‌پذیر
سازگاری با هوش مصنوعی و IIoT	محدود	بسیار مناسب

۳. روندهای جهانی توسعه فناوری، رصد پتنت و تحلیل بازار

۱.۳. روندهای جهانی توسعه فناوری

تحول در صنعت برق طی دو دهه اخیر، از توسعه تجهیزات مستقل به سمت ایجاد زیرساخت‌های هوشمند، متصل و داده‌محور حرکت کرده است. در این مسیر، کابل‌های قدرت نیز از یک تجهیز غیرفعال انتقال انرژی به بخشی از سامانه‌های هوشمند مدیریت دارایی تبدیل شده‌اند. این تغییر پارادایم، نیاز به فناوری‌هایی را افزایش داده است که بتوانند وضعیت سلامت کابل را به‌صورت پیوسته و بدون ایجاد اختلال در بهره‌برداری پایش کنند [۴]. روند مطالعات علمی نشان می‌دهد که از حدود سال ۲۰۱۵، پژوهش‌ها از توسعه حسگرهای منفرد به سمت سامانه‌های پایش چندپارامتری حرکت کرده‌اند. در این سامانه‌ها، اندازه‌گیری هم‌زمان دما، جریان، کرنش، رطوبت، تخلیه جزئی و خوردگی، تصویری جامع از وضعیت سلامت کابل ارائه می‌دهد. هم‌زمان، پیشرفت در فناوری اینترنت اشیای صنعتی (IIoT)، ارتباطات کم‌مصرف، رایانش ابری و هوش مصنوعی، امکان تحلیل لحظه‌ای داده‌ها و پیش‌بینی خرابی را فراهم کرده است [۶]. در نسل جدید کابل‌های هوشمند، نانوحسگر تنها یکی از اجزای سامانه است و ارزش اصلی در یکپارچه‌سازی حسگر، ارتباطات، تحلیل داده و مدل‌های پیش‌بینی نهفته است. این رویکرد، کابل را به یک «دارایی هوشمند» تبدیل می‌کند که قادر است اطلاعات سلامت خود را به‌صورت مستمر در اختیار بهره‌بردار قرار دهد.

بررسی گزارش‌های صنعتی و مقالات مروری، پنج روند کلیدی را نشان می‌دهد [۱۲]:

۱. توسعه حسگرهای چندمنظوره: استفاده از حسگرهایی که به‌طور هم‌زمان دما، جریان، کرنش و رطوبت را اندازه‌گیری می‌کنند.
۲. یکپارچه‌سازی با مواد کابل: توسعه نانوکامپوزیت‌ها و پوشش‌های هوشمند که خود بخشی از ساختار کابل بوده و نقش حسگر را ایفا می‌کنند.
۳. پایش توزیع شده (Distributed Monitoring): استقرار شبکه‌ای از حسگرها در طول مسیر کابل برای تعیین محل دقیق ناهنجاری‌ها.
۴. تحلیل مبتنی بر هوش مصنوعی: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تشخیص الگوهای خرابی و برآورد عمر باقی‌مانده کابل (Remaining Useful Life).
۵. دوقلوی دیجیتال (Digital Twin): ایجاد مدل دیجیتالی از کابل که با داده‌های واقعی به‌روزرسانی شده و رفتار آینده تجهیز را پیش‌بینی می‌کند.

۲.۳. بلوغ فناوری (Technology Readiness Level)

از منظر بلوغ فناوری (TRL)، نانوحسگرهای مورد استفاده در کابل‌های قدرت در وضعیت یکسانی قرار ندارند. برخی فناوری‌ها مانند حسگرهای مبتنی بر CNT و گرافن وارد مرحله پایلوت صنعتی و حتی برخی کاربردهای تجاری شده‌اند، در حالی که فناوری‌هایی مانند حسگرهای مبتنی بر MXene یا نانوکامپوزیت‌های خودحسگر هنوز در مراحل توسعه آزمایشگاهی یا نیمه‌صنعتی هستند. این موضوع نشان می‌دهد که در کنار فناوری‌های نسبتاً بالغ، هنوز فرصت قابل توجهی برای نوآوری، ثبت اختراع و توسعه محصولات جدید وجود دارد.

جدول ۴. روند بلوغ فناوری در نانوحسگرها

فناوری	TRL تقریبی	وضعیت توسعه
حسگرهای CNT	۸-۹	تجاری و پایلوت صنعتی
حسگرهای گرافنی	۷-۸	نزدیک به تجاری سازی
نانوسیم‌های فلزی	۷-۸	کاربرد صنعتی محدود
نانوکامپوزیت‌های خودحسگر	۵-۷	پایلوت و تحقیقاتی
حسگرهای MXene	۴-۶	تحقیقاتی و در حال توسعه



شکل ۲. روند تکامل فناوری

۳.۳. رصد پتنت و مالکیت فکری

تحلیل روند ثبت اختراعات، یکی از مهم‌ترین ابزارهای رصد فناوری محسوب می‌شود؛ زیرا نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری صنعتی در چه حوزه‌هایی متمرکز شده است. بررسی پایگاه‌های WIPO Patentscope، Google Patents و Lens.org نشان می‌دهد که از حدود سال ۲۰۱۸ تاکنون، تعداد پتنت‌های مرتبط با حسگرهای هوشمند، کابل‌های پایش‌شونده و سامانه‌های نگهداری پیشگویانه روندی افزایشی داشته است. بررسی محتوای پتنت‌ها نشان می‌دهد که تمرکز نوآوری‌ها از «ساخت حسگر» به سمت «سامانه‌های یکپارچه پایش، تحلیل و تصمیم‌گیری» تغییر یافته است. بسیاری از پتنت‌های جدید، علاوه بر طراحی حسگر، به روش‌های نصب در کابل، ارتباطات بی‌سیم، الگوریتم‌های تشخیص ناهنجاری و مدل‌های پیش‌بینی خرابی نیز می‌پردازند. مهم‌ترین محورهای ثبت اختراع عبارتند از:

- نانوحسگرهای دما و جریان با حساسیت بالا؛
- حسگرهای خوردگی برای غلاف و اتصالات کابل؛
- نانوکامپوزیت‌های خودحسگر؛
- کابل‌های هوشمند مجهز به شبکه حسگر؛
- الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تشخیص و پیش‌بینی خرابی؛
- سامانه‌های Digital Twin برای مدیریت دارایی.

این روند نشان می‌دهد که رقابت جهانی از سطح توسعه مواد به سطح توسعه راهکارهای یکپارچه (Integrated Solutions) منتقل شده است.

۴.۳. بازیگران اصلی فناوری

بازار نانوحسگرها و کابل‌های هوشمند تحت تأثیر همکاری میان شرکت‌های تولیدکننده کابل، سازندگان تجهیزات برق، شرکت‌های فناوری اطلاعات و مراکز پژوهشی قرار دارد [۱۳]. مهم‌ترین بازیگران این حوزه عبارتند از:

جدول ۵. بازیگران اصلی فناوری

شرکت	حوزه فعالیت
Prysmian Group	کابل‌های هوشمند و سامانه‌های پایش
Nexans	کابل‌های فشارقوی و پایش سلامت
Hitachi Energy	مدیریت دارایی و پایش تجهیزات
Siemens Energy	دیجیتالی‌سازی شبکه و تحلیل داده
ABB	سامانه‌های پایش برخط و اتوماسیون
State Grid Corporation of China	توسعه کابل‌های هوشمند و فناوری‌های پایش
Huawei	زیرساخت ارتباطی و IIoT

نکته قابل توجه آن است که بسیاری از این شرکت‌ها، ارزش افزوده اصلی را نه از فروش حسگر، بلکه از ارائه خدمات تحلیل داده، نرم‌افزار، مدیریت دارایی و قراردادهای نگهداری هوشمند به دست می‌آورند.

۵.۳. جغرافیای فناوری و فرصت ایران

از منظر جغرافیای فناوری، چین، ایالات متحده، آلمان، ژاپن و کره جنوبی پیش‌تاز توسعه نانوحسگرها و کابل‌های هوشمند هستند. این کشورها با سرمایه‌گذاری هم‌زمان در حوزه نانومواد، تجهیزات برق، ارتباطات و هوش مصنوعی، زنجیره ارزش نسبتاً کاملی ایجاد کرده‌اند. در مقابل، بسیاری از کشورهای در حال توسعه هنوز در مراحل اولیه استفاده از این فناوری قرار دارند. این وضعیت برای ایران می‌تواند یک فرصت باشد؛ زیرا کشور از ظرفیت‌های مناسبی در تولید نانومواد، ساخت کابل‌های قدرت، توانمندی دانشگاهی و شرکت‌های دانش‌بنیان برخوردار است. با این حال، فاصله ایران با کشورهای پیشرو بیشتر در یکپارچه‌سازی فناوری‌ها، توسعه نرم‌افزارهای تحلیل داده، استانداردسازی و تجاری‌سازی است تا در دانش پایه تولید نانومواد.

۶.۳. تحلیل بازار و منطق کسب‌وکار

بازار نانوحسگرهای مورد استفاده در کابل‌های قدرت را نباید صرفاً بازار فروش حسگر دانست. ارزش اقتصادی این فناوری عمدتاً از کاهش هزینه‌های چرخه عمر تجهیزات (Life Cycle Cost) و افزایش قابلیت اطمینان شبکه ناشی می‌شود. مهم‌ترین محرک‌های رشد بازار عبارت‌اند از:

- افزایش عمر زیرساخت‌های برق در بسیاری از کشورها؛
- توسعه کابل‌های زیرزمینی و پروژه‌های HVDC؛
- رشد انرژی‌های تجدیدپذیر و نیاز به پایش مستمر شبکه؛
- افزایش هزینه خاموشی برای صنایع و مشترکان؛
- توسعه شبکه‌های هوشمند و مدیریت دارایی مبتنی بر داده.

مدل کسب‌وکار غالب در این حوزه نیز در حال تغییر از «فروش تجهیز» به سمت ارائه خدمات پایش، تحلیل داده و نگهداری پیشگویانه به‌عنوان خدمت (Predictive Maintenance as a Service) است. در این مدل، درآمد پایدار از قراردادهای خدماتی و نرم‌افزارهای تحلیلی حاصل می‌شود و این موضوع فرصت مناسبی برای شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی فراهم می‌کند.

۷.۳. تحلیل محیط کلان توسعه فناوری بر اساس چارچوب PESTEL

توسعه نانوحسگرهای هوشمند در صنعت برق، پیامدهایی فراتر از جنبه‌های فنی داشته و می‌توان آن را بر اساس چارچوب PESTEL تحلیل کرد. از منظر سیاسی، توسعه این فناوری با سیاست‌های کلان کشور در حوزه هوشمندسازی شبکه برق، افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی و کاهش وابستگی به فناوری‌های وارداتی همسو است. از منظر اقتصادی، استقرار نانوحسگرها موجب کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش عمر مفید تجهیزات، کاهش خاموشی‌های ناخواسته و بهبود بهره‌وری سرمایه‌گذاری در شبکه برق می‌شود. از منظر اجتماعی، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و کاهش خاموشی‌ها موجب

ارتقای کیفیت خدمات‌رسانی، افزایش رضایت مشتریان و تقویت امنیت انرژی خواهد شد. از منظر فناوریانه، این فناوری یکی از ارکان توسعه شبکه‌های هوشمند بوده و امکان یکپارچه‌سازی با اینترنت اشیای صنعتی، هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال را فراهم می‌کند. از منظر زیست‌محیطی، توسعه نگهداری پیشگویانه و افزایش عمر تجهیزات موجب کاهش تولید پسماندهای صنعتی، کاهش مصرف مواد اولیه و کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از تعمیرات و جایگزینی تجهیزات خواهد شد. همچنین از منظر حقوقی و مقرراتی، توسعه این فناوری نیازمند تدوین استانداردهای ملی، الزامات فنی، حفاظت از مالکیت فکری و ایجاد چارچوب‌های قانونی برای بهره‌برداری از داده‌های پایش وضعیت است [۵-۷].

۴. ظرفیت زیست‌بوم فناوری نانو ایران، فرصت شرکت‌های دانش‌بنیان و پیشنهادهای اجرایی

۴.۱. ظرفیت‌های ایران برای توسعه نانوحسگرهای هوشمند

برخلاف تصور اولیه، توسعه نانوحسگرهای هوشمند در کشور نیازمند ایجاد یک صنعت کاملاً جدید نیست. بخش قابل توجهی از زیرساخت‌های علمی، صنعتی و فناوریانه مورد نیاز، طی دو دهه گذشته در کشور شکل گرفته و اکنون می‌توان با هم‌افزایی این ظرفیت‌ها، مسیر توسعه این فناوری را هموار کرد. در حوزه فناوری نانو، ایران طی سال‌های اخیر به جایگاه قابل قبولی در تولید علم، تربیت نیروی انسانی متخصص و توسعه شرکت‌های فناوری دست یافته است. تولید انواع نانومواد کربنی، نانوذرات فلزی، نانوکامپوزیت‌ها و مواد پیشرفته در داخل کشور، ظرفیت ارزشمندی برای توسعه نسل جدید حسگرهای هوشمند فراهم کرده است. از سوی دیگر، صنعت سیم و کابل ایران نیز یکی از صنایع با سابقه و توانمند کشور محسوب می‌شود. وجود تولیدکنندگان داخلی کابل‌های فشار متوسط و فشارقوی، آزمایشگاه‌های تخصصی، مراکز آزمون و شرکت‌های فعال در حوزه تجهیزات برق، امکان توسعه و ارزیابی نمونه‌های اولیه را فراهم می‌کند. همچنین حضور دانشگاه‌های فعال در حوزه مهندسی برق، علم مواد، فناوری نانو و هوش مصنوعی، در کنار ظرفیت پژوهشی پژوهشگاه نیرو، می‌تواند زمینه ایجاد یک زنجیره نوآوری منسجم را فراهم سازد. با این حال، حلقه مفقوده این زنجیره، یکپارچه‌سازی فناوری‌ها و تجاری‌سازی است؛ موضوعی که نیازمند همکاری نزدیک میان پژوهشگاه‌ها، دانشگاه‌ها، صنعت و شرکت‌های دانش‌بنیان خواهد بود.

۴.۲. فرصت‌های پیش‌روی شرکت‌های دانش‌بنیان

یکی از مهم‌ترین نتایج این گزارش آن است که فرصت‌های اقتصادی این حوزه، صرفاً به تولید نانوحسگر محدود نمی‌شود. در واقع، زنجیره ارزش فناوری شامل چندین لایه است که هر یک می‌تواند زمینه فعالیت شرکت‌های دانش‌بنیان را فراهم کند.

الف) توسعه مواد پیشرفته: شرکت‌های فعال در حوزه فناوری نانو می‌توانند بر تولید نانومواد مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی، MXene و نانوکامپوزیت‌های رسانا برای کاربردهای حسگری تمرکز کنند.

ب) طراحی و ساخت حسگر: توسعه حسگرهای مقاوم در برابر شرایط محیطی سخت، شامل دماهای بالا، رطوبت، میدان‌های الکتریکی و تنش‌های مکانیکی، یکی از مهم‌ترین نیازهای صنعت برق است.

ج) سامانه‌های جمع‌آوری داده: توسعه تجهیزات الکترونیکی شامل واحدهای اندازه‌گیری، دیتالاگرها، گیت‌وی‌های ارتباطی و سامانه‌های اینترنت اشیای صنعتی، فرصت دیگری برای شرکت‌های دانش‌بنیان فراهم می‌کند.

د) نرم‌افزار و هوش مصنوعی: بخش عمده ارزش افزوده آینده این فناوری در توسعه نرم‌افزارهای تحلیل داده، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تشخیص ناهنجاری، پیش‌بینی خرابی و مدل‌های دوقلوی دیجیتال خواهد بود.

ه) خدمات مدیریت دارایی: ارائه خدمات پایش برخط، تحلیل وضعیت تجهیزات و نگهداری پیشگویانه، یکی از مدل‌های کسب‌وکار نوظهور در صنعت برق است که می‌تواند توسط شرکت‌های دانش‌بنیان ارائه شود.

جدول ۶. فرصت‌های فناورانه برای شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی

فرصت توسعه	حوزه
تولید گرافن، CNT، MXene و نانوکامپوزیت‌ها	نانومواد
طراحی نانوحسگرهای دما، جریان و خوردگی	حسگرها
توسعه سامانه‌های اندازه‌گیری و ارتباطی	الکترونیک
تحلیل داده، هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال	نرم‌افزار
پایش برخط و مدیریت هوشمند دارایی	خدمات

۳.۴. تحلیل SWOT

➤ نقاط قوت

- ظرفیت مناسب کشور در فناوری نانو؛
- وجود صنعت داخلی تولید کابل؛
- شبکه گسترده شرکت‌های دانش‌بنیان؛
- توان علمی دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌ها.

➤ نقاط ضعف

- محدود بودن تجربه تجاری‌سازی در این حوزه؛
- نبود استانداردهای ملی ویژه نانوحسگرهای صنعت برق؛
- وابستگی برخی تجهیزات الکترونیکی به واردات؛
- فاصله میان پژوهش و صنعت.

➤ فرصت‌ها

- افزایش نیاز صنعت برق به پایش برخط؛
- توسعه شبکه‌های هوشمند؛
- رشد بازار مدیریت دارایی؛
- امکان صادرات خدمات فنی و نرم‌افزاری به کشورهای منطقه.

➤ تهدیدها

- سرعت بالای توسعه فناوری در کشورهای پیشرو؛

- رقابت شرکت‌های بزرگ بین‌المللی؛
- چالش‌های مالکیت فکری و ثبت اختراع؛
- ریسک‌های ناشی از نبود استانداردهای مشترک.

۴.۴. نقشه راه پیشنهادی برای توسعه فناوری در ایران

با توجه به وضعیت فعلی کشور و روندهای جهانی، توسعه این فناوری می‌تواند در چهار گام دنبال شود:

مرحله اول: توسعه دانش فنی و نمونه آزمایشگاهی

- توسعه نانوحسگرهای دما، جریان و خوردگی؛
- ارزیابی عملکرد در شرایط آزمایشگاهی؛
- ثبت اختراعات داخلی.

مرحله دوم: اجرای پروژه‌های پایلوت

- نصب حسگرها بر روی کابل‌های واقعی؛
- پایش بلندمدت عملکرد؛
- توسعه سامانه جمع‌آوری داده.

مرحله سوم: توسعه سامانه هوشمند

- اتصال حسگرها به اینترنت اشیای صنعتی؛
- توسعه الگوریتم‌های هوش مصنوعی؛
- ایجاد مدل دوقلوی دیجیتال.

مرحله چهارم: تجاری‌سازی

- تدوین استانداردهای ملی؛
- تولید صنعتی؛
- توسعه بازار داخلی و صادرات.

۵. تحلیل اقتصادی و ارزش‌آفرینی نانوحسگرهای هوشمند در مدیریت دارایی‌های صنعت برق

یکی از چالش‌های اصلی در پذیرش فناوری‌های نوین پایش وضعیت، تمرکز بر هزینه اولیه خرید و نصب تجهیزات است. در حالی که تجربه شرکت‌های برق پیشرو نشان می‌دهد معیار صحیح تصمیم‌گیری، هزینه چرخه عمر دارایی (Life Cycle Cost - LCC) است، نه صرفاً هزینه اولیه سرمایه‌گذاری (CAPEX). در رویکرد سنتی، برنامه‌های تعمیر و نگهداری عمدتاً بر اساس زمان (Time-Based Maintenance) یا وقوع خرابی (Corrective Maintenance) تدوین می‌شوند. این روش‌ها معمولاً منجر به دو پیامد اقتصادی می‌شوند:

- انجام تعمیرات غیرضروری برای تجهیزاتی که هنوز در وضعیت مناسب قرار دارند (Over-maintenance)؛
- یا عدم شناسایی خرابی‌های در حال شکل‌گیری و تحمیل هزینه‌های سنگین ناشی از خرابی ناگهانی (Under-maintenance).

بر اساس دستورالعمل‌های EPRI، هدف اصلی سامانه‌های پایش برخط و نگهداری مبتنی بر وضعیت (Condition-Based Maintenance) آن است که زمان انجام تعمیرات بر اساس وضعیت واقعی تجهیز تعیین شود. این رویکرد ضمن کاهش فعالیت‌های تعمیراتی غیرضروری، احتمال خرابی‌های ناگهانی و هزینه‌های ناشی از آن را نیز کاهش می‌دهد. برخلاف تصور رایج، مهم‌ترین مزیت اقتصادی نانوحسگرها کاهش قیمت کابل نیست، بلکه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش ارزش دارایی در طول عمر آن است. در چارچوب مدیریت دارایی، نانوحسگرها در پنج حوزه اصلی ارزش اقتصادی ایجاد می‌کنند:

جدول ۷. ارزش اقتصادی نانوحسگرها در چارچوب مدیریت دارایی

اثر اقتصادی	حوزه ارزش‌آفرینی
کاهش OPEX	کاهش تعمیرات غیرضروری
کاهش خرابی اضطراری	تشخیص زودهنگام عیب
تعویق سرمایه‌گذاری جایگزینی	افزایش عمر بهره‌برداری کابل
افزایش قابلیت اطمینان شبکه	کاهش خاموشی‌های ناخواسته
بهینه‌سازی CAPEX	بهیود تصمیم‌گیری سرمایه‌ای

این رویکرد دقیقاً منطبق بر مدل مدیریت دارایی EPRI است که بر تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، ارزیابی سلامت دارایی و مدیریت ریسک تأکید دارد.

در صنعت برق، موفقیت یک فناوری جدید با شاخص‌های عملکردی ارزیابی می‌شود. انتظار می‌رود استقرار نانوحسگرها در کابل‌های قدرت بر شاخص‌های زیر اثر مستقیم داشته باشد:

جدول ۸. شاخص‌های کلیدی عملکرد نانوحسگرها و اثرات آن‌ها

شاخص عملکرد	اثر مورد انتظار
OPEX	کاهش
نرخ خرابی اضطراری	کاهش
MTBF (میانگین زمان بین دو خرابی)	افزایش
MTTR (میانگین زمان تعمیر)	کاهش
Asset Health Index	افزایش
Remaining Useful Life (RUL)	افزایش
قابلیت اطمینان شبکه	افزایش
ریسک بهره‌برداری	کاهش

این شاخص‌ها مبنای ارزیابی پروژه‌های مدیریت دارایی در بسیاری از شرکت‌های برق دنیا هستند و امکان مقایسه عملکرد قبل و بعد از استقرار فناوری را فراهم می‌کنند. به دلیل تفاوت شرایط بهره‌برداری میان شرکت‌های برق، ارائه یک عدد ثابت برای منافع اقتصادی صحیح نیست. از این رو، همانند بسیاری از گزارش‌های EPRI، نتایج به صورت دامنه‌های مورد انتظار بیان می‌شود.

جدول ۹. ارزش اقتصادی نانوحسگرها در چارچوب مدیریت دارایی

شاخص	دامنه بهبود گزارش شده (%)
کاهش هزینه تعمیر و نگهداری	۱۰ تا ۲۵
کاهش تعمیرات زمان‌محور	۱۵ تا ۳۰
کاهش توقف‌های برنامه‌ریزی نشده	۲۰ تا ۵۰
افزایش دسترسی پذیرش تجهیزات	۵ تا ۱۵
افزایش عمر دارایی	۱۰ تا ۳۰
کاهش فعالیت‌های بازرسی میدانی	۲۰ تا ۴۰

این ارقام باید به عنوان دامنه‌های مرجع تلقی شوند و مقدار واقعی آن‌ها به نوع دارایی، شرایط بهره‌برداری، بلوغ سامانه پایش و کیفیت تحلیل داده وابسته است. EPRI نیز تصریح می‌کند که منافع اقتصادی هر پروژه باید بر اساس سابقه خرابی‌ها، هزینه توقف تجهیزات و مشخصات هر شرکت برق برآورد شود و ارقام کلی صرفاً برای تدوین Business Case اولیه مناسب هستند.

با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های داخلی، پیشنهاد می‌شود شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع، ارزیابی اقتصادی این فناوری را بر اساس شاخص‌های زیر انجام دهند:

ارزش اقتصادی سالانه = $(\Delta \text{OPEX}) + (\Delta \text{هزینه خاموشی}) + (\Delta \text{هزینه جایگزینی دارایی}) + (\Delta \text{هزینه بازرسی})$ که در آن:

- ΔOPEX : صرفه‌جویی در هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات؛
- Δ هزینه خاموشی: کاهش هزینه ناشی از خاموشی‌های ناخواسته و انرژی تأمین نشده؛
- Δ هزینه جایگزینی: رزش اقتصادی ناشی از افزایش عمر دارایی؛
- Δ هزینه بازرسی: کاهش هزینه‌های پایش و بازدیدهای میدانی.

این چارچوب با اصول تحلیل هزینه-فایده مورد استفاده در پروژه‌های مدیریت دارایی EPRI همخوانی دارد و بدون نیاز به داده‌های محرمانه نیز قابل استفاده است [۳-۵، ۱۴].

۶. جمع‌بندی

نانوحسگرهای هوشمند را نمی‌توان صرفاً نسل جدیدی از تجهیزات اندازه‌گیری دانست؛ این فناوری یکی از پیشران‌های تحول دیجیتال در صنعت برق و از ارکان مدیریت هوشمند دارایی‌ها به شمار می‌رود. با فراهم کردن امکان پایش برخط دما، جریان،

خوردگی و سایر شاخص‌های سلامت کابل، این حسگرها زمینه‌گذار از نگهداری واکنشی به نگهداری پیشگویانه را فراهم می‌کنند و در نتیجه، احتمال خرابی‌های ناگهانی، خاموشی‌های ناخواسته و هزینه‌های تعمیرات را کاهش می‌دهند. روندهای جهانی نشان می‌دهد که رقابت آینده در این حوزه تنها بر سر توسعه حسگرها نخواهد بود، بلکه بر سر ارائه راهکارهای یکپارچه شامل نانومواد، سامانه‌های پایش، اینترنت اشیای صنعتی، هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال خواهد بود. از این منظر، توسعه نانوحسگرهای هوشمند را باید بخشی از راهبرد کلان افزایش تاب‌آوری، هوشمندسازی و دیجیتالی‌سازی شبکه برق دانست. ایران با برخورداری از ظرفیت‌های قابل توجه در فناوری نانو، صنعت کابل، دانشگاه‌ها، پژوهشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان، فرصت مناسبی برای ورود هدفمند به این حوزه دارد. بهره‌گیری از این ظرفیت‌ها، همراه با اجرای پروژه‌های پایلوت، تدوین استانداردهای ملی، توسعه نرم‌افزارهای تحلیل داده و حمایت از نوآوری، می‌تواند زمینه شکل‌گیری نسل جدیدی از محصولات و خدمات فناورانه را فراهم سازد. در نهایت، نانوحسگرهای هوشمند نه یک فناوری آینده، بلکه ابزاری راهبردی برای افزایش تاب‌آوری شبکه برق، ارتقای قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌های چرخه عمر تجهیزات و تحقق مدیریت هوشمند دارایی‌ها در صنعت برق کشور هستند.

۷. پیشنهادهای اجرایی

با توجه به نتایج این گزارش، پیشنهادهای زیر برای تسریع توسعه این فناوری در کشور ارائه می‌شود:

➤ برای پژوهشگاه نیرو

- تعریف یک برنامه پژوهشی راهبردی در حوزه نانوحسگرهای صنعت برق؛
- اجرای پروژه‌های پایلوت در همکاری با شرکت‌های برق منطقه‌ای؛
- ایجاد بانک داده ملی برای پایش سلامت کابل‌های قدرت.

➤ برای وزارت نیرو و توانیر

- حمایت از اجرای پروژه‌های آزمایشی در شبکه؛
- تدوین الزامات فنی برای استفاده از سامانه‌های پایش برخط؛
- لحاظ کردن فناوری‌های پایش هوشمند در اسناد توسعه شبکه.

➤ برای شرکت‌های تولیدکننده کابل

- همکاری در توسعه کابل‌های هوشمند؛
- استفاده از نانوکامپوزیت‌های خودحسگر در طراحی محصولات جدید؛
- مشارکت در تدوین استانداردها.

➤ برای شرکت‌های دانش‌بنیان

- تمرکز بر توسعه سامانه‌های یکپارچه حسگر، ارتباطات و تحلیل داده؛
- سرمایه‌گذاری در توسعه نرم‌افزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی؛
- توجه به ثبت اختراعات و حفاظت از مالکیت فکری.

منابع و مراجع

[1] International Council on Large Electric Systems. (2024). *Condition Assessment and Diagnostic Methods to Support Asset Management of MV Cable Networks* (Technical Brochure TB 924, WG B1.58). Paris: CIGRE. (e-cigre.org)

- [2] International Council on Large Electric Systems. (2023). *Condition Evaluation and Lifetime Strategy of HV Cable Systems* (Technical Brochure TB 912, WG B1.68). Paris: CIGRE. ([ELECTRA](#))
- [3] Electric Power Research Institute. (2020). *Asset Management Information Systems* (White Paper No. 3002019783). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. ([Transmission and Substations](#))
- [4] Tianwen Zhu, Yongyi Ran, Xin Zhou, & Yonggang Wen. (2020). *A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches*. arXiv:1912.07383. ([arXiv](#))
- [5] Electric Power Research Institute. (2026). *Transmission Asset Management Analytics – At a Glance* (Document No. 3002025130). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. ([Transmission and Substations](#))
- [6] Electric Power Research Institute. *Asset, Reliability & Resiliency Analytics*. Distribution Research Program. ([Distribution](#))
- [7] International Council on Large Electric Systems. (2026). *Regulatory Framework on Modernization and Extension of Useful Life of Transmission/Distribution* (Technical Brochure TB 985). Paris: CIGRE. ([e-cigre.org](#))
- [8] Nag, A., Chaudhuri, D. Advances in nanomaterials for energy and sensing applications: from fundamentals to device. *Discov Electron* 3, 13 (2026).
- [9] Novoselov, K. S., Fal’ko, V. I., Colombo, L., et al. (2012). *A roadmap for graphene*. *Nature*, 490, 192–200. <https://doi.org/10.1038/nature11458>
- [10] De Volder, M. F. L., Tawfick, S. H., Baughman, R. H., & Hart, A. J. (2013). *Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications*. *Science*, 339 (6119), 535–539. <https://doi.org/10.1126/science.1222453>
- [11] Anasori, B., Lukatskaya, M. R., & Gogotsi, Y. (2017). *2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage*. *Nature Reviews Materials*, 2, 16098.
- [12] Electric Power Research Institute. *Underground Distribution Cable Reference: 2025 Edition* (Product No. 3002033003). ([Distribution](#))
- [13] MarketsandMarkets. (2024). *Smart Sensors Market – Global Forecast to 2029*.
- [14] Electric Power Research Institute. (2021). *Condition Based Replacement for Transmission and Distribution Assets* (White Paper No. 3002020583). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. ([Transmission and Substations](#))