گزارش رصد فناوری؛ عملیات توان‌افزا: نقش دیجیتالی‌سازی در افزایش توان خروجی نیروگاه‌های حرارتی

مقدمه گزارش:

در حالی که دیجیتالی‌سازی تاکنون بیشتر بر بهبود بازدهی و کاهش خرابی‌های نیروگاه‌های حرارتی متمرکز بوده است، یک کاربرد راهبردی‌تر آن، افزایش حداکثر توان قابل تولید (MW) واحدهای نیروگاهی است. با استفاده از فناوری‌های نوین دیجیتال در سطح توربین‌ها، قطعات داغ، سیستم‌های کنترل و ابزار دقیق، می‌توان توان خروجی یک نیروگاه حرارتی را بدون تغییر در تجهیزات فیزیکی اصلی، تا ۳–۵ درصد افزایش داد. این مقاله به بررسی چگونگی تحقق این افزایش توان از طریق دیجیتالی‌سازی می‌پردازد.

نیروگاه توان‌افزا: فراتر از بازدهی

مفهوم "نیروگاه توان‌افزا" بر این اصل استوار است که در بسیاری از نیروگاه‌های حرارتی، فاصله معناداری بین توان نامی طرح (Rated Power) و توان قابل دستیابی واقعی (Achievable Power) وجود دارد. عواملی مانند افت‌های عملکردی تدریجی، محدودیت‌های کنترلی محافظه‌کارانه، شرایط نامطلوب سوخت و محیط، و فرسودگی قطعات داغ باعث می‌شوند نیروگاه نتواند به حداکثر توان طراحی خود دست یابد. دیجیتالی‌سازی با حذف این محدودیت‌ها، "توان پنهان" نیروگاه را آزاد می‌کند.

شناسنامه گزارش رصد فناوری

عنوان گزارش	عملیات توان‌افزا: نقش دیجیتالی‌سازی در افزایش توان خروجی نیروگاه‌های حرارتی
حوزه تخصصی	تولید برق
مخاطبان اصلی	شرکت‌های فناور و دانش‌بنیان فعال در حوزه ارتقاء واحدهای نیروگاهی؛ نیروگاه‌ها؛ سیاست‌گذاران
سفارش‌دهنده	پژوهشکده تولید پژوهشگاه نیرو
نویسندگان	عباس یوسف‌پور (ayousefpour@nri.ac.ir)
ناظر	محمدابراهیم سربندی فراهانی
پژوهشکده، گروه پژوهشی	پژوهشکده تولید نیرو، مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری ارتقاء واحدهای نیروگاهی پژوهشگاه نیرو
تاریخ مطالعه	خردادماه ۱۴۰۵

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱- مداخلات دیجیتال برای افزایش توان ۴

۱-۱- بهینه‌سازی دیجیتال عملکرد توربین گاز (در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی)..... ۴

۱-۲- پایش و بهینه‌سازی دیجیتال توربین بخار (قسمت فشار قوی، متوسط و ضعیف) ۴

۱-۳- مدیریت دیجیتال قطعات داغ نیروگاهی (بویلر، سوپرهیتر و ری هیتر) ۴

۱-۴- دیجیتالی‌سازی سیستم کنترل نیروگاه DCS به APC (Advanced Process Control) یا APS (Automatic Plant Start-up/Shut-down System)..... ۵

۱-۵- ارتقاء ابزار دقیق و شبکه سنسورها ۵

۲- عملکرد برخی شرکت‌های فعال ۵

۲-۱- بهینه‌سازی دیجیتال عملکرد توربین گاز ۶

۲-۲- پایش و بهینه‌سازی دیجیتال توربین بخار و قطعات داغ..... ۶

۲-۳- مدیریت دیجیتال قطعات داغ نیروگاهی (بویلر)..... ۷

۲-۴- دیجیتالی‌سازی سیستم کنترل نیروگاه..... ۷

۲-۵- ارتقاء ابزار دقیق و سنسورهای مجازی ۸

۳- زنجیره ارزش افزایش توان ۸

۴- چشم‌انداز..... ۸

۵- مقایسه روش‌های رایج ارتقاء توان با روش‌های مبتنی بر دیجیتالی‌سازی ۹

۵-۱- روش‌های رایج ارتقاء توان (سنتی) ۹

۵-۲- روش‌های مبتنی بر دیجیتالی‌سازی..... ۹

۵-۳- تحلیل تطبیقی..... ۱۰

۵-۴- تحلیل اقتصادی و استراتژیک ۱۱

۵-۵- جدول تصمیم‌گیری: چه زمانی کدام مسیر را انتخاب کنیم؟ ۱۱

۶- بلوغ فناوری و افق آینده راهکارهای دیجیتال در نیروگاه‌های حرارتی ۱۲

۶-۱- دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) و مدل‌های خودتطبیق‌شونده ۱۳
۶-۲- نگهداری پیش‌بینی‌کننده مبتنی برAI ۱۴
۶-۳- سیستم‌های کنترل پیشرفته MPC و کنترل تطبیقی ۱۴
۶-۴- AR/VR برای آموزش و شبیه‌سازی ایمنی..... ۱۵
۶-۵- سیستم‌های یکپارچه داده و داشبوردهای نظارتی..... ۱۵
۶-۶- برنامه و افق آینده فناوری‌ها..... ۱۵
۶-۷- چالش‌های پیش رو برای بلوغ کامل ۱۶
جمع‌بندی نهایی: آیا باید منتظر بلوغ کامل بود؟..... ۱۷

۱- مداخلات دیجیتال برای افزایش توان

۱-۱- بهینه‌سازی دیجیتال عملکرد توربین گاز (در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی):

در یک نیروگاه سیکل ترکیبی، توان خروجی کل مستقیماً به توان توربین گاز وابسته است. راهکارهای دیجیتال زیر باعث افزایش توان توربین گاز می‌شوند:

- **سیستم‌های کنترل احتراق تطبیقی(Adaptive Combustion Control)** : با استفاده از یادگیری ماشین و آنالیز لحظه‌ای پارامترهایی مانند دمای خروجی محفظه احتراق (Tfire)، فشار و رطوبت محیط، سیستم کنترل به طور خودکار نسبت سوخت به هوا را برای رسیدن به حداکثر دمای مجاز ورودی توربین (TIT) تنظیم می‌کند. این کار بدون ورود به ناحیه ناپایدار احتراق (خاموشی شعله یا نوسان) انجام شده و توان را تا ۲ درصد افزایش می‌دهد.
- **مدیریت هوشمند خنک‌کاری پره‌ها (Smart Blade Cooling Management) :** سنسورهای فیبر نوری تعبیه شده در پره‌های داغ توربین، دمای واقعی فلز را گزارش می‌کنند. یک الگوریتم دیجیتال، میزان جریان هوای خنک‌کاری را دقیقاً به اندازه نیاز کاهش می‌دهد (درحالی که در روش سنتی، خنک‌کاری بیش از حد انجام می‌شود). کاهش هوای خنک‌کاری (که از کمپرسور گرفته می‌شود) به معنای افزایش هوای شرکت‌کننده در احتراق و در نتیجه افزایش مستقیم توان شفت توربین است.

۱-۲- پایش و بهینه‌سازی دیجیتال توربین بخار (قسمت فشار قوی، متوسط و ضعیف):

در توربین بخار، افزایش توان از طریق بهبود راندمان جریان بخار و کاهش افت‌های داخلی حاصل می‌شود:

- **تنظیم دیجیتال فاصله نوک پره‌ها (Digital Tip Clearance Optimization) :** با استفاده از سنسورهای جابجایی‌سنج خازنی و پردازش سیگنال پیشرفته، فاصله بین نوک پره‌های دوار و استاتور به صورت بی‌درنگ اندازه‌گیری می‌شود. یک سیستم کنترل فعال، موقعیت روتور را نسبت به استاتور (با استفاده از یاتاقان‌های قابل تنظیم) تغییر می‌دهد تا فاصله نوک پره همواره در حداقل مقدار مجاز باقی بماند. این کار نشتی بخار از روی پره‌ها را به شدت کاهش داده و توان خروجی را تا ۱.۵ درصد افزایش می‌دهد.
- **بهبود عملکرد تله‌های بخار و درین‌ها (Smart Steam Trap Management) :** تجمع میعانات در مسیر بخار (به ویژه در استارت‌آپ و بارهای جزئی) باعث ضربه قوچ و افت توان می‌شود. سنسورهای سطح و دما به همراه شیرهای کنترل هوشمند، تخلیه میعانات را فقط در زمان لازم انجام می‌دهند و از هدررفت بخار زنده جلوگیری می‌کنند. این اقدام ساده، توان قابل توجهی را به توربین بازمی‌گرداند.

۱-۳- مدیریت دیجیتال قطعات داغ نیروگاهی (بویلر، سوپرهیتر و ری هیتر):

دمای بالای بخار خروجی از بویلر (سوپرهیت و ری‌هیت) تأثیر مستقیم بر توان توربین بخار دارد. هر ۱۰ درجه سانتیگراد افزایش دمای بخار تازه، توان را حدود ۱-۰.۵ درصد افزایش می‌دهد.

- **سیستم‌های دیجیتال جلوگیری از تشکیل رسوب (Digital Fouling Prevention) :** رسوب روی لوله‌های سوپرهیتر و اکونومایزر، انتقال حرارت را کاهش داده و دمای بخار را پایین می‌آورد. با استفاده از مدل‌های دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) از جریان گازهای داغ و بخار، نقاط بحرانی مستعد رسوب شناسایی شده و فرآیند "ضربه‌زنی دوده (Soot blowing) "فقط در همان

نقاط و به میزان بهینه انجام می‌شود. این رویکرد از آسیب به لوله‌ها جلوگیری کرده و دمای بخار را در حداکثر مقدار مجاز تثبیت می‌کند.

- **پایش دیجیتال خزش و عمر قطعات داغ:** الگوریتم‌های پیشرفته با تحلیل داده‌های دمای فلز، زمان ماندگاری و سیکل‌های حرارتی، عمر مفید واقعی قطعات را محاسبه می‌کنند. این امکان را فراهم می‌آورد که واحد بتواند آگاهانه، برای مدت محدود و در شرایط پیک شبکه، از دمای نامی طرح عبور کرده (Over-firing) و توان بیشتری تولید کند، بدون اینکه ریسک خرابی قریب‌الوقوع ایجاد شود.

۱-٤- دیجیتالی‌سازی سیستم کنترل نیروگاه DCS به APC (Advanced Process Control) یا APS (Automatic Plant Start-up/Shut-down System)

سیستم کنترل سنتی (DCS) برای حفظ پایداری، با حاشیه اطمینان بالا کار می‌کند.

- **سیستم کنترل پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر مدل(MPC) :** به جای کنترل فیدبکی ساده، MPC از یک مدل دیجیتال از کل فرآیند استفاده کرده و اثر متغیرهای ورودی (سوخت، هوا، آب) بر خروجی (توان، دما، فشار) را پیش‌بینی می‌کند. این سیستم می‌تواند به طور همزمان چندین متغیر را به نزدیک‌ترین حد ممکن به محدودیت‌های عملیاتی برساند (Constraint Control) و در نتیجه توان خروجی را ۱ تا ۲ درصد بدون ایجاد ناپایداری افزایش دهد.
- **یکپارچه‌سازی کنترل واحدها (Plant-wide Optimization) :** در نیروگاه‌های چندواحدی، سیستم کنترل دیجیتال، توزیع بار بین واحدها را بهینه می‌کند. به جای تقسیم مساوی بار، واحدهایی که در لحظه پتانسیل توان بیشتری دارند (مثلاً به دلیل خلوص بالاتر آب یا دمای کمتر ورودی کندانسور) بار بیشتری دریافت می‌کنند تا مجموع توان خروجی نیروگاه ماکزیمم شود.

۱-۵- ارتقاء ابزار دقیق و شبکه سنسورها:

افزایش توان بدون اندازه‌گیری دقیق غیرممکن است.

- **سنسورهای مجازی(Virtual Sensors) :** به جای نصب سنسورهای فیزیکی پرهزینه و غیرقابل اعتماد در نقاط داغ، از الگوریتم‌های نرم‌افزاری استفاده می‌شود تا پارامترهای حیاتی (مانند دمای فلز در اعماق پره) را بر اساس داده‌های دیگر (دمای گاز خروجی، دور توربین، دبی سوخت) تخمین بزنند. این سنسورهای مجازی، داده‌های لازم برای اجرای الگوریتم‌های افزایش توان را فراهم می‌کنند.
- **شبکه سنکرون فازور (PMU) در سطح نیروگاه:** با نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در خروجی ژنراتور، زاویه توان و راکتانس همزمان ماشین با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. این اطلاعات به سیستم تحریک ژنراتور اجازه می‌دهد تا ولتاژ و توان راکتیو را بهینه کرده و توان اکتیو قابل تحویل به شبکه را در آستانه پایداری افزایش دهد.

۲- عملکرد برخی شرکت‌های فعال

شرکت	رویکرد اصلی	نمونه شاخص	دستاورد کلیدی در افزایش توان
زیمنس انرژی (Siemens Energy)	ترکیب "دوقلوی دیجیتال" با "یادگیری تقویتی (AI) "برای بهینه‌سازی بلادرنگ	نیروگاهDEWA ، جبل علی، امارات	افزایش توان تا ۳.۵ مگاوات به ازای هر توربین گاز

آلستوم(Alstom)	ارتقاء سخت‌افزاری (MXL2) همراه با بهینه‌سازی برای افزایش توان و راندمان	نیروگاه South Humber Bank، بریتانیا	افزایش ۱۲ مگاوات توان ناخالص و بهبود ۱٪ راندمان در هر واحد
جنرال الکتریک(GE)	تمرکز بر نوآوری در خنک‌کاری قطعات داغ با استفاده از ساخت افزایشی (پرینت سه بعدی)	طراحی پره‌های توربین با ساختار چندلایه	امکان افزایش دمای کاری و در نتیجه توان توربین

۲-۱- بهینه‌سازی دیجیتال عملکرد توربین گاز

مثال اجرا شده: نیروگاهDEWA ، جبل علی، امارات (زیمنس انرژی)

زیمنس انرژی با همکاری اداره آب و برق دبی(DEWA) ، موفق شد برای اولین بار در جهان از یک **سیستم کنترل هوشمند مبتنی بر یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning)** بر روی پنج توربین گاز مدل SGT5-4000F در نیروگاه "M Station" استفاده کند.

- **فناوری:** این سیستم از یک "دوقلوی دیجیتال" برای تخمین دقیق دمای نقطه اشتعال در لحظه استفاده می‌کند. الگوریتم هوش مصنوعی با یادگیری از داده‌های عملیاتی، به طور مداوم پارامترهای احتراق را برای جبران افت توان ناشی از فرسودگی (Degradation) تنظیم می‌کند .
- **دستاورد افزایش توان:** این راهکار باعث افزایش توان خروجی هر توربین گاز تا **۳.۵ مگاوات** و در عین حال کاهش ۱۰ درصدی انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOx) شده است.

مثال دیگر: نیروگاه Dunamenti ، مجارستان (زیمنس انرژی)

در این پروژه، با تعویض کامل روتور یک توربین گاز SGT5-2000E و ارتقاء سیستم کنترل آن بهSPPA-T3000 ، توان خروجی واحد از **۱۴۸ مگاوات به ۱۵۵ مگاوات** افزایش یافت .

۲-۲- پایش و بهینه‌سازی دیجیتال توربین بخار و قطعات داغ

مثال اجرا شده: نیروگاهEnecogen ، هلند (زیمنس انرژی)

این نیروگاه سیکل ترکیبی ۹۵۸ مگاواتی با دو توربین گاز SGT5-4000F و دو توربین بخارSST5-5000 ، از سیستم کنترل یکپارچه Omnivise T3000 استفاده می‌کند.

- **فناوری:** سیستم کنترل پیشرفته با اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی، امکان افزایش و کاهش سریع بار (Load Ramping) و استارت‌های مکرر را با حداقل سایش فراهم می‌کند. این قابلیت به ویژه برای جبران نوسانات شبکه ناشی از انرژی‌های تجدیدپذیر حیاتی است.
- **دستاورد افزایش توان:** اگرچه عدد دقیق افزایش توان منتشر نشده، اما هدف اصلی این سیستم، **ماکزیمم کردن توان قابل تحویل** در هر لحظه با در نظر گرفتن محدودیت‌های حرارتی و مکانیکی توربین‌هاست .

ابتکار فناورانه: جنرال الکتریک (GE) و خنک‌کاری هوشمند پره‌ها

اگرچه این یک مطالعه موردی خاص از یک نیروگاه نیست، اما نشان‌دهنده تلاش پیشرو در زمینه افزایش توان از طریق طراحی قطعات داغ است.

- **فناوری** GE **:**در پتنت خود (US10774656B2) از **تکنیک ساخت افزایشی (پرینت سه بعدی)** برای ایجاد پره‌هایی با دیواره‌های چندلایه و کانال‌های خنک‌کاری بسیار پیچیده استفاده کرده است .
- **دستاورد افزایش توان:** این طراحی، راندمان خنک‌کاری را به شدت افزایش می‌دهد و به توربین اجازه می‌دهد در **دمای بالاتری** کار کند. افزایش دمای کاری مستقیماً به معنای افزایش توان و راندمان خروجی توربین است.

۲-۳- مدیریت دیجیتال قطعات داغ نیروگاهی (بویلر)

منطق حاکم بر استفاده از **دوقلوی دیجیتال** که در مثال‌های زیمنس (DEWA و Enecogen) به کار رفته، دقیقاً برای همین منظور نیز قابل تعمیم است. این مدل‌ها می‌توانند نقاط داغ و تنش‌های حرارتی روی سوپرهیترها و ری‌هیترها را شبیه‌سازی کرده و با بهینه‌سازی فرآیند "دوده‌گیری"، از افت دمای بخار (و در نتیجه افت توان) جلوگیری کنند.

۲-٤- دیجیتالی‌سازی سیستم کنترل نیروگاه

مثال اجرا شده: نیروگاه خودرو فولکس واگن(VW) ، آلمان (زیمنس انرژی)

زیمنس انرژی سیستمی را در این نیروگاه پیاده‌سازی کرده که قابلیت **کارکرد خودکار ۷۲ ساعته (BosB72)** بدون نیاز به اپراتور انسانی را فراهم می‌کند .

- **فناوری:** سیستم کنترل Omnivise T3000 کلیه وظایف استارت، تنظیم بار بر اساس تقاضای شبکه و توقف ایمن را به صورت خودکار انجام می‌دهد.
- **دستاورد افزایش توان:** اگرچه هدف اصلی این پروژه "خودکاری" بوده، اما فلسفه حاکم بر آن (کنترل پیشرفته و پیش‌بین) دقیقاً همان چیزی است که در سیستم‌های MPC برای نزدیک کردن فرآیند به محدودیت‌های توان استفاده

می‌شود. چنین سیستمی امکان واکنش بسیار سریع‌تر و بهینه‌تر به نوسانات شبکه را فراهم کرده و در نتیجه ظرفیت تولید مؤثر نیروگاه را افزایش می‌دهد .

۲-۵- ارتقاء ابزار دقیق و سنسورهای مجازی

مثال اجرا شده: نرم‌افزار زیمنس برای افزایش ظرفیت توربین گاز

در مستندات منتشر شده توسط زیمنس به قابلیت نرم‌افزارهای مدیریت انرژی صنعتی خود اشاره شده که منجر به **افزایش ۲۵ درصدی ظرفیت در یک مرکز تست توربین گاز** شده است .

- **فناوری:** این افزایش ظرفیت بدون تغییر در سخت‌افزار اصلی و صرفاً با استفاده از بهینه‌سازی‌های نرم‌افزاری و الگوریتم‌های پیشرفته حاصل شده است. این امر به وضوح نقش حیاتی **"سنسورهای مجازی "**و تحلیل داده‌ها را در کشف توان پنهان تجهیزات نشان می‌دهد.

۳- زنجیره ارزش افزایش توان

این مداخلات دیجیتال تنها در سطح تجهیزات خلاصه نمی‌شوند:

- **مدیریت سوخت هوشمند:** آنالایزرهای آنلاین، کیفیت سوخت را بی‌درنگ گزارش می‌کنند. سیستم کنترل خودکار، دبی سوخت و هوای احتراق را برای جبران نوسانات کیفیت تنظیم کرده تا توان خروجی نوسان نداشته باشد.
- **پایش دیجیتال برج خنک‌کن و کندانسور:** هر درجه کاهش در خلأ کندانسور (فشار پشت توربین)، توان خروجی را حدود ۱- ۰/۵ درصد افزایش می‌دهد. سنسورهای دما، فشار و رطوبت در سراسر برج خنک‌کن، الگوی جریان هوا و آب را بهینه می‌کنند.

تسهیل‌کننده‌های تحول توان‌افزا

برای تحقق افزایش پایدار توان، موارد زیر ضروری است:

۱. **مدل دوقلوی دیجیتال با دقت بالا:** مدلی که رفتار حرارتی-مکانیکی توربین و بویلر را با خطای کمتر از ۱٪ شبیه‌سازی کند.
۲. **فرهنگ "رانش به سمت محدودیت":** تغییر رویه از "کارکرد ایمن و محافظه‌کارانه" به "کارکرد هوشمندانه و نزدیک به محدودیت‌ها" با نظارت دیجیتال پیوسته.
۳. **همکاری با سازندگان تجهیزات اصلی(OEM) :** برای دسترسی به مدل‌های دقیق قطعات داغ و الگوریتم‌های تأیید شده افزایش توان.

٤- چشم‌انداز

پیاده‌سازی یکپارچه راهکارهای فوق می‌تواند نتایج زیر را به همراه داشته باشد:

- **افزایش توان خروجی:** بین ۳ تا ۵ درصد توان نامی واحد (به عنوان مثال، افزایش ۱۵ تا ۲۵ مگاوات برای یک واحد ۵۰۰ مگاواتی).
- **کاهش نرخ افت توان:** کاهش نرخ سالانه افت توان ناشی از فرسودگی از ۰.۵٪ به کمتر از ۰.۱٪.

- **بازگشت سرمایه(ROI) :** با توجه به اینکه هزینه اصلی مربوط به نرم‌افزار و سنسورهاست (نه تجهیزات سنگین مکانیکی)، دوره بازگشت سرمایه معمولاً کمتر از ۱۲ ماه خواهد بود.

در نهایت، دیجیتالی‌سازی دیگر فقط برای "بهتر کار کردن" نیست، بلکه برای "بیشتر تولید کردن" از سرمایه فیزیکی موجود است. نیروگاه آینده، نیروگاهی است که هر مگاوات پنهان خود را از طریق الگوریتم‌های هوشمند آشکار می‌سازد.

۵- مقایسه روش‌های رایج ارتقاء توان با روش‌های مبتنی بر دیجیتالی‌سازی

برای پاسخ به این پرسش که «آیا حتماً باید به سمت دیجیتالی‌سازی رفت»، ابتدا باید این دو دسته روش را از جنبه‌های مختلف شامل ماهیت، هزینه، زمان اجرا، پایداری نتایج و بازگشت سرمایه مقایسه کنیم.

۵-۱- روش‌های رایج ارتقاء توان (سنتی)

این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر **تغییرات سخت‌افزاری و فیزیکی** در تجهیزات نیروگاه هستند:

روش	توضیح	مزایا	معایب
خنک‌کاری هوای ورودی (Inlet Air Cooling)	خنک کردن هوای ورودی به توربین گاز با استفاده از چیلر یا سیستم مه‌پاش	افزایش توان تا ۱۰٪ در هوای گرم، بازگشت سرمایه سریع	مصرف برق بالا در سیستم‌های چیلر، وابستگی به شرایط محیطی در سیستم‌های مه‌پاش
بازسازی و نوسازی (R&M) و افزایش عمر(LE)	تعویض قطعات فرسوده، بهینه‌سازی بویلر، روتور توربین و سیستم‌های کمکی	افزایش عمر ۱۵–۲۰ ساله، قابلیت اطمینان بالا	هزینه سرمایه‌گذاری بالا، زمان اجرای طولانی (ماه‌ها تا سال‌ها)، توقف نیروگاه
تزریق بخار یا سوخت کمکی	تزریق بخار به محفظه احتراق یا استفاده از سوخت سنتز (سیگنز)	افزایش توان تا ۵۰٪ در برخی پیکربندی‌ها	پیچیدگی عملیاتی، کاهش راندمان در برخی شرایط، نیاز به تجهیزات اضافی
بهبود انعطاف‌پذیری عملیاتی	کاهش حداقل بار قابل تحمل (تا ۳۰–۲۰٪) و افزایش نرخ بارگذاری	افزایش درآمد در بازارهای برق با تعرفه‌های پیک و غیرپیک	افزایش هزینه سوخت و استهلاک، نیاز به بهینه‌سازی سیستم کنترل

۵-۲- روش‌های مبتنی بر دیجیتالی‌سازی

این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر **نرم‌افزار، داده و هوش مصنوعی** هستند و تغییرات فیزیکی محدودی نیاز دارند:

روش	توضیح	مزایا	چالش‌ها
دوقلوی دیجیتال (Digital Twin)	شبیه‌سازی مجازی نیروگاه برای بهینه‌سازی لحظه‌ای پارامترها	افزایش توان ۳–۵ درصد بدون توقف تولید، پیش‌بینی دقیق رفتار	نیاز به مدل‌سازی دقیق، نیاز به زیرساخت داده
کنترل پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر مدل(MPC)	الگوریتم‌های هوشمند برای تنظیم خودکار پارامترها	افزایش توان ۱–۲ درصد، کاهش مصرف سوخت	نیاز به راه‌اندازی و تنظیم اولیه تخصصی
نگهداری پیش‌بینی‌کننده (Predictive Maintenance)	پایش وضعیت تجهیزات با سنسورها و هوش مصنوعی	کاهش خرابی‌های اجباری تا ۱۵٪، کاهش هزینه تعمیرات	نیاز به نصب سنسورهای جدید، نیاز به تحلیل داده
سنسورهای مجازی (Virtual Sensors)	تخمین پارامترهای حیاتی بدون سنسور فیزیکی	کاهش هزینه نصب و نگهداری، دسترسی به داده‌های غیرقابل اندازه‌گیری	دقت کمتر از سنسور فیزیکی در برخی موارد

۵-۳- تحلیل تطبیقی

آیا حتماً باید به سمت دیجیتالی‌سازی رفت؟
پاسخ کوتاه: خیر، همیشه نه. اما در بسیاری از موارد، مسیر بهینه ترکیبی از هر دو رویکرد است.

تحلیل بر اساس معیارهای کلیدی:

معیار	روش‌های رایج (سخت‌افزاری)	روش‌های دیجیتالی	برنده
هزینه اولیه	بالا (میلیون‌ها دلار)	متوسط تا بالا (بسته به وسعت)	**دیجیتال** (در مقیاس کوچک‌تر)
زمان اجرا	طولانی (ماه‌ها تا بیش از یک سال)	کوتاه (هفته‌ها تا چند ماه)	**دیجیتال**
توقف تولید	نیاز به توقف کامل یا جزئی	معمولاً بدون توقف (آنلاین)	**دیجیتال**
میزان افزایش توان	بالا (۱۰ تا ۵۰ درصد) و محسوس	تدریجی (۳ تا ۵ درصد) و تجمعی	**روش رایج** (برای افزایش‌های بزرگ)

معیار	روش‌های رایج (سخت‌افزاری)	روش‌های دیجیتالی	برنده
بازگشت سرمایه (ROI)	۳–۱ سال (برای پروژه‌های موفق)	۱۲–۶ ماه	**دیجیتال** (سریع‌تر)
پایداری نتایج	پایدار (تا سال‌ها)	نیاز به به‌روزرسانی مداوم الگوریتم‌ها	**روش رایج**
قابلیت ترکیب	محدود (تغییرات فیزیکی یک‌باره)	بالا (قابل ترکیب با سایر روش‌ها)	**دیجیتال**

۵–٤– تحلیل اقتصادی و استراتژیک

شواهد موجود نشان می‌دهد که:

۱. **صرفاً روش‌های رایج کافی نیستند**: طبق گزارش مک‌کینزی، حتی پیشرفته‌ترین شرکت‌های برق نیز تنها کاربردهای دیجیتال مجزا (Isolated Use Cases) را پیاده‌سازی کرده‌اند و پتانسیل سوددهی ۲۰ تا ۳۰ درصدی از طریق دیجیتالی‌سازی کامل هنوز تحقق نیافته است.

۲. **دیجیتالی‌سازی به تنهایی پاسخگوی نیازهای بزرگ نیست**: اگر هدف افزایش ۵۰ مگاواتی باشد، خنک‌کاری هوای ورودی یا نصب توربین جدید (روش رایج) پاسخگو است، نه صرفاً بهینه‌سازی نرم‌افزاری.

۳. **رویکرد بهینه، ترکیبی است**: وزارت انرژی آمریکا بر «هماهنگی و بهینه‌سازی همزمان ارتقاءهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری» تأکید دارد. همچنین در صنعت برق آبی، کارشناسان تأکید می‌کنند که دیجیتالی‌سازی یک افزودنی اختیاری نیست، بلکه پیش‌نیازی برای انجام درست مدرنیزاسیون است.

۵–۵– جدول تصمیم‌گیری: چه زمانی کدام مسیر را انتخاب کنیم؟

سناریو	مسیر پیشنهادی	دلیل
واحد بسیار قدیمی (بیش از ۳۰ سال) با افت توان شدید	اولویت با روش رایج (R&M/LE)	قطعات فرسوده نیاز به تعویض فیزیکی دارند
واحد نسبتاً جدید (۱۵–۱۰ سال) با افت توان تدریجی	اولویت با دیجیتالی‌سازی	توان پنهان از طریق بهینه‌سازی نرم‌افزاری قابل بازیابی است

سناریو	مسیر پیشنهادی	دلیل
نیاز فوری به افزایش توان در فصل پیک (مثلاً تابستان)	اولویت با روش رایج (IAC)	خنک‌کاری هوای ورودی در کوتاه‌ترین زمان ممکن است
نیاز بلندمدت به افزایش پایدار توان همراه با کاهش هزینه‌ها	رویکرد ترکیبی	دیجیتال برای بهره‌برداری بهینه و R&M برای زیرساخت فیزیکی
بودجه محدود و نیاز به ROI سریع	اولویت با دیجیتالی‌سازی	سرمایه‌گذاری کمتر، بازگشت سرمایه سریع‌تر (کمتر از یک سال)
نیروگاه در بازار برق با نوسانات شدید قیمت (پیک و غیرپیک)	اولویت با دیجیتالی‌سازی (انعطاف‌پذیری عملیاتی)	سودآوری از طریق تنظیم لحظه‌ای تولید بر اساس قیمت

حال آیا حتماً باید به سمت دیجیتالی‌سازی رفت؟

پاسخ: در دنیای امروز، بله، اما نه به عنوان جایگزین کامل روش‌های رایج، بلکه به عنوان مکمل ضروری آنها.

سه دلیل کلیدی:

۱. **همه نیروگاه‌ها در حال پیر شدن هستند:** حدود ۴۰٪ از ظرفیت نصب‌شده جهانی بیش از ۴۰ سال سن دارد. این نیروگاه‌ها هم نیاز به بازسازی فیزیکی (R&M) و هم بهینه‌سازی دیجیتال دارند.
۲. **شرایط بهره‌برداری تغییر کرده است:** ورود انرژی‌های تجدیدپذیر باعث شده نیروگاه‌های حرارتی بیشتر در حالت سیکلی و بار جزئی کار کنند. روش‌های سنتی برای این شرایط طراحی نشده‌اند، اما دیجیتالی‌سازی می‌تواند این چالش را مدیریت کند.
۳. **بازده اقتصادی:** روش‌های صرفاً سخت‌افزاری هزینه‌های سرمایه‌ای بالایی دارند و نیاز به توقف تولید دارند. دیجیتالی‌سازی با سرمایه‌گذاری کمتر و بدون توقف، می‌تواند ۵–۳٪ افزایش توان ایجاد کند و بستر را برای بهره‌برداری بهینه از سرمایه‌گذاری‌های سخت‌افزاری فراهم آورد.

بهترین استراتژی، ترکیب هوشمندانه «نوسازی سخت‌افزاری هدفمند» با «دیجیتالی‌سازی فراگیر» است. ابتدا با دیجیتالی‌سازی و دوقلوی دیجیتال، نقاط دقیق افت توان شناسایی شود، سپس سرمایه‌گذاری سخت‌افزاری دقیقاً در همان نقاط انجام گیرد. این رویکرد، هم بازگشت سرمایه را تسریع می‌کند و هم نتایج پایدارتری به همراه دارد.

٦- بلوغ فناوری و افق آینده راهکارهای دیجیتال در نیروگاه‌های حرارتی

سطح‌بندی بلوغ فناوری

بر اساس **مدل بلوغ دوقلوی دیجیتال استاندارد ISO/IEC 30186:2025** ، فناوری‌های مطرح‌شده را می‌توان در چهار سطح زیر دسته‌بندی کرد:

سطح بلوغ	ویژگی‌ها	فناوری‌های مربوطه
سطح ۲-۱ نوظهور(Emerging)	اثبات مفهوم در محیط آزمایشگاهی، کاربردهای محدود صنعتی	سنسورهای مجازی پیشرفته، VLMبرای تشخیص رفتار کارکنان
سطح ۳ در حال بلوغ(Maturing)	پیاده‌سازی در پروژه‌های پیشرو، نتایج مستند، نیاز به بهینه‌سازی	دوقلوی دیجیتال پایه، AR/VR برای آموزش، بهینه‌سازی احتراق با AI
سطح ٤ بالغ (Mature)	استاندارد صنعتی، پذیرش گسترده، بازگشت سرمایه اثبات‌شده	کنترل پیش‌بینی‌کننده (MPC)، نگهداری پیش‌بینی‌کننده (PdM)، سیستم کنترل دیجیتال (DCS)
سطح ٥ تحول‌آفرین (Transformative)	خودکارسازی کامل، تصمیم‌گیری مستقل، یکپارچگی کامل	نیروگاه خودران هوشمند، دوقلوی دیجیتال خودتطبیق‌شونده

تحلیل بلوغ هر دسته فناوری

٦-١- دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) و مدل‌های خودتطبیق‌شونده

وضعیت فعلی: سطح ۳ (در حال بلوغ) تا ٤ (بالغ)

دوقلوی دیجیتال به سطحی از بلوغ رسیده که استاندارد بین‌المللی مشخصی برای آن تدوین شده است. نمونه اجرا شده در **نیروگاه سانتالدیح هند (WBPDCL)** نشان می‌دهد که این فناوری قادر است نیروگاه را به صورت دقیق شبیه‌سازی کرده و سناریوهای "چه-اگر" را ارزیابی کند. همچنین در **نیروگاه سیکل ترکیبی کره جنوبی (KOEN)** به عنوان مطالعه موردی در استاندارد ISO/IEC 30186 آورده شده است.

پیشرفت اخیر - دوقلوی دیجیتال خودتطبیق‌شونده: سطح ۳-۲

مقالات علمی منتشر شده در سال ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که نسل جدید دوقلوهای دیجیتال قادرند به صورت خودکار و بر اساس داده‌های لحظه‌ای، پارامترهای خود را به‌روزرسانی کنند. نتایج تجربی این پژوهش حاکی از آن است که خطای محاسباتی برای **حداقل تکنولوژیکی توربین از ٪۱۷.٤ به ٪۰.۷** و برای **مصرف سوخت واحد از ٪۷.۹ به ٪۱** کاهش یافته است.

افق آینده: پیش‌بینی می‌شود دوقلوی دیجیتال تا سال ۲۰۳۰ به سطح ۵ (تحول‌آفرین) برسد و به طور کامل جایگزین روش‌های سنتی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شود.

٦-۲- نگهداری پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر AI

وضعیت فعلی: سطح ٤ (بالغ) - پذیرش گسترده صنعتی

مطالعات جمعی نشان می‌دهند که یادگیری ماشین قادر است خرابی تجهیزات در شبکه‌های انتقال و توزیع را **٦ تا ۱۲ ماه** پیش‌بینی کند و **خرابی‌های برنامه‌ریزی‌نشده را ۳۵ تا ٤۰ درصد کاهش دهد.** بازار predictive maintenance برای دارایی‌های انرژی از **۱۰.٦ میلیارد دلار در ۲۰۲٤ به ٤۷.۸ میلیارد دلار در ۲۰۲۹** خواهد رسید.

مثال اجرا شده در نیروگاه سانتالدیح:

- تشخیص زودهنگام خرابی یاتاقان فن هوای اولیه (Primary Air Fan) با تحلیل روند دما و لرزش
- شناسایی انحراف لرزش در یاتاقان شماره ۲ توربین بلافاصله پس از استارت‌آپ
- این موارد در روش سنتی قابل تشخیص نبودند و از توقف‌های اجباری جلوگیری کردند

افق آینده: تا سال ۲۰۲۹، انتظار می‌رود هوش مصنوعی نه تنها تشخیص دهد، بلکه **علت ریشه‌ای (Root Cause Analysis) را به صورت خودکار** انجام دهد و اقدامات اصلاحی را پیشنهاد کند.

٦-۳- سیستم‌های کنترل پیشرفته MPC و کنترل تطبیقی

وضعیت فعلی: سطح ٤ (بالغ)

بازار سیستم‌های کنترل توربین در سال ۲۰۲۶ برابر **۲۱.۳ میلیارد دلار** است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ به **۲۵.۳ میلیارد دلار** برسد (نرخ رشد مرکب سالانه ۴.۵٪) .شرکت‌های پیشرو مانند RE Technologies آلمان، کنترل‌کننده‌های تطبیقی برای توربین‌های بادی در شرایط کم‌باد و محیط‌های شدید اقلیمی عرضه کرده‌اند و در نیروگاه‌های حرارتی قابل تعمیم خواهند بود.

افق آینده: تمرکز بر **کنترل‌کننده‌های خودتطبیق‌شونده (Adaptive Controllers)** که بدون نیاز به تنظیم دستی، خود را با شرایط محیطی و فرسودگی تجهیزات هماهنگ می‌کنند.

٦-٤- AR/VR برای آموزش و شبیه‌سازی ایمنی

وضعیت فعلی: سطح ٤-٣ (در حال بلوغ تا بالغ)

- **کاهش زمان رسیدن به شایستگی(Time to Competency) :** از ۵.۵ ماه به ۱.۹ ماه (کاهش ۶۶٪)
- **کاهش هزینه آموزش:** از ۵،۶۵۰ دلار به ۶۵۰ دلار به ازای هر نفر (کاهش ۸۸٪)
- **کاهش حوادث ایمنی:** ۳۵٪
- **بازگشت سرمایه:** دوره بازپرداخت ۲.۳ ماه، ROI سال اول ۴۲۸٪

بازار جهانی AR در بخش انرژی در سال ۲۰۲۵ از **۱۲۰ میلیارد دلار** عبور کرده است و چین سهم بیش از ۳۰٪ را دارد.

افق آینده: در نیروگاه خودران کره جنوبی، برنامه استفاده از **VLM (Vision Language Model)** برای درک رفتار کارکنان و تشخیص موقعیت‌های پرخطر تا سال ۲۰۲۶ در دست اجراست.

٦-٥- سیستم‌های یکپارچه داده و داشبوردهای نظارتی

وضعیت فعلی: سطح ٤ (بالغ) - استاندارد صنعتی

در نیروگاه سانتالدیح، **بیش از ٤٠٠ داشبورد** پیکربندی شده و داده‌های **١٦ سیستم کنترل توزیع‌شده (DCS)** در یک پلتفرم یکپارچه تجمیع شده‌اند. **سیستم گزارش‌دهی استثنایی (Exception-Based Reporting)** به اپراتورها اجازه می‌دهد فقط روی پارامترهای خارج از محدوده تمرکز کنند.

افق آینده: گذار از "گزارش‌دهی داده" به **"قضاوت خودکار داده "**همانطور که مدیرعامل Intellivix عنوان کرده: دوران DX مبتنی بر جمع‌آوری داده و پایش ساده به پایان رسیده است. AX (تحول هوش مصنوعی) که در آن داده‌ها خودشان تصمیم می‌گیرند و AI پیش‌بینی و اقدام می‌کند، تنها استراتژی بقای صنعت برق است.

٦-٦- برنامه و افق آینده فناوری‌ها

برنامه زمانی هوشمندسازی نیروگاه‌ها (بر اساس نقشه راه هوشمندسازی کره جنوبی)

بازه زمانی	برنامه عملیاتی	فناوری‌های کلیدی
٢٠٢٦	اثبات مفهوم و پایلوت	VLMبرای کنترل ایمنی، RAG برای دانش‌نگاری، دوقلوی دیجیتال خودتطبیق

بازه زمانی	برنامه عملیاتی	فناوری‌های کلیدی
۲۰۲۷-۲۰۲۸	توسعه و مقیاس‌پذیری	هوش مصنوعی مولد برای تحلیل علت ریشه‌ای، ربات‌های چهارپای خودکار برای بازرسی
۲۰۲۹	بلوغ و خودکاری کامل	**نیروگاه خودران هوشمند (Intelligent Autonomous Power Plant)** با حلقه بسته کنترل خودکار
۲۰۳۰ به بعد	تحول در مدل کسب‌وکار	صادرات پکیج "EPC+AI" به عنوان مدل جدید کسب‌وکار برای صنعت برق

کلان‌روندهای آینده

۱. **از DX به AX و تحول هوش مصنوعی:** تمرکز از جمع‌آوری داده به تصمیم‌گیری خودکار و پیش‌بینی
۲. **نیروگاه خودران (Autonomous Power Plant)**
۳. **مدل"EPC+AI"** : ترکیب مهندسی، تأمین و ساخت نیروگاه با سیستم‌عامل هوشمند
۴. **اقتصاد هیدروژن و سوخت‌های تجدیدپذیر:** سیستم‌های کنترل تطبیقی برای سازگاری با سوخت‌های متغیر (هیدروژن، آمونیاک، بیومس)
۵. **یکپارچگی با شبکه هوشمند و انرژی تجدیدپذیر:** نیروگاه حرارتی به عنوان عنصر انعطاف‌پذیر در شبکه با نفوذ بالای انرژی پاک

۶-۷- چالش‌های پیش رو برای بلوغ کامل

چالش	توضیح	راهکار پیشنهادی
قابلیت تفسیرپذیری پایین مدل‌هایAI	تصمیمات جعبه سیاه(black box) ؛ اپراتورها به آن اعتماد ندارند	توسعه "Human-in-the-Loop" با نظارت نهایی توسط متخصص انسانی
ضعف در تعمیم‌پذیری به شرایط جدید	مدل‌ها با تغییر نوع سوخت یا شرایط محیطی دقت خود را از دست می‌دهند	استفاده از یادگیری بدون نظارت و تطبیق آنلاین
مشکل یکپارچگی با سخت‌افزار قدیمی	AIبه پردازش‌های سنگین نیاز دارد؛ PLCهای قدیمی توان کافی ندارند	معماری **"Cloud-Edge-Terminal"**(ابر-لبه-پایانه) برای توزیع بار محاسباتی
امنیت سایبری	نیروگاه‌ها زیرساخت حیاتی هستند و اتصال به شبکه ریسک امنیتی ایجاد می‌کند	ایجاد **DMZمبتنی بر OT** با دروازه یک‌طرفه بین شبکه صنعتی و شبکه اداری + رویکرد"Security by Design"

جمع‌بندی نهایی: آیا باید منتظر بلوغ کامل بود؟

پاسخ: خیر. فناوری‌های سطح ۳ و ۴ دوقلوی دیجیتال، نگهداری پیش‌بینی‌کننده، MPC در حال حاضر بالغ هستند و بازگشت سرمایه اثبات‌شده دارند. نمونه WBPDCL نشان می‌دهد که حتی یک نیروگاه دولتی در هند نیز توانسته است با استقرار این فناوری‌ها، نتایج ملموسی در کاهش خرابی‌ها و بهبود بازدهی کسب کند.

توصیه استراتژیک:

- **کوتاه‌مدت (۱۲-۶ ماه):** استقرار نگهداری پیش‌بینی‌کننده روی تجهیزات حیاتی (توربین، بویلر، فن‌ها، پمپ‌ها)
- **میان‌مدت (۳-۱ سال):** پیاده‌سازی دوقلوی دیجیتال و سیستم کنترل پیش‌بینی(MPC)
- **بلندمدت (۵-۳ سال):** حرکت به سمت نیروگاه خودران (AX) با یکپارچگی کامل AI و رباتیک

نکته کلیدی آن است که **نیازی به انتظار برای بلوغ فناوری‌های سطح ۵ نیست**، زیرا فناوری‌های موجود در سطح ۳ و ۴ امروز نیز ارزش اقتصادی بالایی دارند و زیرساخت لازم برای تحولات آینده را فراهم می‌کنند.